

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И СТАНОЧНЫХ СИСТЕМ

**СПРАВОЧНИК - УЧЕБНИК
В ТРЕХ ТОМАХ**

ТОМ 1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНКОВ

*Под общей редакцией д-ра техн. наук,
Лауреата Государственной премии СССР,
Заслуженного деятеля науки и техники РФ,
профессора А.С. Проникова*

*Рекомендовано Госкомитетом Российской Федерации
по высшему образованию в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Технология оборудования и
автоматизация машиностроительных производств» и специальностям
«Металлорежущие станки и инструменты»
и «Технология машиностроения»*

МОСКВА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»**

1994

ББК 34.63-5-02.я2

П79

УДК 621.9.06.001.63 (035)

Федеральная целевая программа книгоиздания России

Авторы тома: А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов, В.С. Белов, А.И. Бельзецкий, С.Н. Борисов, Г.Н. Васильев, В.В. Громов, В.А. Исаченко, Ю.И. Кириллов, В.А. Кудинов, Г.Г. Лебязьев, В.А. Лещенко, И.А. Ординарцев, В.Н. Подураев, А.В. Пуш, В.П. Романов, Б.И. Сапожников, В.В. Селезнева, В.А. Семенов, В.С. Стародубов, Е.И. Тавер, Л.П. Толстых, Б.А. Усов, П.М. Чернянский

Рецензенты:

Кафедра «Станки» МГТУ «Станкин»,
инж. А.Е. Добровольский

П79

Проектирование металлорежущих станков и станочных систем:

Справочник-учебник. В 3-х т. Т. I: Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др.; Под общ. ред.

А.С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. – 444 с.: ил.

ISBN 5-7038-1261-5

ISBN 5-217-01246-3

В первом томе рассмотрены технические показатели станков, этапы проектирования, расчет основных параметров, выбор компоновки, методы расчета и оценки на стадии проектирования точности, жесткости, вибростойкости и износостойкости станка, гидравлической и электрической схем, выбор привода и системы управления, методы художественного проектирования станка, а также методы испытания опытных образцов в целях подтверждения заложенных в проекте технических характеристик.

Учебник прошел успешную апробацию в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Технология оборудования и автоматизация машиностроительных производств» и специальностям «Металлорежущие станки и инструменты» и «Технология машиностроения», преподавателей, а также инженерно-технических работников, работающих в области станкостроения.

П 2705020000-122 без объявления
098(2)-94

ББК 34.63-5-02.я2

П 2705020000-648 КБ 52-232-92
038(01)-94

ISBN 5-7038-1261-5 (т. I, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ISBN 5-7038-1259-3 (Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ISBN 5-217-01246-3 (т. I, Машиностроение)

ISBN 5-217-01245-5 (Машиностроение)

© А.С. Проников, О.И. Аверьянов,
Ю.С. Аполлонов и др., 1994

Предисловие

Предлагаемый трехтомный справочник ставит своей целью дать студентам, осваивающим специальность разработчика современного автоматизированного технологического оборудования, методологические основы проектирования станков и станочных систем, основные методы расчета, справочные данные, типовые и оригинальные решения, перспективные направления разработок.

Металлорежущий станок и станочный модуль являются основой для построения современных технологических систем и производств, в том числе гибких.

Трудно представить себе более разнообразные машины по размерам, конструктивному оформлению, техническим характеристикам и принципам действия, чем металлорежущие станки. При их создании используются все достижения машино- и приборостроения, электротехники и электроники, автоматики и информатики.

Постоянный поиск новых решений для достижения прецизионности, производительности, надежности, экономичности и других требований потребителей приводит к частой смене моделей станков, к непрерывному появлению конкурирующих конструкций. Преимущество получает та фирма, которая обеспечивает более высокие технические характеристики и расширяет технологические возможности станка и станочной системы, дает гарантию сохранения показателей качества станка в течение всего периода эксплуатации и в возможно более короткий срок осуществляет выпуск новой работоспособной конструкции.

Поэтому создатели новой техники должны использовать все достижения науки о станках, анализировать тенденции развития станкостроения, широко применять автоматизированные

методы расчета и проектирования, владеть методологией, позволяющей принимать правильные решения для достижения поставленных целей, использовать накопленный опыт, оперативно применять справочные материалы и стандарты, находить оптимальные пути для обеспечения высших технических характеристик создаваемых моделей станков, и в первую очередь, их качества, надежности и производительности при наименьших затратах времени и рациональном использовании средств.

Научно-техническая литература в области станкостроения весьма обширна, однако справочной литературы, отражающей все основные аспекты сложного процесса проектирования станков и станочных систем, явно недостаточно. Кроме того, переход технических вузов на глобальные планы обучения требует создания учебников нового типа, формирующих специалистов широкого профиля.

Задача предлагаемого издания — восполнить этот пробел. В справочнике даны материалы, которые помогут студентам приобрести навыки расчета и проектирования станков и станочных систем.

В т. 1 рассмотрены вопросы, относящиеся к станку в целом, методология его создания и получения заданных технических характеристик; в т. 2 описаны методы расчета и конструирования основных узлов, механизмов и элементов станка; в т. 3 даны основы проектирования станочных модулей и, в первую очередь, для гибких производственных систем.

Авторами справочника являются ведущие специалисты в области станкостроения — ученые, конструкторы, организаторы производства, разработчики новой техники, преподаватели вузов.

Состояние и основные тенденции развития станков и станочных систем

1.1. Станочный парк

Станкостроение — базовая отрасль машиностроения. Парк металлообрабатывающего оборудования определяет производственно-технический и экономический потенциал машиностроительного комплекса. Станки, машины и оснастка, производимые станкостроением, составляют примерно 60 % активной части промышленно-производственных фондов машиностроения.

Недооценка необходимости опережающего развития станкостроения ведет к низкому уровню производительности труда, неудовлетворительному качеству продукции, дефициту рабочей силы, медленным темпам обновления продукции и ее высокой стоимости.

На рис. 1.1 приведены предполагаемые соотношения фактических и прогнозируемых объемов выпуска продукции машиностроения, парка металлорежущих станков и демографический прогноз численности станочников на период до 2000 г.

Генеральной тенденцией развития машиностроения является его автоматизация на базе станков с ЧПУ, автоматов и полуавтоматов, роботизированных технологических комплексов (РТК), гибких производственных модулей (ГПМ), автоматических линий (АЛ), в том числе гибких (ГАЛ), переналаживаемых (ПАЛ) и роторно-конвейерных (АРКЛ), а также гибких производственных систем (ГПС) и участков (ГПУ).

На рис. 1.2 показаны области рационального использования металлорежущего оборудования в зависимости от номенклатуры и размера партий. Для массового производства характерно использование высокопроизводительного малопереналаживаемого оборудования — АЛ, АРКЛ. Серийное производство, в котором изготавливается более 75 % всей продукции машиностроения, должно обеспечивать оборудованием, сочетающим достаточно высокую производительность с необходимыми универсальностью и гибкостью, что дает воз-

можность интенсивного обновления продукции без существенной замены основных фондов. Как правило, такие возможности дает оборудование с ЧПУ, в особенности многоцелевые станки.

Другим принципом, позволяющим снизить потери производительности вследствие переналадок, является использование групповой технологии. Сочетание групповой технологии с гибкостью оборудования позволяет в серийном производстве обеспечить интенсивные темпы обновления продукции при сохранении высокой производительности.

Значительная часть станочного парка страны (около 2800 тыс. единиц) находится в немашиностроительных отраслях, в основном в ремонтно-механических цехах. Это в основном универсальное оборудование, используемое недостаточно эффективно в отношении как рабочего времени, так и технологических возможностей. Развитие этой части станочного парка требует: оснащения его универсальным оборудованием с умеренной степенью автоматизации и расширенными технологическими возможностями с одновременным уменьшением числа станков за счет повышения надежности работы машин и механизмов, организации фирменного и территориального сервиса, а также увеличения производства запасных частей и сокращения сроков их получения.

Рост трудоемкости механообработки связан с ростом объема продукции машиностроения (см. рис. 1.1). Однако он не пропорционален росту этого объема. Ряд факторов снижает трудоемкость обработки благодаря следующим причинам:

- приближению формы заготовки к форме изделия;

- специализации производства;

- повышению уровня автоматизации, оснащенности и надежности используемого оборудования;

- росту режимов обработки благодаря использованию новых инструментальных материалов и износостойких покрытий, автоматической смены инструментов.

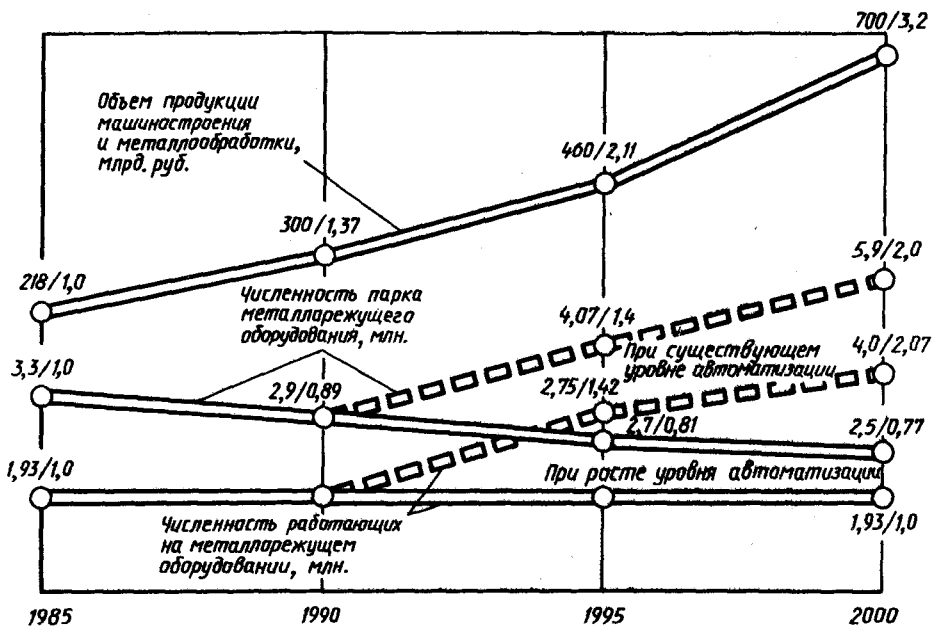


Рис. 1.1. Прогноз развития металлорежущего оборудования в машиностроении до 2000 г. (в знаменателе — показатели роста к 1985 г.; в основных цехах занято 2,2 млн. станков)

Имеются и факторы, повышающие трудоемкость механообработки: существенное повышение требований к точности обработки; повышение в общем объеме механообработки доли высокопрочных материалов.

В результате комплексной оценки различных факторов можно сделать вывод, что к 2000 г.

доля трудоемкости механообработки в общей трудоемкости продукции машиностроения снизится всего на 3—5 % и составит примерно 43 %.

На рис. 1.3 показана динамика мирового выпуска металлообрабатывающего оборудования. Видно, что наряду с ростом выпуска

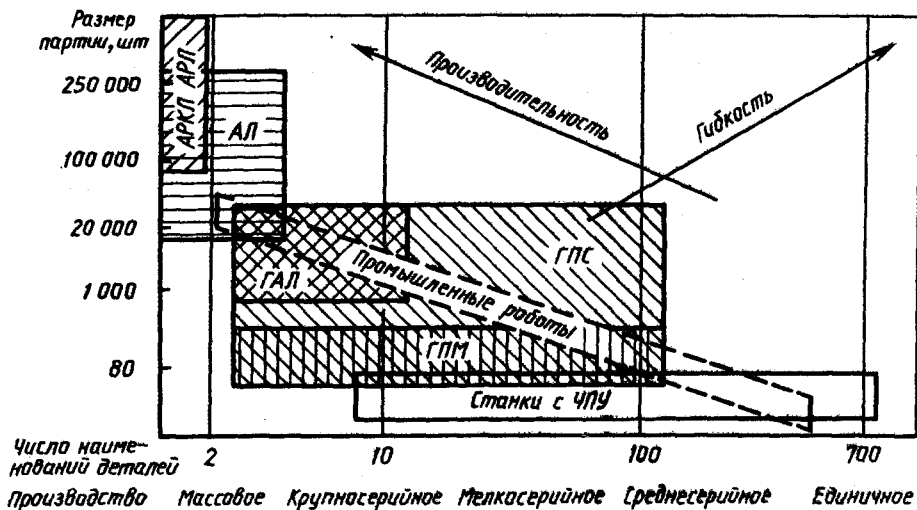


Рис. 1.2. Области применения автоматизированного металлорежущего оборудования

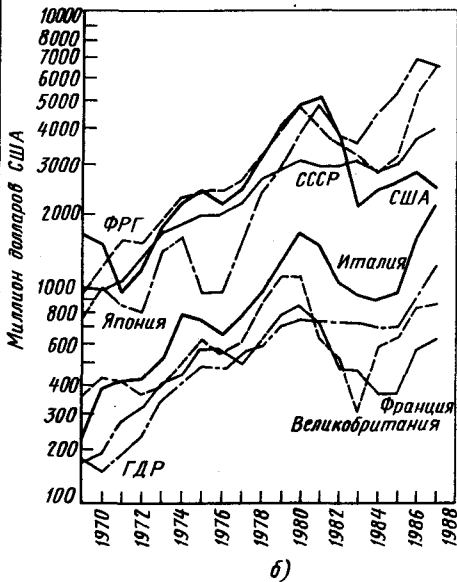
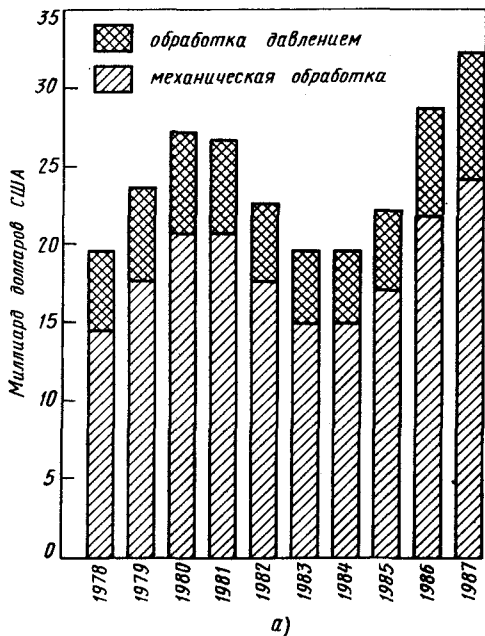


Рис. 1.3. Мировое производство станкостроения: а — объем производства; б — динамика выпуска восьми ведущих стран

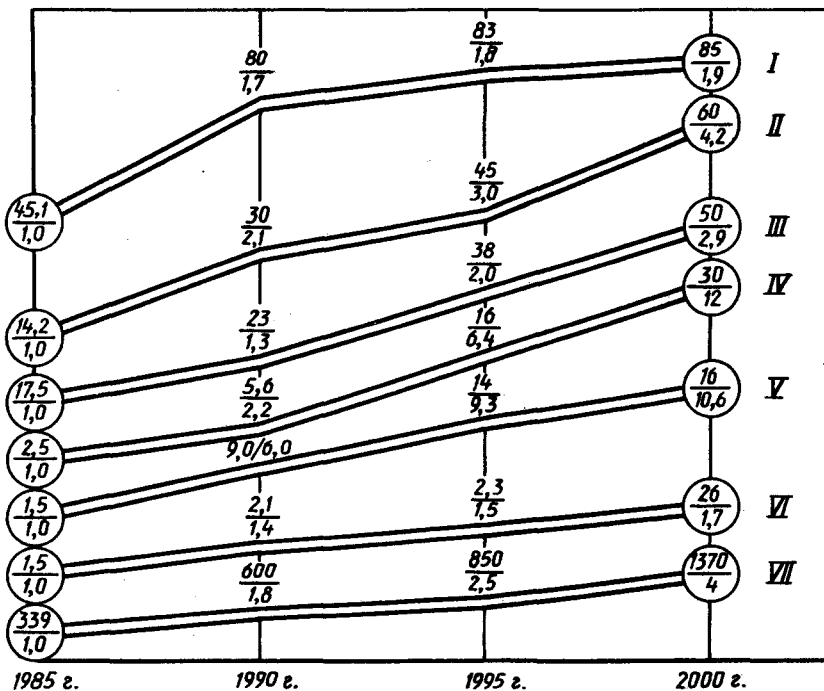


Рис. 1.4. Прогноз производства прогрессивных видов металлорежущих станков до 2000 г. (в числителе — число в тыс. штук, в знаменателе — темпы роста в %): I — автоматы и полуавтоматы всех групп; II — станки с ЧПУ; III — станки высокой и особо высокой точности; IV — ГПМ; V — многоцелевые станки; VI — тяжелые и уникальные станки; VII — автоматические линии

1.1. Общая характеристика Типажа металлообрабатывающих станков СССР (на 1990г.)

| Наименование | Число моделей в группе | | Доля в общем выпуске, % | |
|--------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|--------------|
| | универсальных | специализированных | по количеству | по стоимости |
| Токарные | 88 | 64 | 21,2 | 21 |
| Шершильные и расточные | 48 | 56 | 15,6 | 6,7 |
| Шлифовальные | 65 | 209 | 17,5 | 8,5 |
| Электрофизико-химические | 16 | 8 | 0,3 | 0,4 |
| Зубообрабатывающие | 66 | 43 | 0,9 | 1,4 |
| Фрезерные | 34 | 39 | 9,2 | 6,3 |
| Строгальные и долбежные | 18 | 2 | 2,1 | 0,9 |
| Протяжные | 7 | 23 | 0,3 | 0,2 |
| Отрезные и разные | 30 | 23 | 3,5 | 1,1 |
| Специальные и агрегатные | — | — | 29,4 | 53,5 |
| С ЧПУ | 90 | 73 | 19 | 49 |
| Многоцелевые | 45 | 7 | 2,9 | 15,5 |
| ГПМ | 35 | 13 | — | — |
| Высокоточные | 108 | 130 | 15 | 19,1 |
| Тяжелые и уникальные | 55 | 80 | 0,8 | 5,4 |

оборудования для обработки давлением происходит, хотя и с колебаниями, существенный рост объемов производства металлорежущих станков.

На основе анализа темпов роста выпуска продукции, доли механообработки в общей трудоемкости, а также с учетом прогнозируемого роста производительности и сменности работы станков, улучшения использования времени рабочей смены для машиностроения требуется выпуск примерно 185 тыс. новых станков в год. Структура их выпуска показана на рис. 1.4.

Большое многообразие изготавливаемых деталей требует соответствующего разнообразия типов и моделей металлообрабатывающих станков. Для массового и крупносерийного производства используют в основном специальные станки, предназначенные для изготовления заданной номенклатуры конкретных деталей. Основное количество станков составляют универсальные станки, выпускаемые для обозначенного потребителя, и специализированные станки. В нашей стране станки двух последних видов систематизированы в периодически утверждаемых Типажах, отражающих и специализацию станкостроительных заводов и КБ.

Действующий на 1991—1995 гг. Типаж [4] содержит 1591 типоразмер (моделей и модификаций) станков, в том числе универсальных

1.2. Мировое производство и товарооборот металлообрабатывающего оборудования [5] (на 1990 г.)

| Страна | Производство, млн. долларов США | | Товарооборот, млн. долларов США | |
|----------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|---------|
| | всего | металлорежущих станков | Экспорт | Импорт |
| Япония | 6426,0 | 4762,0 | 3034,8 | 264,3 |
| ФРГ | 6402,0 | 4653,0 | 3306,2 | 1174,4 |
| СССР | 3976,3 | 3234,0 | 312,0 | 1639,2 |
| США | 2585,0 | 1778,4 | 586,7 | 1968,9 |
| Италия | 2235,2 | 1554,9 | 1048,5 | 566,5 |
| Швейцария | 1475,7 | 1267,7 | 1435,8 | 306,1 |
| ГДР | 1302,5 | 1046,5 | 1193,7 | 197,5 |
| Франция | 697,3 | 556,1 | 284,3 | 738,1 |
| Великобритания | 601,6 | 508,7 | 501,0 | 516,9 |
| Тайвань | 577,8 | 482,6 | 379,9 | 214,8 |
| Югославия | 573,8 | 425,8 | 325,3 | 156,7 |
| Южная Корея | 530,9 | 393,5 | 37,5 | 486,1 |
| Испания | 510,0 | 395,0 | 238,8 | 218,6 |
| Чехословакия | 405,0 | 360,0 | 330,0 | 85,0 |
| Бразилия | 400,0 | 300,0 | 39,0 | 49,0 |
| Румыния | 355,0 | 330,0 | 55,0 | 75,0 |
| Китай | 342,0 | 285,0 | 8,0 | 115,0 |
| Швеция | 257,8 | 158,5 | 192,8 | 312,3 |
| Венгрия | 216,8 | 196,7 | 184,6 | 124,2 |
| Канада | 197,7 | 125,9 | 61,0 | 402,0 |
| Индия | 189,3 | 110,4 | 45,7 | 146,6 |
| Бельгия | 179,3 | 42,8 | 294,3 | 321,1 |
| Польша | 173,0 | 150,0 | 78,0 | 95,0 |
| Австрия | 155,0 | 120,0 | 169,7 | 173,7 |
| Болгария | 140,0 | 130,0 | 85,0 | 150,0 |
| Израиль | 130,0 | 95,0 | 115,0 | 153,0 |
| Дания | 89,0 | 64,4 | 62,8 | 128,6 |
| Австралия | 45,0 | 17,0 | 4,9 | 137,4 |
| Нидерланды | 40,7 | 28,6 | 118,3 | 235,7 |
| Сингапур | 35,5 | 32,0 | 85,0 | 145,0 |
| Всего | 31330, | 23644,3 | 14668,2 | 11888,5 |

1124 и специализированных 467. Автоматические и полуавтоматические станки составляют 79 %, а станки с ручным управлением 21 %. Значительна доля станков с ЧПУ (31 % моделей) и высокоточных станков классов «В», «А» и «С» (в Типаже они представлены 108 моделями на 1990 г. и 203 моделями в 1995 г.).

Хотя тяжелые и уникальные станки выпускают в небольших количествах (около 850 единиц в год), они весьма разнообразны по своему назначению (135 типоразмеров). Характерной особенностью современного типажа является постоянное расширение номенклатуры многоцелевых станков и ГПМ. Они пред-

ставлены соответственно 52 и 48 типоразмерами. Более 90 % типажных станков входит в состав унифицированных гамм, построенных на основании стандартизованных размерных рядов. В табл. 1.1 приведена общая характеристика Типажа металлообрабатывающих станков в нашей стране на 1991—1995 гг. Номенклатура Типажа соответствует технологическому и организационному уровню современного промышленного производства. Она постоянно совершенствуется путем изъятия устаревших станков и включения новых взамен выбывших, а также расширения для вновь появляющихся технологий. На 1990 г. средний возраст типажной номенклатуры составляет 7,5 лет. Для вновь вводимых в Типаж станков взамен снимаемых с производства рекомендуется коэффициент повышения производительности $K = 1,5 \dots 2$.

Производством типажного оборудования в нашей стране занято около 100 специализированных станкозаводов и станкостроительных производств крупных машиностроительных заводов. Проектированием таких станков занято более 40 специальных конструкторских бюро и институтов.

В табл. 1.2 приведены объем производства, экспорт и импорт стран — наиболее значительных мировых производителей металлообрабатывающих станков.

1.2. Основные направления развития современных станков и станочных систем

Организационно-экономические и технологические условия использования металлорежущих станков (МС) и станочных систем (СС) у потребителей очень разнообразны. Однако все многообразие потребительских свойств сводится к четырем обобщающим показателям, инвариантным для любого производства: производительность, точность, переналаживаемость (технологический диапазон использования), надежность.

Эффективность современных МС и СС при их высокой стоимости может быть обеспечена только в условиях интенсивной эксплуатации с максимальным использованием фонда рабочего времени. При встраивании станка в автоматизированную систему необходимым условием повышения эффективности станка является его работа в непрерывном режиме с минимальным участием человека. Все четыре основных показателя потребительских свойств связаны между собой конструкцией, технологией, а также организацией и экономикой.

Увеличение производительности — главная задача при создании любых МС и СС. Оно

оценивается сокращением штучного времени $t_{шт}$ для конкретных изделий и операций применительно к специальным и специализированным станкам, и для типового набора изделий и операций — для универсальных станков.

Штучное время $t_{шт} = t_{оп} + t_{об}$. Здесь $t_{оп} = t_o + t_v$ — оперативное время, где t_o — основное время, затрачиваемое на непосредственное выполнение технологических операций; t_v — вспомогательное время, затрачиваемое на установку и снятие заготовки, выполнение вспомогательных движений рабочих органов станка; $t_{об}$ — время обслуживания станка.

Доля каждой составляющей штучного времени колеблется в очень широких пределах в зависимости от вида изделий, серийности, масштабов производства и других производственных условий.

Общая закономерность в машиностроении и приборостроении заключается в резком снижении доли основного времени t_o в оперативном времени $t_{оп}$, а в единичном и мелкосерийном производстве — даже сокращении общей доли $t_{оп}$ в $t_{шт}$. Только в тяжелом машиностроении на ряде операций $t_o = 0,5 t_{оп}$. В общем же машиностроении и приборостроении $t_o = (0,05 \dots 0,25) t_{оп}$.

Автоматизация МС является одним из главных средств сокращения $t_{шт}$. Наиболее эффективным и универсальным методом служит использование ЧПУ. На рис. 1.2 показано, что самую широкую зону автоматизации МС охватывают станки с ЧПУ и ГПМ. Статистика последних лет по большинству машиностроительных производств в различных отраслях показывает, что использование МС с ЧПУ взамен станков с ручным управлением дает устойчивое двух-четырёхкратное повышение производительности труда вследствие сокращения t_v , $t_{об}$ и частично t_o за счет повышения частоты n вращения шпинделя и подачи S во время резания, а также некоторого сокращения пути перемещения инструмента, но без осуществления резания на рабочей подаче. Сокращение t_v достигается в основном использованием автооператоров и роботов-загрузчиков, применением палет для многоцелевых и тяжелых станков, включая и карусельные, с автоматической сменой палет.

Примером автоматизации изготовления деталей типа «диск» является ГПМ на базе токарного фронтального двухшпиндельного станка, мостового робота и транспортно-накопительного устройства ТНУ (рис. 1.5). При оснащении такого ГПМ устройствами для смены инструментов и зажимных элементов (или патронов), а также для закрепления заготовок значение $t_{шт}$ при полной двусторонней обработке, включающей токарные, фрезер-

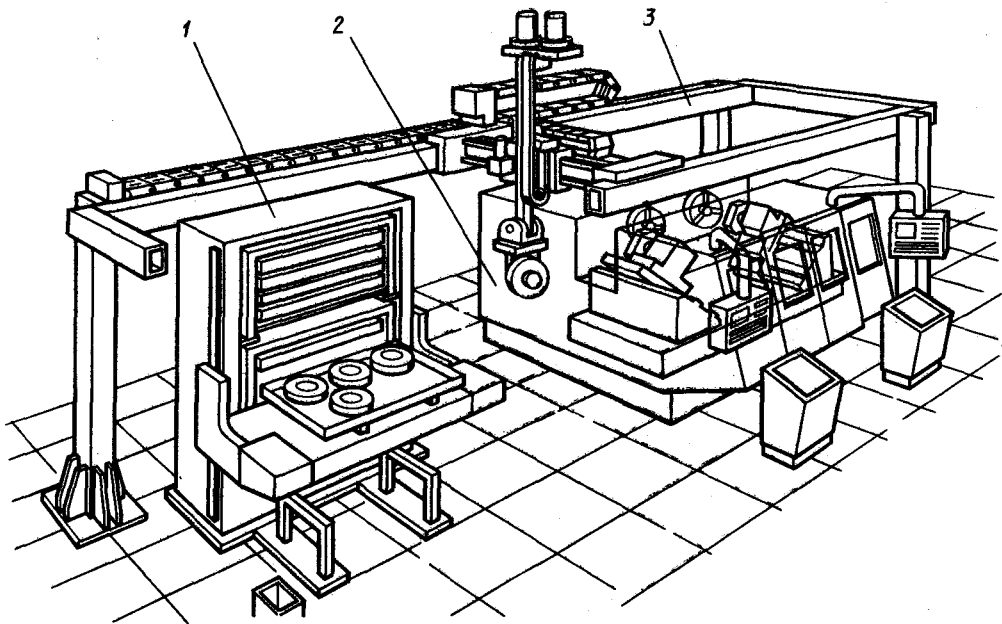


Рис. 1.5. Гибкий производственный модуль МПО «Робот»:
1 — транспортно-накопительное устройство ТНУ-1; 2 — станок 1722ПФ30; 3 — робот М20К

ные, сверлильные и резбонарезные операции, сводится к минимуму.

Концентрация операций на одном станке — одно из самых эффективных решений, существенно уменьшающее как $t_{оп}$, так и $t_{п.з.}$. Идеальным решением является обработка заготовки с пяти сторон при одном установе и со всех сторон — при перехвате заготовки за обработанные поверхности на том же станке. Примером такой комплексной обработки может

служить система «Power» фирмы Wohlenberg (ФРГ) (рис. 1.6). На одном универсальном многоцелевом станке за один установ сложной многопрофильной заготовки производятся самые разнообразные операции — от точения и

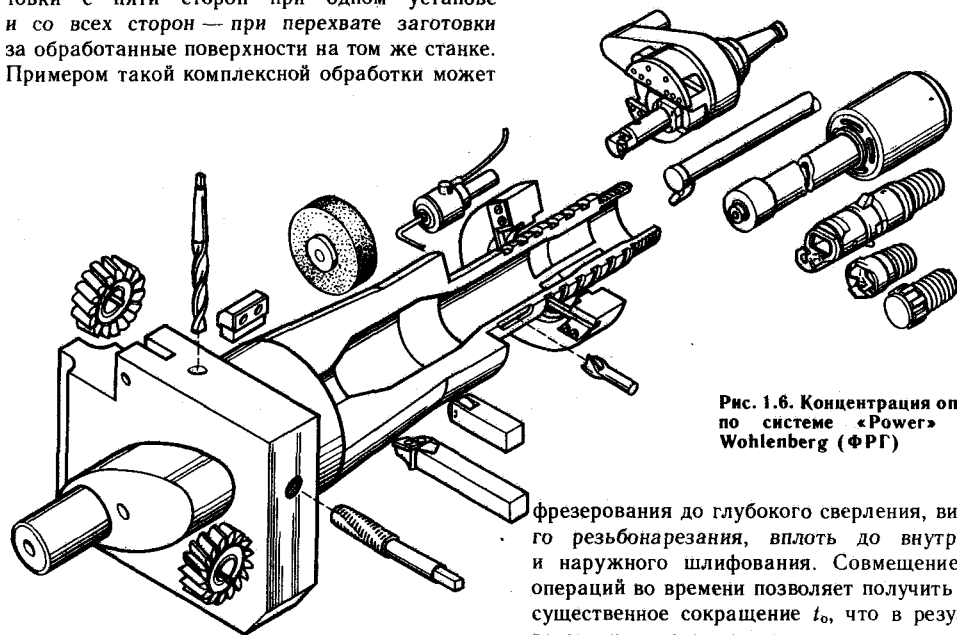


Рис. 1.6. Концентрация операций по системе «Power» фирмы Wohlenberg (ФРГ)

фрезерования до глубокого сверления, вихревого резбонарезания, вплоть до внутреннего и наружного шлифования. Совмещение ряда операций во времени позволяет получить также существенное сокращение t_0 , что в результате ведет к многократному сокращению всего

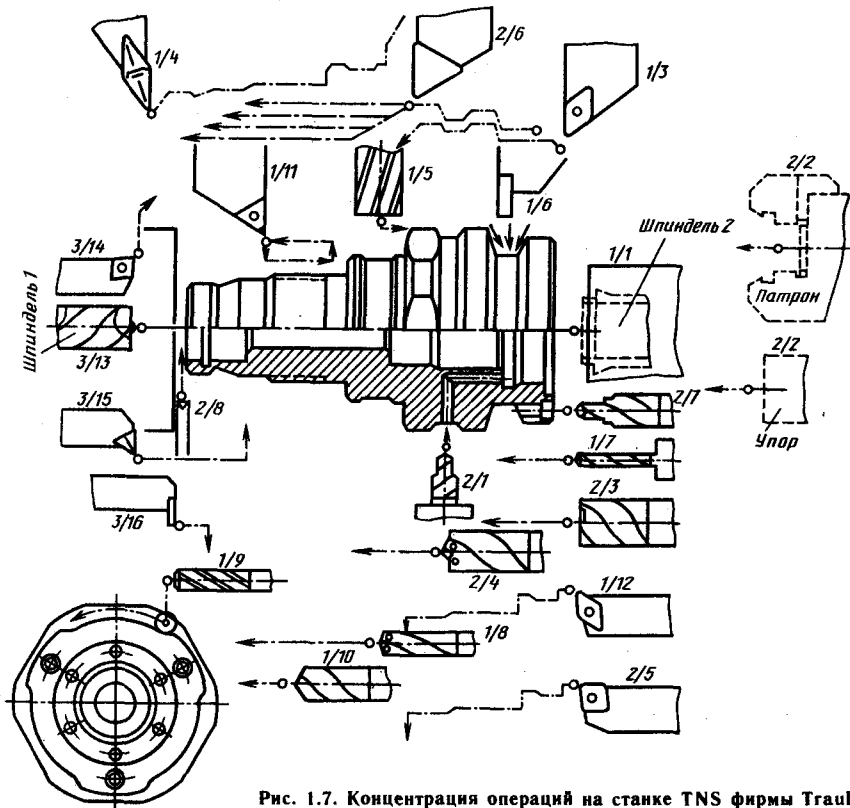


Рис. 1.7. Концентрация операций на станке TNS фирмы Traub (ФРГ)

производственного цикла изготовления крупных деталей, создавая экономию в производственных площадях и капитальных вложениях.

Пример концентрации операций при изготовлении сложной многоэлементной (50 элементов) детали небольших размеров на одном токарном станке показан на рис. 1.7. Обработка производится на токарном многоцелевом станке модели «TNS-65» фирмы Traub (ФРГ), имеющем три револьверные головки с 24 инструментами, причем 14 из них могут вращаться. Станок имеет два соосных шпинделя, которые могут работать синхронно, причем оба могут выполнять обработку и автономно.

При концентрации операций на одном станке совмещение операций, переходов во времени, использование комбинированных инструментов и многоинструментных наладок дает существенное увеличение производительности при одновременном повышении качества обработки.

Увеличение параметров режима обработки — основной источник сокращения t_0 , который может дать эффект только при существенной доле t_0 в $t_{шт.}$. Это достигается использованием новых высокоэффективных режущих инструментов на основе синтетических сверх-

твердых материалов (СТМ), режущей керамики, многокомпонентных твердых сплавов и порошковых высоколегированных быстрорежущих сталей, а также благодаря использованию высокоэффективных износостойких покрытий. Задача значительного повышения скорости v_p резания и подачи S требует соответствующего роста частоты n вращения шпинделей станков и скорости перемещения подвижных узлов, реализующих движения подачи суппортов, шпинделей и т. д.

В табл. 1.3 даны значения оптимальных скоростей резания при точении и фрезеровании различных материалов при применении инструментов из СТМ.

Скорость v_p обычно назначают исходя из условий экономической стойкости инструментов $T_n = 60$ мин. Однако в результате резкого роста стоимости высокосложных автоматических МС и СС определяющим критерием все чаще становится стоимость станкоминуты, поскольку доля стоимости инструментов в себестоимости изготовления детали большей частью невелика (0,3—1,5 %).

При быстрых темпах автоматической смены инструментов ($t = 5...10$ с) и использовании

1.3. Скорости резания инструментами из СТМ

| Обрабатываемый материал, его твердость | Режущий материал* | Вид обработки | Скорость резания v_p , м/мин |
|---|-------------------|--|--------------------------------|
| Серый чугун, 160—270 НВ Закаленный серый и отбеленный чугун, 60 HRC ₃ Закаленная сталь, 45—65 HRC ₃ Закаленная сталь, 45—65 HRC ₃ Алюминиево-кремниевые сплавы | ПКНБ | Точение | 800—400 |
| | » | Торцовое фрезерование | 200—300 |
| | » | Точение | 200—50 |
| | » | Торцовое фрезерование | 250—150 |
| Бронзы, латуни Алюминиево-кремниевые сплавы | ПКА | Точение | 100—1200 |
| | » | » | 60—1000 |
| | » | Фрезерование высокоточными торцовыми фрезами | 300—3000 |
| Нетермообработанные чугуны Алюминиево-кремниевые сплавы Цветные сплавы Алюминиево-кремниевые сплавы, бронзы, латуни | ПКНБ | Точение | 800—2000 |
| | ПКА | Сверление | 100—800 |
| | » | » | 60—600 |
| | » | Резка пилами | 100—400 |

О обозначения: ПКНБ — поликристаллический нитрид бора; ПКА — поликристаллические алмазы.

сменных многогранных режущих пластин (МРП) гораздо эффективнее повышать v_p , допуская понижение T_n . При этом вместимость инструментальных магазинов должна быть рассчитана на соответствующий запас (кратность) каждого типоразмера инструментов.

Для обеспечения возможности увеличения режимов обработки и совмещения операций станок должен иметь большую мощность привода главного движения при широком регулировании частоты вращения во время рабочего цикла.

Автоматический контроль обработанных заготовок не только способствует повышению их качества, но и обеспечивает сокращение t_b и соответственно увеличение производительности МС и СС.

Контроль может подвергаться как обработанное изделие, так и инструмент и станок. Так, одним из решений является активный контроль непосредственно по ходу обработки в сочетании со статистическим поднадзчиком, т. е. таким, который вырабатывает и реализует управляющее воздействие в зависимости от накопленных результатов предшествующего контроля и алгоритма прогноза хода последующей обработки.

Точность станков является одним из основных показателей их качества. Стремительное совершенствование техники, повышение мощности, быстроходности и точности машин, аппаратов, приборов наряду с ростом их надежности требуют опережающего повышения точности МС. Для потребителя точность МС выражается в их способности обеспечить у готового изделия заданные точность размеров, формы и взаимного положения обработанных поверхностей, их волнистость и шероховатость, а так-

же стабильность этих показателей в заданных пределах.

В международной практике при определении точности МС руководствуются стандартами ISO. В нашей стране руководствуются ГОСТ 25443-82Е, ГОСТ 8—82Е, ГОСТ 22267—76, ГОСТ 27843—88 и др. (см. подразд. 17.1).

Традиционно точность МС обеспечивалась соответствующей точностью изготовления его основных деталей, точностью сборки и регулировки, а также жесткостью элементов, износостойкостью опор и направляющих, стабильностью формы и размеров базовых и корпусных деталей. Кроме того, для повышения точности станков целесообразно использовать специальные устройства и системы для компенсации систематических погрешностей в конкретном экземпляре МС или для управления точностью обработки. В этих системах используют устройства микропроцессорного управления и высокоточные датчики линейных и угловых перемещений, температуры, тензометрические преобразователи и другие элементы автоматики. В табл. 1.4—1.6 приведены достигнутые

1.4. Параметры точности опор шпинделей прецизионных станков

| Опоры шпинделя | Биение, мкм, не более | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| | достигнутое | перспективное |
| Подшипники качения | 0,6—1,0 | 0,2—0,5 |
| Гидростатические подшипники | 0,2—0,4 | До 0,1 |
| Аэростатические подшипники | 0,1—0,2 | 0,05—0,1 |

1.5. Параметры точности направляющих прямолинейного движения прецизионных станков

| Направляющие | Погрешность траектории, мкм | | | | Погрешность позиционирования, мкм | | | |
|-------------------|-----------------------------|---------|---------------|---------|-----------------------------------|---------|---------------|---------|
| | достигнутая | | перспективная | | достигнутая | | перспективная | |
| | у станков | | | | у станков | | | |
| | средних | тяжелых | средних | тяжелых | средних | тяжелых | средних | тяжелых |
| Смешанного трения | 1—2 | 10 | 1 | 5 | 1 | 10 | 0,5—0,8 | 5 |
| Качения | 1—2 | — | 1 | — | 1 | — | 0,5—0,8 | — |
| Гидростатические | 1—2 | 5—10 | До 1 | До 5 | 0,5 | До 5 | 0,1—0,3 | До 1 |
| Аэростатические | 0,5—1 | — | 0,2—0,5 | — | 0,5 | — | 0,1—0,3 | — |

современные и перспективные показатели точности движения формообразующих узлов МС.

Можно выделить следующие методы повышения точности станков:

использование датчиков линейных и угловых перемещений с высокой разрешающей способностью в режиме обратной связи с приводом перемещений через микропроцессорную управляющую систему. Наряду с индуктивными наблюдается тенденция в большей мере использовать оптоэлектронные, голографические и лазерные системы, а также системы на приборах с зарядовой связью. Достижимая точность позиционирования ± 1 мкм или ± 2 мкм. В отдельных случаях точность может быть повышена до $\pm 0,05$ мкм;

аттестация действительных перемещений исполнительных органов МС с помощью высокоточных компараторов (например, лазерных) с записью в памяти микропроцессорной системы управления и последующей их компенсацией в рабочем процессе;

активный контроль погрешностей готовых изделий с автоматической подналадкой станка;

1.6. Параметры точности направляющих кругового движения прецизионных станков

| Направляющие | Диаметр планшайбы, мм | Радиальное и торцовое биение, не более, мкм | |
|-------------------|-----------------------|---|---------------|
| | | достигнутое | перспективное |
| Качения | До 1600 | 5 | 3 |
| | До 3000 | — | 3 |
| | Св. 3000 | — | 5 |
| Гидростатические | До 1600 | 2 | 1 |
| | До 3000 | 2—3 | 1—2 |
| | Св. 3000 | 8—10 | 3—5 |
| Смешанного трения | До 1600 | 5 | 2 |
| | До 3000 | 8 | 3 |
| | Св. 3000 | 10 | 5 |
| Аэростатические | До 1600 | 0,2—0,5 | 0,1—0,2 |

снижение влияния температурных деформаций на погрешность обработки (доля температурных деформаций в общем балансе точности для высокоточных МС может достигать 70 %);

использование инструментальных материалов, обеспечивающих малый размерный износ (СТМ, РК; с высокоизносостойкими покрытиями);

использование эффективных СОЖ и применение систем с большим расходом жидкости при тщательной многоступенчатой ее очистке и тонкой фильтрации.

Организационный принцип эксплуатации высокоточных станков заключается в размещении их в термоконстантных помещениях с уменьшенным температурным влиянием.

Переналаживаемость станков является одним из главных потребительских свойств МС и СС и заключается в возможности их переналаживания на изготовление различных изделий или для выполнения разных операций применительно к конкретным требованиям постоянно меняющейся производственной ситуации у потребителей при серийном производстве. С этим свойством современных МС и СС, часто определяемым как гибкость, связаны основные показатели эффективности парка МС и СС. Основные методы повышения гибкости следующие:

агрегатирование конструкций, блочно-модульное их построение на основе унифицированных типажных гамм, использование унифицированных узлов и элементов для дополнительного оснащения станков в расчете на конкретного потребителя взамен штатных узлов или в дополнение к ним. Обычно это универсальные инструментальные головки, столы, бабки, копировальные устройства и прочие узлы, позволяющие использовать один и тот же станок в разнообразных технологических вариантах. Примером комплексного решения такого рода является показанный на рис. 1.8 ГПМ;

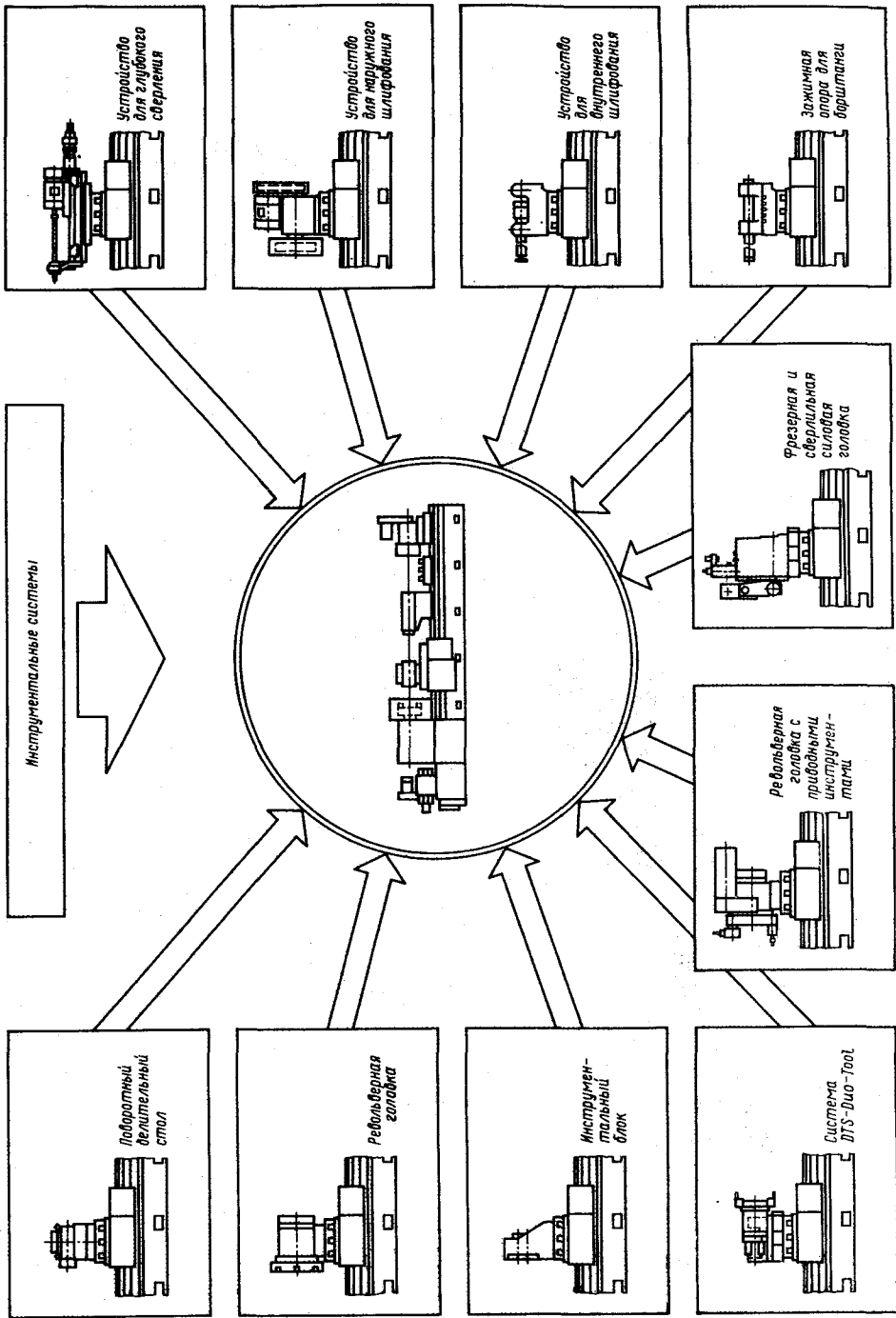


Рис. 1.8. Гибкий производственный модуль «VDF POWER Center PC»

для расширения возможностей использования ГПМ сверлильно-фрезерно-расточной группы в крупносерийном производстве их все чаще выполняют в виде блок-центров, т. е. снабжают двумя системами магазинов, т. е. из которых помещены индивидуальные инструменты, а в другой — сменные многоинструментальные головки;

оснащение широким набором разнообразных приспособлений, расширяющих возможности станков. Это, например, накладные инструментальные головки, многошпиндельные сверлильные и резьбонарезные головки, быстросверлильные головки, программно-управляемые планшуппорты, специальные зажимные устройства. Обычно предусматривается возможность включения их в гидравлическую электрическую и программно-управляющую системы станка; использование локальных кинематических цепей в системе микропроцессорного управления, что дает широкую возможность построения многовариантных переналаживаемых МС и СС большой гибкости;

использование систем ЧПУ и программируемых командоаппаратов (ПК), что создает хорошие предпосылки для расширения технологического диапазона МС и СС.

Надежность станков. Для современных МС и СС надежность является необходимым условием их использования. Это качество тем важнее, чем сложнее и дороже МС или СС (см. гл. 9).

Современные тенденции обеспечения высокой надежности МС и СС следующие:

использование высоконадежных комплектных систем ЧПУ, ПК и приводов. В отечественной практике наибольшую интенсивность отказов (до 60 %) имеют управляющие системы и привода;

органическое включение в управляющую систему подсистемы автоматической диагностики функционирования узлов, элементов, а также МС и СС в целом;

повышение надежности функционирования механических элементов МС и СС, прежде всего подшипниковых узлов, направляющих, делительных механизмов, передач. Широкое использование новых материалов, термообработки, покрытий. Применение устройств для защиты механизмов от стружки и СОЖ;

снижение динамических нагрузок за счет уменьшения перемещающихся масс, например, при использовании материалов с меньшими удельными массами, оптимизации законов движения рабочих органов станка, а также применения разнообразных демпферов;

обеспечение высокоэффективных и надежных систем смазывания трущихся пар, использование самосмазывающихся подшипников;

применение мощных эффективных систем

подачи, сепарирования и фильтрации СОЖ, служащих как для отвода теплоты из зоны резания, так и для смыва и транспортирования стружки;

блочно-модульное построение узлов, элементов и систем МС и СС;

использование развитой системы диагностики и индикации отказов, обеспечивающей существенное снижение времени профилактики и устранения отказов;

осуществление своевременных профилактических и регламентных работ по поддержанию нормального функционирования МС и СС; использование высококвалифицированного обслуживающего персонала.

Комплексная автоматизация. Характерной особенностью современного машиностроительного производства является использование станков в составе автоматизированных станочных систем. Это объясняет ряд конструктивных особенностей станков, так как необходимо обеспечить станок соответствующими интерфейсами для интегрирования его в станочную систему. Основной ячейкой ГПС является РТК или ГПМ. Классификация и определение ГПС предусмотрены ГОСТ 26228—90.

Схемы построения ГПС разнообразны. Они обычно включают: ГПМ в технологически необходимом наборе; транспортно-складскую систему АТСС; систему инструментального обеспечения АСИО; систему управления технологическим процессом АСУТП; систему управления производством АСУ.

В ГПС применяют систему мониторинга для контроля за работой инструмента и оборудования и за технологическим процессом в целом и осуществляя коррекцию, а иногда — и адаптивное регулирование работы оборудования и технологического процесса, автоматизированное программирование и диспетчирование. Наиболее высокоорганизованные ГПС снабжаются САПР.

Развитие ГПС заключается в совершенствовании их структур применительно к комплектности изготовления изделий, гибкости, набору и полноте выполняемых функций, а также в совершенствовании каждой из систем (АТСС, АСИО, АСУТП, АСУ и САПР) для повышения производительности, гибкости и надежности. Так, в АСИО используют автоматически сменяемые блочно-модульные инструменты, снабженные системой кодирования и декодирования с записью в микропроцессорной системе управления и учетом как общей наработки каждого инструмента, так и фактического его износа.

По данным Европейской Экономической комиссии ООН, ГПС обеспечивают следующие усредненные показатели: увеличение полезного времени работы по сравнению с универ-

сальным оборудованием при двухсменной работе до 60 %, экономию затрат на рабочую силу на 30 %, сокращение незавершенного производства на 60 %. На высококоразвитых ГПС для изготовления узлов и комплектных деталей может быть получен гораздо больший эффект, в том числе сокращение числа работающих в 3,5—5 раз.

В 1990 г. по различным оценкам в мире действовало примерно 2000 ГПС. По прогнозам, к 2000 г. 15—20 % выпускаемых в мире станков будут объединяться в разнообразные ГПС.

Автоматические линии наиболее перспективны в массовом производстве, выпускающем до 25 % мировой машиностроительной продукции. Парк станочных АЛ в СССР насчитывал к 1990 г. примерно 12 000 единиц. Выпуск единицы продукции на АЛ занимает примерно в 100 раз меньше времени, чем при изготовлении ее на универсальных станках с ручным управлением. Усредненный годовой экономический эффект АЛ приведен в табл. 1.7.

Одним из основных направлений технического развития АЛ является повышение комплексности обработки изделий, включая термообработку, сборку, окраску и упаковку готового изделия. АЛ с комплексной обработкой создают главным образом для производства основных видов массовых изделий машиностроения, таких как подшипники, поршневые кольца, гильзы, коленчатые валы, распределительные валы, зубчатые колеса и т. п., по типовым технологическим процессам на основе типовых комплектов оборудования.

Особое значение имеет создание переналаживаемых и ГАЛ, обеспечивающих возможность частой смены объектов производства. При разработке ГАЛ желательно обеспечить возможно более подробную информацию о прогнозируемых вариантах изменения параметров изделий.

Оптимальные годовые программы выпуска продукции на жестких АЛ для механической обработки составляют для корпусных деталей из сталей 100—150 тыс. единиц, из чугунов — 200—250 тыс. единиц, из алюминиевых сплавов — до 500 тыс. единиц. Для ГАЛ, выпускающих корпусные детали, программа сокращается до 20—60 тыс. единиц с номенклатурой до 10 деталей. Доля ГАЛ в общем выпуске АЛ к 2000 г. должна возрасти до 30—35 %. Эффективные технические решения, обеспечивающие гибкость АЛ, следующие:

компоновки ГАЛ на основе станков с ЧПУ и промышленных роботов, соединенных перестраиваемыми АТСС;

поочередная автоматическая подача одно- и многошпиндельных инструментальных коробок, закрепление и снятие их с силового узла

1.7. Годовой экономический эффект АЛ

| Параметр | АЛ для изготовления | |
|--|---------------------|-----------------------------|
| | корпусных деталей* | деталей типа тел вращения** |
| Стоимость АЛ, тыс. руб. | 600 | 500 |
| Экономический эффект, тыс. руб. | 300 | 108 |
| Высвобождение обслуживающего персонала при двухсменной работе, чел | 15 | 13 |

*АЛ из шести станков
**АЛ из пяти станков

при неподвижных заготовках корпусных деталей;

включение в АЛ унифицированных узлов, оснащенных системами ЧПУ и обладающих возможностью дополнительно к направлению подачи автоматически перемещать инструменты по нескольким координатам.

Автоматические роторные (АРЛ) и роторно-конвейерные линии (АРКЛ) являются одним из эффективных средств автоматизации массового производства.

В настоящее время АРЛ применяются преимущественно для обработки давлением, формования, литья, сборки. Они могут быть применены в ряде случаев и для обработки изделий резанием, преимущественно тел вращения, с точностью до качества Н11. Использование групповых методов обработки в АРКЛ позволяет применять эти линии в серийном производстве. АРЛ и АРКЛ по сравнению с операционным оборудованием имеют производительность выше в 4—10 раз, занимаемые площади меньше в 2—3 раза, и производственный цикл сокращается в 10—20 раз.

Существенный прогресс в технике и технологии машиностроения в сочетании с высокими достижениями в области систем управления позволяют перейти от создания отдельных ГПС к созданию комплексно автоматизированных и компьютеризированных производств и заводов-автоматов. Основными компонентами такого производства являются высокоэффективное, гибкое и надежное технологическое оборудование и развитые вычислительные средства. Особые требования к оборудованию таких производств — концентрация операций и комплексность обработки. Так, в станки встраивают системы для лазерной термообработки, пайки, сварки, пластического деформирования.

Список литературы

1. **Гибкие** производственные системы развитых капиталистических стран. М.: Минстанкопром, ВНИИТЭМР, 1987. 179 с.
2. **Прогрессивное** металлорежущее оборудование: Каталог. М.: Минстанкопром, ВНИИТЭМР, 1988. 50 с.
3. **Типаж** комплектов оборудования для изготовления машиностроительных деталей на 1991—1995 гг. М.: Минстанкопром, ЭНИМС—ВНИИТЭМР, 1987. 62 с.
4. **Типаж** металлорежущих станков на 1991—1995 гг. М.: Минстанкопром, ЭНИМС—ВНИИТЭМР, 1989. 62 с.
5. **The economic handbook of the machine tool industry.** NMTBA. USA, 1988—1989. 170 p.

Станок и его технические показатели

2.1. Станок как основной компонент технологической системы

Металлорежущий станок (станок) — это технологическая машина, предназначенная для размерной обработки заготовок главным образом снятием стружки режущим инструментом.

Используют также специальные методы обработки — электрофизические, электрохимические, лазерным лучом, пластическим деформированием и операции, связанные с измерением или контролем обрабатываемых деталей, а в ряде случаев и с их сборкой.

Материал обрабатываемых деталей — это в основном различные металлы и сплавы, а также пластмассовые, керамические, спеченные, углеродистые и другие твердые материалы, применяемые для деталей машин. Поэтому термин «металлорежущий» является в известной степени условным.

Станок является основным компонентом технологической системы, предназначенной для механической обработки, в которую входят также режущий инструмент, заготовка, исполнитель (оператор) и другие составляющие, в совокупности обеспечивающие заданный технологический процесс обработки.

Технологическая система — это совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций (ГОСТ 27.004—85).

Основное требование, предъявляемое к технологической системе, — обеспечение требуемой точности обработанной детали (включая точность размеров, формы и взаимного расположения обработанных поверхностей, их волнистость и шероховатость). Точность обработки зависит от всех компонентов технологической системы (рис. 2.1). Основное требование к станку — обеспечить точность перемещения формообразующих узлов (см. п. 2.2). К остальным компонентам технологической системы предъявляют следующие требования.

Режущий инструмент при обработке резанием образует поверхности заданной формы и работает в напряженном термодинамическом режиме. Основное требование к нему — точность режущих лезвий и прилегающих поверхностей резания. Свой вклад в образование погрешностей обработки инструмент вносит из-за отклонения начальной конфигурации режущей части инструмента от идеальной (заданной) и, главное, в результате ее изменения при изнашивании. К характеристикам точности режущих лезвий относится также их положение в пространстве, которое может изменяться при деформации инструмента.

Приспособление должно обеспечить заданную точность положения инструмента или заготовки. Деформация и изнашивание зажимных элементов приспособления, посадочных, установочных и направляющих поверхностей изменяют начальные характеристики точности приспособления и увеличивают с течением времени соответствующую составляющую суммарной погрешности обработки.

Заготовка должна иметь заданные точность формы и стабильность свойств материала. Неравномерный припуск, деформация заготовки, неравномерное распределение твердости, технологические дефекты материала, изменения в поверхностном слое, возникающие в процессе резания, и другие характеристики точности формы и стабильности свойств являются ее выходными параметрами в общей схеме формирования точности обработанной детали.

Измерительные средства необходимо учитывать как самостоятельный компонент технологической системы при активном контроле, когда они выделены в отдельный комплекс. Погрешности измерения отразятся на достижении требуемой точности обработки. Следует иметь в виду, что характеристики измерительных средств, являющихся элементом системы управления или контроля металлорежущего станка (например, датчики обратной связи в станках с программным управлением), учитывают при оценке выходных параметров станка.

Оператор (станочник), который участвует в осуществлении технологического процесса, так-

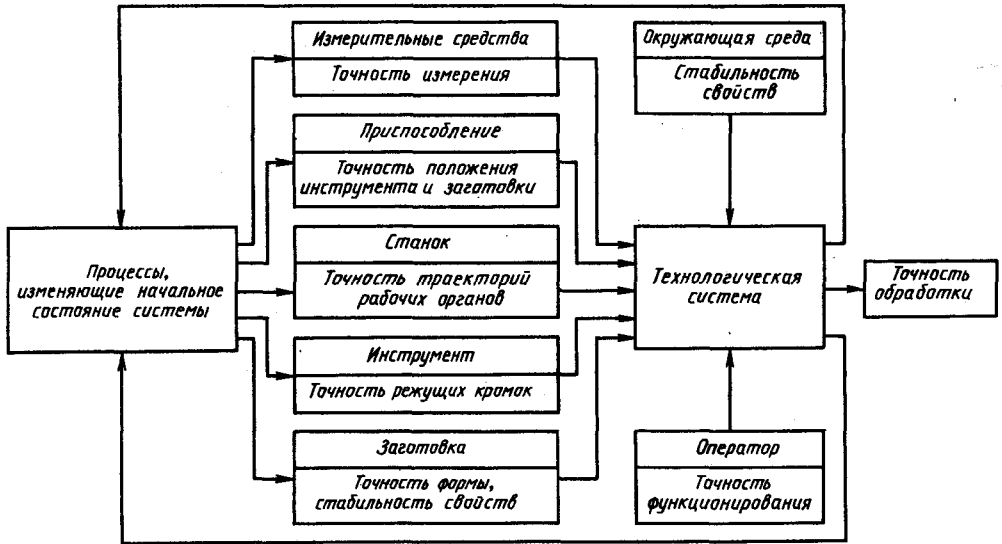


Рис. 2.1. Компоненты технологической системы

же может вносить погрешности в точность обработки или, наоборот, способствовать достижению более высокой точности. Здесь имеет место реализация взаимодействий сложной системы человек — машина.

Окружающая среда — элемент технологической системы, в условиях которой функционируют все компоненты. Поэтому стабильность

ее свойств и, в первую очередь, требования к температуре, запыленности, влажности, наличию вибрационных воздействий должны быть регламентированы, а также оценено их влияние на точность обработки. Это относится и к технологическим средам, например к СОЖ.

Станок, его технический уровень и совершенство узлов и механизмов определяют

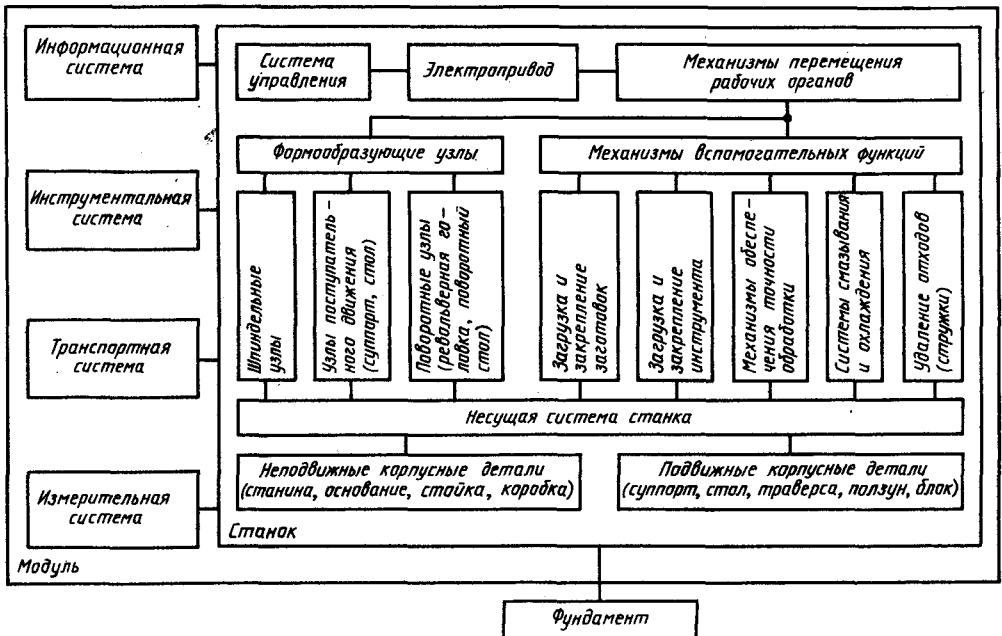


Рис. 2.2. Структурная схема станка и станочного модуля

взаимодействие всех компонентов технологической системы. Конструкция и компоновка станков чрезвычайно разнообразны, однако все они содержат типовые системы, узлы, механизмы и элементы (рис. 2.2).

Узлы и механизмы целевого назначения либо могут образовывать самостоятельную конструктивную единицу (что является более желательным), либо создается система со многими функциями, где конструктивно объединены механизмы и элементы различного назначения.

Движение рабочих органов станка осуществляется от электропривода непосредственно или через механизмы (зубчатые передачи, кулачковые механизмы, гидро- и пневмопередачи и др.), а координация их движений (цикл станка) определяется механизмом управления.

Формообразующие узлы несут заготовку и инструмент, сообщая им заданное относительное движение для осуществления процесса формообразования обрабатываемых поверхностей.

Механизмы вспомогательных функций обеспечивают полный цикл обработки с необходимыми транспортными перемещениями заготовок, обработанных деталей и инструмента и выполнения действия, необходимые для достижения требуемого качества обработки.

Несущая система обеспечивает жесткое взаимное положение всех узлов станка и определяет его компоновку.

Система управления и уровень ее развития во многом определяют возможности станка по работе в автоматическом цикле, а также связи станка с другими автоматизированными технологическими машинами и системами, образующими современную высокоразвитую гибкую производственную систему (ГПС) или станочную автоматизированную систему данного назначения (автоматическую линию).

Станочный модуль — это одна из основных разновидностей гибкого производственного модуля. В него кроме станка входят системы и устройства, обеспечивающие функционирование модуля как единой технологической единицы, которую можно встраивать в более сложную производственную систему, например в ГПС. В ГПМ входят следующие системы и устройства, выполненные в виде самостоятельных конструктивных единиц.

Информационная система осуществляет связь системы управления станка с системой управления более высокого уровня, дает информацию о состоянии станка (диагностика), его производительности и точности изготовления деталей (по данным измерительной станции).

Инструментальная система (магазин) обеспечивает хранение и автоматическую смену инструмента и приспособлений при обработке

сложных заготовок одного или нескольких наименований.

Транспортная система, в которую могут входить роботы, манипуляторы, накопители, тактовые многопозиционные столы, конвейерные устройства и др., служит для транспортирования заготовок, готовых изделий, инструмента и приспособлений в соответствии с заданным технологическим циклом.

Измерительная (метрологическая) система (станция) осуществляет автоматизированный контроль обработанных изделий (наряду с встроенными в станок измерительными системами) и дает сигналы для управления ходом технологического процесса, его коррекции или прекращения с целью недопущения изготовления изделий, не отвечающих заданным техническим требованиям.

При всей важности перечисленных функций систем, составляющих станочный модуль, именно станок является той технологической машиной, которая в первую очередь определяет качество и эффективность процесса обработки.

Исполнительные движения в станке — это те движения инструмента и заготовки, которые необходимо производить для осуществления полного цикла обработки.

По целевому назначению их разделяют на следующие.

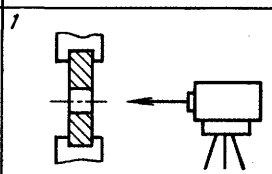
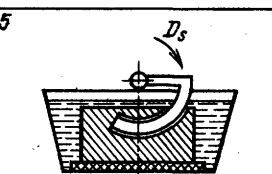
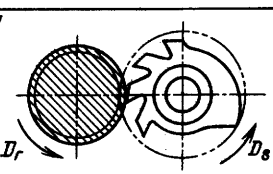
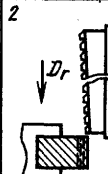
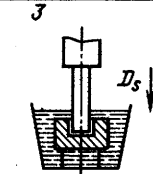
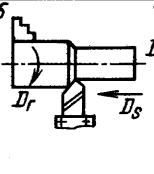
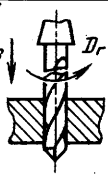
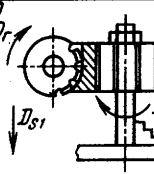
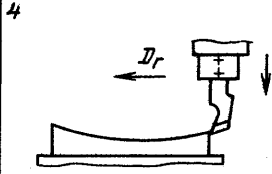
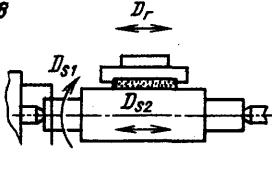
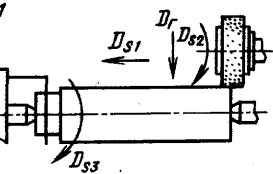
1. Движения формообразования связаны с непосредственным осуществлением процесса резания или другого вида обработки, когда происходит образование поверхности заданной формы. Схемы обработки и конструкция станка диктуют те относительные движения инструмента и заготовки, которые сообщаются формообразующим узлам станка [1].

При обработке резанием движение, при котором происходит снятие стружки, называют главным, его скорость, наибольшая в процессе обработки, — это скорость v , м/мин, главного движения резания D_r . Движение, определяющее возможность непрерывного врезания режущих лезвий инструмента в новые слои материала, называют движением подачи D_s (скорость подачи v_s , мм/мин, подача S , мм/об, мм/зуб, см. ГОСТ 25762—83).

Точность выполнения заданных движений формообразования определяется точностью станка как главного компонента технологической системы.

2. Установочные движения — это перемещение инструмента или заготовки в исходное положение, при котором может осуществляться процесс формообразования. К ним относятся: подвод инструмента в исходное положение для начала резания, движения позиционирования заготовки (например, перемещение в заданное положение стола координатно-расточного станка), делительные движения (напри-

2.1. Движения формообразования

| Поступательных | Вращательных | | |
|----------------|---|---|---|
| | Нет | Одно | Два |
| Нет | 1  | 5  | 9  |
| Одно | 2  3  | 6  7  | 10  |
| Два | 4  | 8  | 11  |

Примечания: 1 — обработка лучом лазера; 2 — протягивание поверхностей; 3 — ультразвуковая обработка; 4 — фасонное строгание; 5 — электроэрозионная обработка каналов; 6 — точение; 7 — сверление; 8 — суперфиниширование; 9 — протягивание; 10 — зубофрезерование; 11 — шлифование.

мер, поворот револьверной головки или шпиндельного блока).

Во время установочных движений процесс обработки не осуществляется, однако они, как правило, влияют на точность обработки, что связано с точностью перемещения и фиксации узла станка в заданном положении.

3. Вспомогательные движения — это необходимые транспортные перемещения заготовки и инструмента для осуществления на станке полного цикла обработки: установку, закрепление, освобождение и транспортирование заготовок и инструмента, удаление отходов (стружки), правку инструмента и др.

Эти движения прямо не связаны с процессами резания, и их влияние на точность обработки может быть либо косвенным (например, за счет динамических нагрузок при работе соответствующих механизмов), либо непосредственным (например, точность правки шлифовального круга).

Наибольшее влияние на конструкцию, компоновку и технические характеристики станка оказывают движения формообразования.

При работе станка в зависимости от схемы обработки инструменту и заготовке может быть сообщено до четырех формообразующих движений одновременно (табл. 2.1). Схемы реза-

ния как функция относительных движений инструмента и заготовки с учетом трансформации углов резания рассмотрены в [1].

Сравнительно редко применяют одно или два однотипных движения (два поступательных или два вращательных). Наиболее характерно сочетание поступательного и вращательного движений, а также схемы с тремя и более движениями. Чем больше формообразующих движений в станке, тем сложнее в общем случае обеспечить их заданное выполнение, т. е. получить высокие технические показатели станка с позиции точности. Однако разнообразие движений формообразующих узлов станка увеличивает его технологические возможности и универсальность. Выходные параметры станка, определяющие его технический уровень, в первую очередь связаны с теми формообразующими и установочными движениями, которые непосредственно влияют на точность обработки.

2.2. Выходные параметры станка по показателю точности

При оценке качества и технического уровня станка в первую очередь необходимо установить те выходные параметры, которые ха-

рактируют его точность. При этом точность обработанных на станке деталей не может быть выбрана в качестве такого параметра, так как она является результатом влияния всех компонентов технологической системы (инструмента, заготовки и др.). Поэтому при проектировании станка надо установить и регламентировать те параметры, которые определяют точность обработки и являются входными для технологической системы (см. рис. 2.1).

Качество станка зависит от того, с какой степенью точности выполняются заложенные в технологическом процессе обработки взаимные перемещения инструмента и заготовки при воздействии на станок всего комплекса силовых и тепловых факторов. Поэтому основными выходными параметрами станка как элемента технологической системы являются характеристики точности движения его формообразующих узлов.

Получать эти характеристики можно одним из следующих способов.

1. Оценивать те параметры траекторий формообразующих узлов станка, которые влияют на точность обработки. При этом траектории относятся к установочным базам станка, определяющим положение приспособления, заготовки или инструмента.

2. Оценивать суммарное влияние параметров траекторий рабочих органов станка на формирование так называемого «геометрического образа» обработанной детали, когда определены ее погрешности без учета влияния на точность других компонентов технологической системы.

Основная цель регламентации выходных параметров станка — создание такого технологического оборудования, погрешность работы которого находилась бы в течение всего периода эксплуатации в пределах, установленных технологом.

Траектории формообразующих узлов, параметры которых устанавливают в качестве выходных, относятся к специально выбранным *опорным точкам*, которые располагают на установочных базах станка, определяющих положение заготовки, приспособления или инструмента. Число опорных точек и их расположение связано с методом обработки, конструктивной схемой станка, характером движения его формообразующих органов и методом крепления заготовки и инструмента.

Поскольку положение твердого тела в пространстве определяют три фиксированные точки или параметры пространственного вектора, отнесенного к одной точке, то в общем виде необходимо установить шесть координат (например, три линейных и три угловых отклонения вектора данной точки от заданного положения). Однако при рассмотрении различных

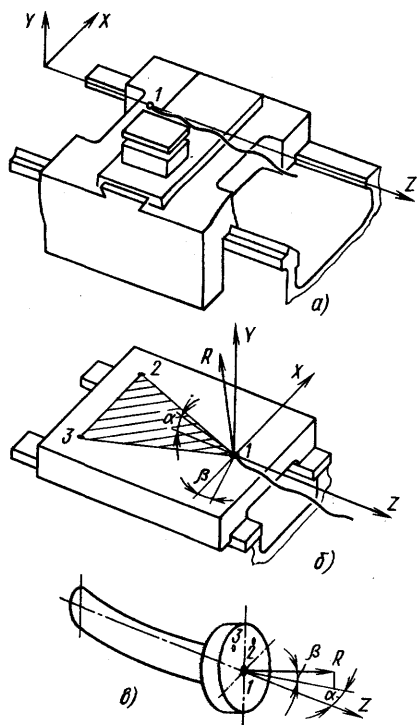


Рис. 2.3. Опорные точки формообразующих узлов станка:

а — суппорт; б — стол; в — шпиндель

конструкций формообразующих узлов станка число этих характеристик может быть уменьшено, если отдельные отклонения не оказывают существенного влияния (слагаемые второго порядка малости) на точность обработки.

На рис. 2.3 показаны типичные случаи выбора опорных точек. Для характеристики точностных параметров суппорта токарного станка достаточно одной опорной точки 1, совпадающей с вершиной резца (рис. 2.3, а), поскольку целью при создании конструкции суппорта является стремление к обеспечению прямолинейной траектории для инструмента, которая не изменяет своей формы и положения при силовых воздействиях и различных положениях инструмента в рабочем пространстве. Траектория данной опорной точки будет служить характеристикой возможностей суппорта по обработке заданной номенклатуры деталей с обеспечением точности размера, формы обработанной поверхности, волнистости, шероховатости и других показателей точности.

При движении стола с закрепленной на нем заготовкой (рис. 2.3, б) у фрезерных, расточных, шлифовальных и других станков необходимо оценить точность перемещения стола в

пространстве. Положение заготовки или приспособления для ее закрепления определяется положением в пространстве плоскости стола. Поэтому в общем случае должны быть установлены либо три опорные точки 1, 2, 3, траектории движения которых рассматривают, либо рассматривают вектор для одной из точек стола с характеристиками его положения в пространстве в каждой точке траектории (три линейных и три угловых отклонения от заданного положения при пространственном перемещении стола).

Для шпиндельного узла (рис. 2.3, в) точность его вращения и изменение положения оси шпинделя связаны с геометрической погрешностью элементов узла, с силовыми и тепловыми деформациями. Все это влияет на положение инструмента или заготовки, установленной в шпинделе с помощью приспособления (патрона, центра).

Когда положение патрона определяет плоскость переднего торца шпинделя, три фиксированные точки располагают на этой плоскости или, что более целесообразно, определяют для точки, находящейся в центре шпинделя, положение в пространстве вектора R , перпендикулярного к плоскости установочной базы. Характеристики траекторий опорных точек формообразующих узлов определяют ка-

чество станка с позиций возможного достижения точности обработки и его вклада в суммарную погрешность обработки [5].

При осуществлении на станке различных технологических процессов (в соответствии с его назначением и степенью универсальности) траектории опорных точек проявляются как случайные функции и образуют совокупности (ансамбли) траекторий. Такие совокупности могут иметь различный вид, характеризующий статистическую природу явлений (например, с сильным или слабым перемешиванием реализаций или с другими особенностями). На рис. 2.4 показаны типичные совокупности траекторий при поступательном движении рабочих органов станка (суппортов, столов, ползунов и др.).

Широкополосные ансамбли траекторий (рис. 2.4, а) характерны для случая, когда основное влияние на форму траектории и ее смещение по отношению к средней линии или к неподвижной оси координат оказывают внешние силовые воздействия. Узкополосные ансамбли траекторий (рис. 2.4, б) характерны при преобладающем влиянии геометрической погрешности направляющих, что и определяет форму кривой математического ожидания траекторий M_x . Дисперсия, связанная с силовыми воздействиями на узел, здесь играет второстепенную роль. Миграция совокупностей траекторий (рис. 2.4, в) вызвана, как правило, тепловыми деформациями узла.

Каждая реализация любой совокупности связана с параметрами точности той конкретной детали, которую при этом обрабатывали, а характеристики всего ансамбля влияют на точностные характеристики партии обработанных на станке деталей. Поэтому для каждой конкретной модели станка в зависимости от его назначения необходимо установить и регламентировать те параметры траекторий, которые определяют те или иные виды погрешностей, возникающие на обработанных поверхностях.

Как известно [6], погрешность обработки подразделяют на пять основных видов: погрешность размеров, отклонения расположения поверхностей, отклонения формы, отклонение параметров волнистости и шероховатости поверхности.

При назначении номенклатуры параметров траекторий рабочих органов станка учитывается их взаимосвязь с погрешностью обработки, которая зависит от метода обработки и кинематики процесса формообразования.

На рис. 2.5 показаны типичные траектории при поступательном движении формообразующего узла станка. Их параметры (X_1, X_2, \dots, X_n), определяющие соответствующую погрешность обработки, приведены в табл. 2.2. Эти параметры связаны с размером и формой обработанной поверхности, точностью взаим-

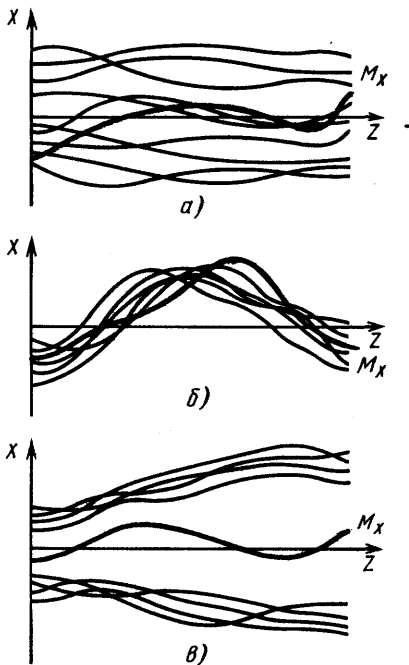


Рис. 2.4. Типичные ансамбли траекторий при поступательном движении рабочего органа станка

2.2. Выходные параметры станка по показателю точности

| Выходной параметр | Характеристика параметра траектории | Погрешность обработки |
|---|--|--|
| <i>Линейная траектория</i> | | |
| $X_1 = x_p$ | Размах траекторий | Отклонение от допуска на размер |
| $X_2 = \Delta x$ | Координата начала траектории | То же |
| $X_3 = \Delta z$ | Точность позиционирования | Отклонение от допуска на размер, погрешность положения |
| $X_4 = \operatorname{tg} \beta$ | Наклон траектории | Конусообразность, отклонение от параллельности |
| $X_5 = \operatorname{tga}$ | Наибольший наклон траектории | Отклонение формы (бочкообразность) |
| $X_6 = B$ | Шаг периодических волн | Волнистость |
| $X_7 = a$ | Амплитуда волн | » |
| $X_8 = a_w$ | Амплитуда высокочастотных составляющих | Отклонение от допуска на параметр шероховатости |
| $X_9 = t$ | Шаг высокочастотных составляющих | То же |
| <i>Круговая траектория</i> | | |
| $X_{10} = C_0$ | Смещение траекторий | Отклонение от допуска на радиальный размер |
| $X_{11} = C_1 \cos \varphi$ | Эксцентриситет вращения | Погрешность расположения |
| $X_{12} = C_2 \cos 2\varphi$ | Второй член разложения Фурье | Овальность |
| $X_{13} = C_3 \cos 3\varphi$ | Третий член разложения Фурье | Трехгранность |
| $X_{14} = C_k \cos k\varphi$ | k -й член разложения Фурье | k -гранность |
| $X_{15} = C_m \cos m\varphi$ | $m \gg k$ | Волнистость |
| $X_{16} = C_n \cos n\varphi$ | $n \gg m$ | Отклонение от допуска на параметр шероховатости |
| <i>Взаимное расположение траекторий</i> | | |
| $X_{17} = \Delta \beta \max$ | Отклонение от заданного взаимного положения | Погрешность взаимного расположения |
| $X_{18} = \Delta U$ | Отклонение от заданного передаточного отношения | Отклонение формы и погрешность расположения |
| X_{19} | Характеристика точности взаимного расположения формирующих узлов | То же |
| X_{20} | То же | » |

ного положения поверхностей, волнистостью и шероховатостью поверхности.

Для вращательного движения характерна передача погрешностей траектории опорной точки шпинделя (ее формы и высокочастотных составляющих) на обработанную поверхность цилиндрической детали (рис. 2.6).

Для периодических кривых разложение траектории в ряд Фурье позволяет выделить те параметры, которые определяют форму, волнистость и шероховатость обработанных поверхностей при токарной, расточной, шлифовальной и других операциях.

Анализ траекторий целесообразно осуществлять, рассматривая отклонение текущего радиуса R от номинального R_0 в полярной системе координат, и определять

$$\Delta R = R - R_0 = f(\varphi),$$

где $f(\varphi)$ — погрешность траектории в функции текущего угла φ .

Разложим данную функцию в ряд Фурье с ограниченным числом членов:

$$f(\varphi) = C_0 + \sum_{k=1}^{k=n} C_k \cos(k\varphi + \varphi_k), \quad (2.1)$$

где C_k — амплитуда k -гармоники; φ_k — начальная фаза; n — порядковый номер высшей гармоники полинома.

Согласно теории Фурье нулевой член C_0 разложения является средним значением функции $f(\varphi)$ за период 2π :

$$C_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) d\varphi = (\Delta R)_{cp}, \quad (2.2)$$

поэтому C_0 определяет значение погрешности размера.

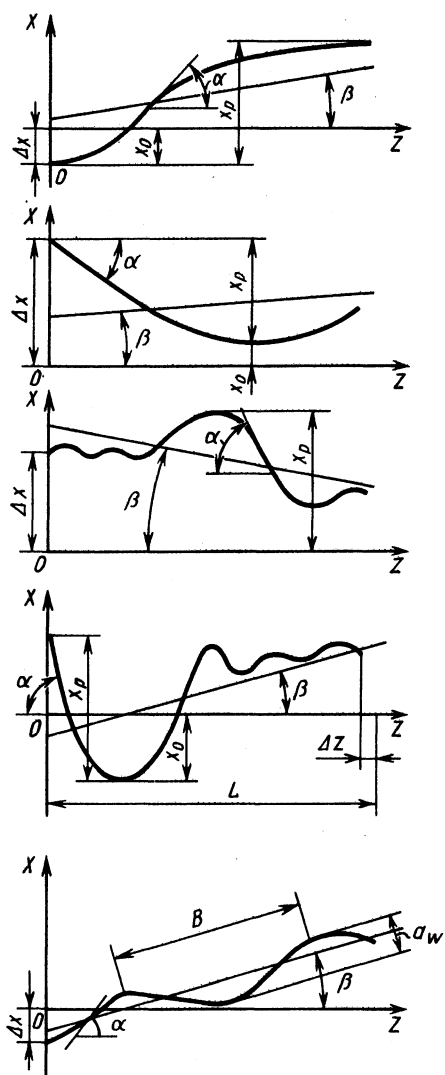


Рис. 2.5. Типичные виды реализаций траекторий при поступательном движении

Первый член разложения $C_1 \cos(\varphi + \varphi_1)$ выражает несовпадение центра вращения шпинделя в O' с геометрическим центром траекторий O , т. е. эксцентриситет $e = OO'$, что определяет погрешность в отклонении расположения обработанных цилиндрических поверхностей (рис. 2.6, б). Остальные члены ряда, начиная со второго, определяют характеристику формы, которую образуют траектории и которая непосредственно связана с формой обработанной детали (овальностью и огранкой).

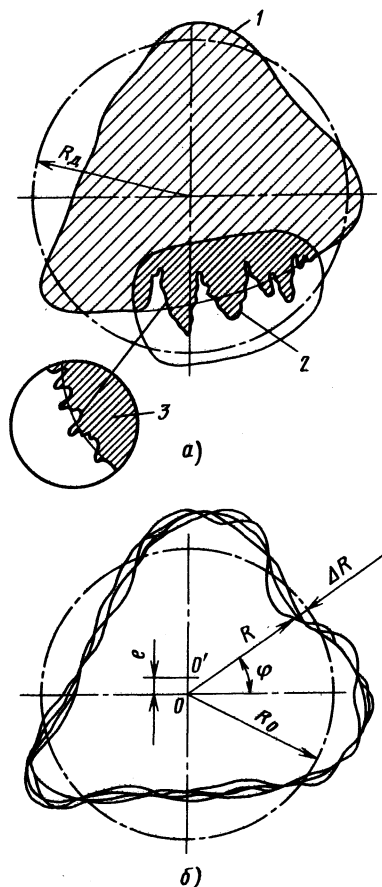


Рис. 2.6. Форма поперечного сечения обработанной цилиндрической поверхности (а) и траектория движения опорной точки шпинделя (б): 1 — форма поверхности; 2 — волнистость; 3 — шероховатость; R_d — номинальный радиус обработанной детали

При выборе номенклатуры выходных параметров данной модели станка и установлении их допустимых значений необходимо учитывать следующее.

1. Чем выше класс точности станка и требования к точности обработанных поверхностей, тем большее число назначают выходных параметров (характеристик траекторий формообразующих узлов) станка.

2. Допустимые значения выходных параметров станка составляют часть соответствующего допуска на изготовление детали, поскольку погрешность обработки зависит от всех компонентов технологической системы.

3. Расчет доли суммарной погрешности, приходящейся на станок и другие компонен-

ты технологической системы, осуществляется методами, применяемыми в технологии машиностроения для расчета точности обработки [5].

В первом приближении можно принимать допустимое значение для выходного параметра станка как долю от соответствующего допуска на точность изготовления детали, равную $k=0,4...0,8$, учитывая степень влияния других компонентов технологической системы и давая запас на возможное изменение параметров станка в процессе эксплуатации.

Для прецизионных станков значение k принимается большим, так как в этом случае станок играет основную роль в обеспечении точности обработки.

Точность является основным показателем станка, однако для оценки его технического уровня и полной характеристики его качества необходимо применять показатели, определяющие весь диапазон требований, предъявляемых к станку потребителем.

2.3. Показатели технического уровня станка

Основные принципы и порядок проведения оценки технического уровня продукции машиностроения определены ГОСТ 2.116—84 «Карта технического уровня и качества продукции» и отраслевыми методиками.

Технический уровень продукции машиностроения, в том числе станков, определяется как совокупность свойств конкретного изделия, включающих показатели функционального назначения, общественно полезного эффекта, уровня всех видов затрат, а также потребительских и экономических характеристик.

Совокупность свойств, достаточно полно характеризующая то или иное изделие и пригодная для сравнительной оценки изделий одного функционального назначения, определена укрупненно для групп однородной продукции государственными стандартами системы показателей качества продукции (СПКП).

ГОСТ 4.93—86 «СПКП. Станки металлообрабатывающие. Номенклатура показателей» устанавливает номенклатуру основных показателей, характеризующих технический уровень металлорежущих станков, в том числе с ЧПУ, электрорезонансных, электрохимических и ультразвуковых. Эти показатели включаются в ТЗ на НИР по определению перспектив развития этой продукции, в разрабатываемые и пересматриваемые стандарты, технические условия, по которым выпускают станки.

Стандартом предусмотрено применение восьми групп показателей. Каждая группа содержит, как правило, несколько показателей,

позволяющих количественно охарактеризовать те или иные свойства изделия, формирующие его технический уровень. Это позволяет получать сопоставимые результаты при сравнении технического уровня станков, сходных по технологическому назначению и области применения, а также формулировать конкретные задачи и направление работ по его целенаправленному повышению.

1. Показатели назначения характеризуют технологические возможности станка, приспособленность станка к обработке заготовок определенных размеров, массы; возможность применения на станке инструмента определенного размера; производительность обработки; точность обработки; энергопотребление; приспособленность к транспортированию и размещению; экономичность по расходу материала при производстве. Применяют следующие показатели назначения:

характеристики заготовки, обрабатываемой на станке (предельные размеры и масса устанавливаемой заготовки);

характеристики инструмента, устанавливаемого на станке (наибольшие размеры инструмента, наибольшая масса оправки в магазине, наличие накопителей инструмента);

характеристики рабочих и установочных перемещений (наибольшее перемещение рабочих органов, дискретность задания перемещений, точность позиционирования, количество управляемых осей координат, число одновременно управляемых осей координат);

характеристики основных и вспомогательных перемещений станка (пределы частот вращения, рабочих подач, скоростей установочных перемещений подвижных органов станка);

показатели силовой характеристики станка (наибольший крутящий момент на шпинделе, мощность привода главного движения, суммарная мощность установленных на станке электродвигателей);

габаритные размеры и масса станка;

показатели точности и шероховатости обработки изделия (образца);

показатель производительности (коэффициент повышения производительности относительно сравниваемой модели);

показатели технического совершенства, в том числе средства автоматизации (перечень); оснащенность станка дополнительными устройствами и приспособлениями, расширяющими технологические возможности (перечень); класс точности станка; время автоматической смены инструмента.

2. Показатели надежности характеризуют безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость станка, т. е. те свойства, от которых во многом зависит эффективность использования станка потребителем (см. гл. 9).

3. Показатели экономного использования материалов и электроэнергии характеризуют экономичность по расходу металла при производстве станков и экономичность по расходу электроэнергии при их эксплуатации. К этим показателям относятся удельная масса металла и удельный расход электроэнергии.

4. Эргономические показатели характеризуют соответствие станка физическим возможностям человека, приспособленность станка к условиям эксплуатации с учетом требований санитарных норм. К этим показателям относятся: уровень звука на рабочем месте; скорректированный уровень звуковой мощности.

5. Показатели технологичности характеризуют трудоемкость изготовления станка. В стандарте использован лишь один показатель: удельная трудоемкость изготовления станка (нормо-ч/ед. производительности).

6. Показатели стандартизации и унификации характеризуют ремонтпригодность станка и экономичность его изготовления, достигаемые за счет применения унифицированных узлов и деталей. Такими показателями являются: коэффициент применяемости по составным частям, %; коэффициент применяемости по стоимости, %.

7. Показатели патентно-правовые, к которым относятся: показатель патентной чистоты; показатель патентной защиты.

8. Показатели безопасности, характеризующие обеспечение защиты человека, находящегося в зоне возможной опасности.

Термины, применяемые в стандарте, и пояснение к ним, а также пояснения к определению показателей приведены в справочных приложениях к стандарту.

В зависимости от характера решаемой задачи сравнение станков одного технологического назначения и области применения можно проводить по любому из приведенных в стандарте показателей. Но для получения укрупненной комплексной сравнительной оценки станков ограничиваются применением основных показателей, к которым относятся показатели назначения, показатели надежности, показатели экономного использования материалов и электроэнергии.

Количественные значения показателей, которые невозможно получить непосредственным измерением, определяют по отраслевым методикам, разрабатываемым для групп однородной продукции. Так, коэффициент повышения производительности относительно сравниваемой модели определяют в соответствии с РД Н06-45 — 87 «Станки металлорежущие. Расчет производительности»; показатели надежности — по 2Н00-30—87 «Станки металлорежущие. Нормы надежности»; показатели точности — по РД 2Н72-8—87 «Оценка точности

металлорежущих станков»; удельные показатели металлоемкости и энергопотребления — по МУ РД 2Н06-34—87.

Применяемость приведенных в ГОСТ 4.93—86 показателей в различных нормативно-технических документах, сопровождающих этапы жизненного цикла изделия, также определена рассматриваемым стандартом.

Основную массу показателей используют на стадии разработки опытного образца изделия, а также в технических условиях, которые должны по возможности более полно информировать заказчика (покупателя) о потребительских свойствах станка.

В реальной работе может возникнуть потребность в использовании гораздо большего числа показателей, характеризующих те или иные свойства и особенности станка, представляющие интерес для конкретного потребителя. Чем полнее владеет разработчик информацией о потребностях различных групп потребителей, а также о продукции, составляющей или могущей составить конкуренцию на рынке, тем шире может быть круг показателей, которыми он будет пользоваться как при создании станка, так и в целях рекламы, необходимой для привлечения потребителя. Поэтому поиск таких показателей, определение их нормативных (внутризаводских) значений, разработка методов подтверждения (демонстрации) соответствия станка рекламируемой характеристике — одна из важнейших задач, решаемых при создании новой продукции.

Стандарты содержат, как правило, ограниченное число показателей, укрупненно характеризующих целую группу изделий без учета специфических особенностей конкретных типов оборудования. В стандарты на конкретные виды станков введено 12 показателей. К ним относятся:

предельные размеры устанавливаемой заготовки;

предельные размеры обрабатываемых поверхностей;

наибольшая масса устанавливаемой заготовки;

наибольшие размеры инструмента, устанавливаемого на станке;

наибольшее перемещение рабочих органов станка с инструментом или заготовкой;

дискретность задания перемещений (ограниченная применяемость);

точность позиционирования (ограниченная применяемость);

число управляемых осей координат (ограниченная применяемость);

число одновременно управляемых осей координат (ограниченная применяемость);

показатели точности и шероховатости обработки;

класс точности станка;
корректированный уровень звуковой мощности.

Таким образом, стандартизованы лишь показатели, обеспечивающие техническую совместимость и взаимозаменяемость станков в системах машин, создаваемых или комплектуемых для реализации того или иного технологического процесса, а также показатели, отражающие современные требования санитарных норм и техники безопасности.

Остальные показатели служат для того, чтобы как разработчик, так и потребитель имели некоторую общую базу для сопоставимой оценки аналогичного оборудования, предлагаемого разными изготовителями.

При разработке специальных станков, диапазон технологических возможностей которых более узок, чем универсальных станков, номенклатура показателей, характеризующая технический уровень станка и включаемая в НТД, может отличаться от стандартной.

2.4. Оценка технического уровня станков

Оценка технического уровня станков, так же как и любой другой продукции машиностроения, дана по ГОСТ 2.116—84 «Карта технического уровня и качества продукции».

Карту технического уровня и качества продукции (далее карта уровня) составляют на конкретную модель станка, разработка и постановка на производство которой осуществляется в соответствии с ГОСТ 15.001—88 «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения».

Карту уровня (КУ) применяют для оценки технического уровня и качества станка при определении целесообразности разработки и (или) постановки его на производство, снятия с производства или эксплуатации и государственной регистрации.

Машинно-ориентированный характер КУ позволяет формировать автоматизированные банки данных, содержащих информацию о техническом уровне разрабатываемого, выпускаемого и находящегося в эксплуатации оборудования. Эта информация, наряду с информацией о зарубежной технике, необходима как разработчику, так и потребителю станков. Формы карты уровня и правила их заполнения приведены в приложении к стандарту.

Если разрабатываемая группа станков образует типоразмерный (параметрический) ряд и планируется к выпуску по одному нормативно-техническому документу или входит в типоразмерный (параметрический) ряд, устанавливаемый стандартом (техническими условиями),

карту уровня составляют для типового представителя этого ряда.

Для разрабатываемой группы станков, не образующей типоразмерный (параметрический) ряд, но планируемой к выпуску по единой технологии и одному нормативно-техническому документу или входящей в группу, регламентированную стандартом (техническими условиями), также допускается составлять карту уровня для типового представителя этой группы.

В карту уровня включают номенклатуру показателей качества станков в соответствии с таблицами применяемости показателей, содержащимися в стандартах СПКП (см. п. 2.3).

Технический уровень определяется на основе сопоставительного анализа значений оценочных показателей образца продукции (станка) в сравнении с соответствующими достигнутыми показателями конкретных аналогов или их прогнозируемыми значениями, отражающими мировые достижения и тенденции развития.

Оценка технического уровня станка состоит в отнесении его к одной из категорий продукции:

П — продукция превосходит мировой уровень;

С — продукция соответствует мировому уровню;

У — продукция уступает мировому уровню.

Мировой технический уровень станка характеризуется базовыми образцами, которые в совокупности представляют передовые научно-технические достижения в развитии данного вида оборудования. В группу базовых образцов входят перспективные образцы, для которых прогнозируются значения показателей, и лучшие образцы (аналоги), реализуемые на мировом рынке.

Результаты оценки технического уровня станка используют при решении следующих задач:

обосновании требований, закладываемых в техническое задание на разработку станка; создании и постановке на производство нового или модернизированного станка;

обосновании целесообразности замены или снятия с производства станка;

вневедомственной экспертизе технического уровня станка;

проектировании технического перевооружения и развития производства;

формировании предложений по экспорту и импорту и др.

Установление номенклатуры показателей, используемых при оценке технического уровня станка, предусматривает выделение из показателей, указанных в соответствующем стандарте системы показателей качества продукции (СПКП), оценочных показателей, которые

характеризуют техническое совершенство станка. Для каждого такого показателя изменение его значений (при постоянных значениях остальных показателей) ведет к изменению технического уровня. Оценочные показатели используют непосредственно для сопоставления оцениваемого и базовых образцов.

При выборе номенклатуры оценочных показателей анализируют также классификационные показатели, которые характеризуют назначение и область применения. Эти показатели используют при формировании группы аналогов и непосредственно для сопоставительной оценки, как правило, не применяют. Каждая группа изделий характеризуется своей номенклатурой и диапазоном значений классификационных показателей (например, предельные размеры обрабатываемых на станках заготовок). В зависимости от целей оценки отдельные классификационные показатели могут быть использованы в качестве оценочных.

Технический уровень станка оценивают путем сопоставления значений его оценочных показателей с соответствующими показателями конкретных аналогов или их прогнозируемыми значениями, отражающими мировые достижения и тенденции развития в данном виде техники.

При оценке технического уровня станка на различных стадиях его жизненного цикла в качестве значений показателей аналога принимают:

на стадии проектирования — прогнозируемые разработчиками значения, характеризующие мировой уровень на момент постановки оцениваемого образца на производство;

на стадиях постановки образца на производство, серийного производства, эксплуатации — значения, полученные при реальных испытаниях образцов аналога или по имеющейся информации об этом аналоге.

Выбор аналогов, установление прогнозируемых значений показателей осуществляет разработчик.

Основным документом при выборе показателей продукции и их значений для сравнительной оценки является карта технического уровня и качества (ГОСТ 2.116—84).

Принятые для сравнения аналоги должны иметь то же назначение и условия применения, что и оцениваемое изделие. Рекомендуются в группу аналогов включать станки, отличающиеся от оцениваемого значениями классификационных показателей до 20 %. Значения оценочных показателей аналогов могут быть пересчитаны по зависимости между значениями оценочных показателей и показателей назначения исходя из условия равенства последних у аналогов и оцениваемого станка.

При оценке обязательным условием должна

быть сопоставимость значений показателей оцениваемого станка с конкретными аналогами или прогнозными значениями.

Для каждого аналога должны быть известны значения всех оценочных показателей. При отсутствии информации о значениях отдельных показателей аналогов допускается устанавливать значения этих показателей на основе анализа и прогноза развития данного вида оборудования.

Технический уровень станка определяется в зависимости от того, в какую область значений оценочных показателей попадают соответствующие показатели оцениваемого станка. При этом устанавливаются следующие границы областей технического уровня:

граница минимально допустимых значений оценочных показателей;
уровень мировых достижений;
нижняя и верхняя границы области мировых достижений.

Минимально допустимые значения оценочных показателей устанавливают в соответствии с требованиями отечественных и международных стандартов, а также национальных стандартов стран предполагаемого экспорта оцениваемого станка.

Если оцениваемый станок не отвечает хотя бы одному из требований этих норм или стандартов, его признают несоответствующим мировому техническому уровню. При наличии достаточного числа аналогов совокупность значений их оценочных показателей определяет уровень мировых достижений.

Допустимые значения мирового технического уровня (его верхняя и нижняя границы) определяются назначением регламентированных отклонений каждого параметра от его номинального значения. Эти отклонения устанавливают для каждого параметра на основе анализа его влияния на функционирование станка. Поле допуска этих значений симметрично относительно номинала. Значения допустимых отклонений устанавливает разработчик.

Процедура оценки технического уровня заключается в сравнении установленных показателей для данного образца с соответствующими показателями каждого базового образца (аналога). При автоматизированных методах оценки технического уровня допустимо математическое описание границ мирового технического уровня и определение, в какой области многомерного пространства показателей находится оцениваемый образец.

Каждому образцу соответствует своя совокупность значений оценочных показателей, что представляется в виде точки в многомерном пространстве показателей. Станок считается соответствующим мировому уровню, если эта точка (показатели станка) находится в обла-

ти, ограниченной значениями, принятыми в качестве допустимых.

При отсутствии реальных аналогов для сравнения с вновь создаваемым станком прогнозируют значения показателей перспективного образца, исходя из тенденций научно-технического прогресса. Достижение этих показателей означает, что создаваемый станок соответствует мировому уровню.

Станок считается уступающим мировому техническому уровню, если его оценочные показатели выходят за границы области допустимых значений или станок не имеет аналогов вследствие того, что технология производства работ с его использованием устарела и не соответствует современным требованиям потребителей.

При выборе аналогов для сравнения, выделении лучших образцов и проведении сопоставления их показателей рекомендуется применять автоматизированные системы анализа технического уровня с использованием баз данных по видам станков.

Целесообразность создания нового станка должна быть экономически обоснована. При этом должна быть определена экономическая эффективность от применения нового станка с учетом всех видов затрат, связанных с его проектированием, изготовлением и эксплуатацией.

На основе результатов оценки технического уровня продукции разрабатывают меры по доведению ее технического уровня до мирового уровня с учетом экономической эффективности.

Нормативные документы, в соответствии с которыми оценивают технический уровень металлорежущих станков (стандарты СПКП, Карта уровня), помогают разработчикам и изготовителям в организации работ по повышению технического уровня выпускаемой продукции. В то же время очевидно, что набор показателей, вошедших в стандарты СПКП, не может быть признан достаточным для оценки технического уровня с объективностью, необходимой для решения практических задач достижения мирового уровня.

Ограничение работ по оценке технического уровня станков рамками стандартов СПКП снижает полноту и объективность оценки, может привести к неверным выводам и соответственно решениям относительно целесооб-

разности выпуска той или иной модели станка. В условиях хозрасчетной деятельности предприятия сравнительная оценка технического уровня выпускаемой и намечаемой к выпуску продукции становится одним из важнейших элементов обеспечения сбыта продукции и рентабельности ее производства. Поэтому объектами сравнения должны быть не только важнейшие оценочные показатели станков, но и конструкторские и технологические решения, посредством которых эти показатели реализуются (совершенство конструкции направляющих, шпиндельных опор, приводов, систем управления, методов обработки ответственных деталей, упрочнения, снятия внутренних напряжений, сборки, контроля, испытаний, обеспечение сервисного обслуживания и ремонта и т. п.).

При этом номенклатура показателей, используемых для оценки технического уровня станков, методы их оценки являются своего рода «ноу-хау» разработчика и изготовителя, так как от полноты и объективности оценки, умения прогнозировать развитие техники зависит выбор стратегии и тактики деятельности предприятия, а следовательно, и экономические результаты этой деятельности.

Список литературы

1. Грановский Г. И. Кинематика резания. М.: Машгиз, 1948. 200 с.
2. Металлорежущие станки: Учебник: Под ред. В. Э. Пуша/В. Э. Пуш, В. Г. Беляев, А. А. Гаврюшин и др. М.: Машиностроение, 1986. 576 с.
3. Металлорежущие станки и автоматы: Под ред. А. С. Проникова/А. С. Проников, Н. И. Камышный, Л. И. Волчкевич и др. М.: Машиностроение, 1981. 480 с.
4. Проников А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя: Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова/В. Б. Борисов, Е. И. Борисов, В. Н. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 656 с. Т. 2. 496 с.
6. Якушев А. И., Воронцов Л. Н., Федотов Н. М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение, 1986. 352 с.

Глава 3

Область применения станков

3.1. Классификация станков по технологическому назначению

Возможности металлорежущего станка по обработке той или иной номенклатуры деталей с заданным качеством и наибольшей производительностью связаны, в первую очередь, с выбранным методом обработки и соответствующими движениями формообразования, а также со степенью концентрации в одном станке технологических операций. При этом характер обрабатываемой поверхности и вид режущего инструмента оказывают решающее влияние на принцип работы и компоновку станка.

В соответствии с этими признаками в табл. 3.1 приведена классификация станков по технологическому назначению, в которой отражено также развитие станков от простых одноинструментальных к станкам, в которых обеспечивается более эффективная обработка за счет концентрации в одном станке различных инструментов или одновременной обработки деталей в нескольких рабочих позициях.

Применение метода обработки одним инструментом (с возможной его заменой при обработке различных поверхностей) приводит к созданию более простых, универсальных и точных станков, обладающих, однако, сравнительно низкой эффективностью. К таким станкам относятся токарно-винторезные, алмазно-расточные, строгальные, долбежные и др.

Большую производительность обеспечивает применение многолезвийного инструмента (фрез, протяжек, сверл и др.), что, однако, требует создания станка более жесткой конструкции, воспринимающей статические и динамические нагрузки.

Для финишной обработки широко применяют станки с абразивным инструментом: шлифовальные, хонинговальные, притирочные и др. Еще большую производительность может обеспечить многоинструментная обработка с применением однотипного (например, многолезвийная обработка) или разнотипного инструмента.

Многоинструментная обработка на однопозиционном станке, когда в данный момент

времени обрабатывается одна деталь, может быть:

а) последовательной, при которой различный инструмент последовательно выходит на рабочую позицию станка, передаваясь из магазина или с помощью револьверной головки (револьверные станки и автоматы, многоцелевые станки с инструментальным магазином);

б) параллельной, при которой одновременно обрабатывается несколько поверхностей заготовки с помощью инструмента, установленного в суппортах или инструментальных головках (токарные многолезвийные и карусельные станки, агрегатные станки с многошпиндельными сверлильно-расточными головками, продольно-фрезерные и координатно-расточные станки с несколькими инструментными головками);

в) параллельно-последовательной, которая возможна при наличии двух револьверных головок или револьверной головки и поперечных суппортов (токарно-револьверные станки).

Наибольшая концентрация операций достигается в многопозиционных станках при одновременной обработке на одном станке нескольких заготовок. В многопозиционных станках последовательного действия заготовка устанавливается в загрузочную позицию, последовательно проходит через все рабочие позиции и обрабатывается согласно заданному технологическому процессу. В каждой позиции, как правило, производится многоинструментная обработка. Обычно такие станки имеют поворотные столы или шпиндельные блоки, которые периодически поворачиваются для перемещения заготовки из одной позиции в другую. К станкам этого типа относятся многошпиндельные прутковые и патронные токарные автоматы и полуавтоматы, агрегатные станки с поворотными столами, двухшпиндельные токарные автоматы.

В многопозиционных станках параллельного действия в каждой позиции осуществляется одна и та же операция одновременно или со сдвигом фаз по времени (ротационные станки). Такой метод обработки применяют при сравнительно простых технологических процессах, но с высокими требованиями к произ-

3.1. Классификация металлорежущих станков по технологическому назначению

| Станок | Обрабатываемая поверхность или вид обработки | | |
|---------------------------------------|--|------------------------------|--------------------------------|
| | Вращения и винтовая | Плоская и линейная | Фасонная |
| Однопозиционный: одноинструментный | Однорезвийный инструмент | | |
| | | | |
| | Многорезвийный инструмент | | |
| | | | |
| Абразивный инструмент | | | |
| | | | |
| | Последовательная обработка | Параллельная (одновременная) | Параллельно – последовательная |
| Много-инструментный | | | |
| | Много-позиционный | | |

3.2. Обозначение моделей металлорежущих станков, выпускаемых в России (на 1990 г.)

| Станки | Группа | Тип станка | | | |
|---|--------|-------------------------|--|--|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Токарные | 1 | Автоматы и полуавтоматы | | | Токарно-револьверные |
| | | специализированные | одношпиндельные | многошпиндельные | |
| Сверлильные и расточные | 2 | | Настольно- и вертикально-сверлильные | Полуавтоматы одношпиндельные | многошпиндельные |
| Шлифовальные, полировальные, доводочные, заточные | 3 | | Круглошлифовальные, бесцентрово-шлифовальные | Внутришлифовальные, координатно-шлифовальные | Обдирочно-шлифовальные |
| Электрофизические и электрохимические | 4 | | | Светолучевые | |
| Зубо- и резьбообрабатывающие | 5 | Резьбонарезные | Зубодолбежные для обработки цилиндрических колес | Зубонарезные для обработки конических колес | Зубофрезерные для обработки цилиндрических колес и шлицевых валов |
| Фрезерные | 6 | Баранно-фрезерные | Вертикально-фрезерные консольные | Фрезерные непрерывного действия | Продольные одностоечные |
| Строгальные, долбежные, протяжные | 7 | Продольные | | | Поперечно-строгальные |
| | | | одностоечные | двухстоечные | |
| Разрезные | 8 | Отрезные, оснащенные | | | |
| | | | резцом | шлифовальным кругом | гладким или насеченным диском |
| Разные | 9 | | Трубо- и муфтообрабатывающие | Пилонасекательные | Правильно- и бесцентрово-обдирочные |

водительности при крупносерийном и массовом производствах. Примерами могут служить плоскошлифовальные станки с непрерывно вращающимся столом (например, для шлифования

торцов подшипниковых колес). Более характерно для параллельной обработки применение роторных станков, например, для сверлильной и токарной обработки сравнительно простых

| Тип станка | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|---|
| 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Токарно-револьверные полуавтоматы | Карусельные | Токарные и лоботокарные | Многорезцовые и копировальные | Специализированные | Разные токарные |
| Координатно-расточные | Радиально- и координатно-сверлильные | Расточные | Отделочно-расточные | Горизонтально-сверлильные | Разные сверлильные |
| Специализированные шлифовальные | Продольно-шлифовальные | Заточные | Плоскошлифовальные | Притирочные, полировальные, конинговальные, доводочные | Разные станки, оснащенные абразивным инструментом |
| Электрохимические | | | Электроэрозионные, ультразвуковые прошивочные | Анодно-механические отрезные | |
| Для нарезания червячных колес | Для обработки торцов зубьев колес | Резьбофрезерные | Зубоотделочные, проверочные и обкатные | Зубо- и резьбошлифовальные | Разные зубо- и резьбообрабатывающие |
| Копировальные и гравировальные | Вертикально-фрезерные бесконсольные | Продольные двухстоечные | Консольно-фрезерные операционные | Горизонтально-фрезерные консольные | Разные фрезерные |
| Долбежные | Протяжные горизонтальные | Протяжные вертикальные для протягивания внутреннего наружного | | | Разные строгальные станки |
| Правильно-отрезные | Ленточно-пильные | Отрезные с дисковой пилой | Отрезные ножовочные | | |
| | Для испытания инструментов | Делительные машины | Балансировочные | | |

деталей. В этих станках применяют также операции, связанные с пластическим деформированием металла.

Для современных многопозиционных станков

с многоинструментной обработкой характерно наряду с обработкой резанием применять и другие операции, основанные на пластическом деформировании, а также лазерную обработку,

сварку, сборку, контроль и измерение выходных параметров.

На практике применяют также метод параллельно-последовательной обработки. Например, на четырехпозиционном столе агрегатного станка каждая рабочая позиция выполнена вдвоем, и в ней параллельно обрабатываются две заготовки. Таким образом, здесь через четыре последовательные позиции проходят два параллельных потока и одновременно обрабатываются восемь заготовок.

Другим примером параллельно-последовательной обработки может быть роторно-конвейерная линия, состоящая из отдельных рабочих роторов, в каждом из которых осуществляется своя технологическая операция в нескольких одинаковых позициях.

Большая концентрация операций в одном станке за счет многоинструментной обработки и, тем более, при многопозиционной обработке приводит к созданию более сложных, но высокоэффективных станков.

Основная задача при проектировании станков такого типа — обеспечить их возможно большую гибкость, т. е. универсальность и возможность быстрой переналадки. Это достигается путем создания станков, которые могут входить в гибкий производственный модуль с автоматическим управлением процессами замены инструмента и заготовок и переналадки на новый цикл обработки.

Для обозначения различных моделей металлорежущих станков в отечественном станкостроении принята специальная система, которая позволяет по цифровому и буквенному индексам станка определить его тип, основные технологические параметры, класс точности и систему программного управления.

Металлорежущие станки в зависимости от вида обработки делят на девять групп (табл. 3.2), а каждую группу — на десять типов (подгрупп), характеризующих назначение станков, их компоновку, степень автоматизации или вид применяемого обрабатывающего инструмента.

Обозначение модели станка состоит из сочетания трех или четырех цифр и букв. Первая цифра означает номер группы, вторая — номер подгруппы (тип станка), а последние одна или две цифры — наиболее характерные технологические параметры станка. Например, 1E116 означает токарно-револьверный одношпиндельный автомат с наибольшим диаметром обрабатываемого прутка 16 мм; 2Н125 означает вертикально-сверлильный станок с наибольшим условным диаметром сверления 25 мм. Буква, стоящая после первой цифры, указывает на различное исполнение и модернизацию основной базовой модели станка. Буква в конце цифровой части означает

модификацию базовой модели, класс точности станка или его особенности.

Классы точности станков обозначают: Н — нормальной; П — повышенной; В — высокой, А — особо высокой точности и С — сверхточные станки. Принята следующая индексация моделей станков с программным управлением: Ц — с цикловым управлением; Ф1 — с цифровой индексацией положения, а также с предварительным набором координат; Ф2 — с позиционной системой ЧПУ, Ф3 — с контурной системой ЧПУ; Ф4 — с комбинированной системой ЧПУ. Например, 16Д20П — токарно-винторезный станок повышенной точности; 6Р13К-1 — вертикально-фрезерный консольный станок с копировальным устройством; 1Г340ПЦ — токарно-револьверный станок с горизонтальной головкой, повышенной точности, с цикловым программным управлением; 2455АФ1 — координатно-расточной двухстоечный станок особо высокой точности с предварительным набором координат и цифровой индикацией. 2Р135Ф2 — вертикально-сверлильный станок с револьверной головкой, крестовым столом и с позиционной системой числового программного управления; 16К20Ф3 — токарный станок с контурной системой числового программного управления; 2202ВМФ4 многоцелевой (сверлильно-фрезерно-расточный) горизонтальный станок с инструментальным магазином и с комбинированной системой ЧПУ (буква М означает, что станок имеет магазин с инструментами).

Станки подразделяют на широкоуниверсальные, универсальные (общего назначения), специализированные и специальные. Специальные и специализированные станки обозначают буквами (одной или двумя), присвоенными каждому заводу, с номером модели станка. Например, МШ-245 — рейкошлифовальный полуавтомат повышенной точности Московского завода шлифовальных станков.

3.2. Технические характеристики отечественных станков

Отечественная станкостроительная промышленность выпускает широкую гамму металлорежущих станков различных типоразмеров, входящих в девять групп, указанных в табл. 3.2. Наряду с широкоуниверсальными станками выпускают различные типы высокоавтоматизированных станков с ЧПУ, специализированных и специальных автоматов и полуавтоматов и автоматических линий.

Основными направлениями совершенствования конструкций металлорежущих станков, выпускаемых отечественной промышленностью, является повышение их производительности, прецизионности и надежности.

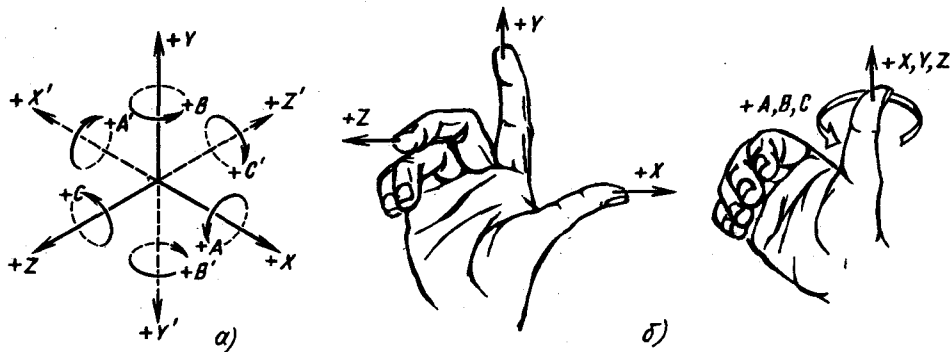


Рис. 3.1. Система координат станков с ЧПУ:
 а — правая прямоугольная система координат; б — правило правой руки при определении положительных направлений осей координат

Производительность станков повышают по следующим направлениям:

а) повышение частоты вращения шпинделя и мощности привода главного движения для обработки заготовок новыми видами режущих инструментов, работающих с более высокими режимами резания; во многих моделях токарных станков частота вращения шпинделя повышается до $6000-8000 \text{ мин}^{-1}$, а в многоцелевых станках до $8000-10\,000 \text{ мин}^{-1}$, мощность электродвигателя привода главного движения возрастает в среднем в 1,5–2 раза;

б) расширение числа управляемых координат (в том числе одновременно управляемых), оснащение станков устройствами и приспособлениями, расширяющими их технологические возможности;

в) увеличение концентрации технологических операций и выполнение на одном станке различных операций обработки заготовок (многоцелевые станки);

г) повышение уровня механизации и автоматизации станков, в том числе автоматическое накопление, выбор, смена и зажим режущих инструментов, загрузка заготовок и выгрузка деталей, расширение применения механизированного зажима заготовок и др.;

д) улучшение организации работы станка (надежное удаление стружки, применение эффективных систем подачи смазочно-охлаждающей жидкости, удобных и надежных защитных устройств и др.).

Точность прецизионных станков повышается в результате:

а) повышения точности изготовления и сборки деталей и узлов, определяющих точностные характеристики станков (шпинделей, направляющих, передач ходовой винт — гайка качения, делительных пар, базовых корпусных деталей и др.);

б) уменьшения тепловыделения в станках, что снижает его температурные деформации;

в) проведения сборки станков в термоконстантных помещениях из предварительно собранных и испытанных узлов;

г) применения систем компенсации погрешностей станка, систем контроля износа режущих инструментов и точности деталей на основе применения современных измерительных средств и вычислительной техники в системах управления.

Надежность станков повышается вследствие:

а) разработки и выпуска новых конструкций металлорежущих станков на основе применения современных систем ЧПУ;

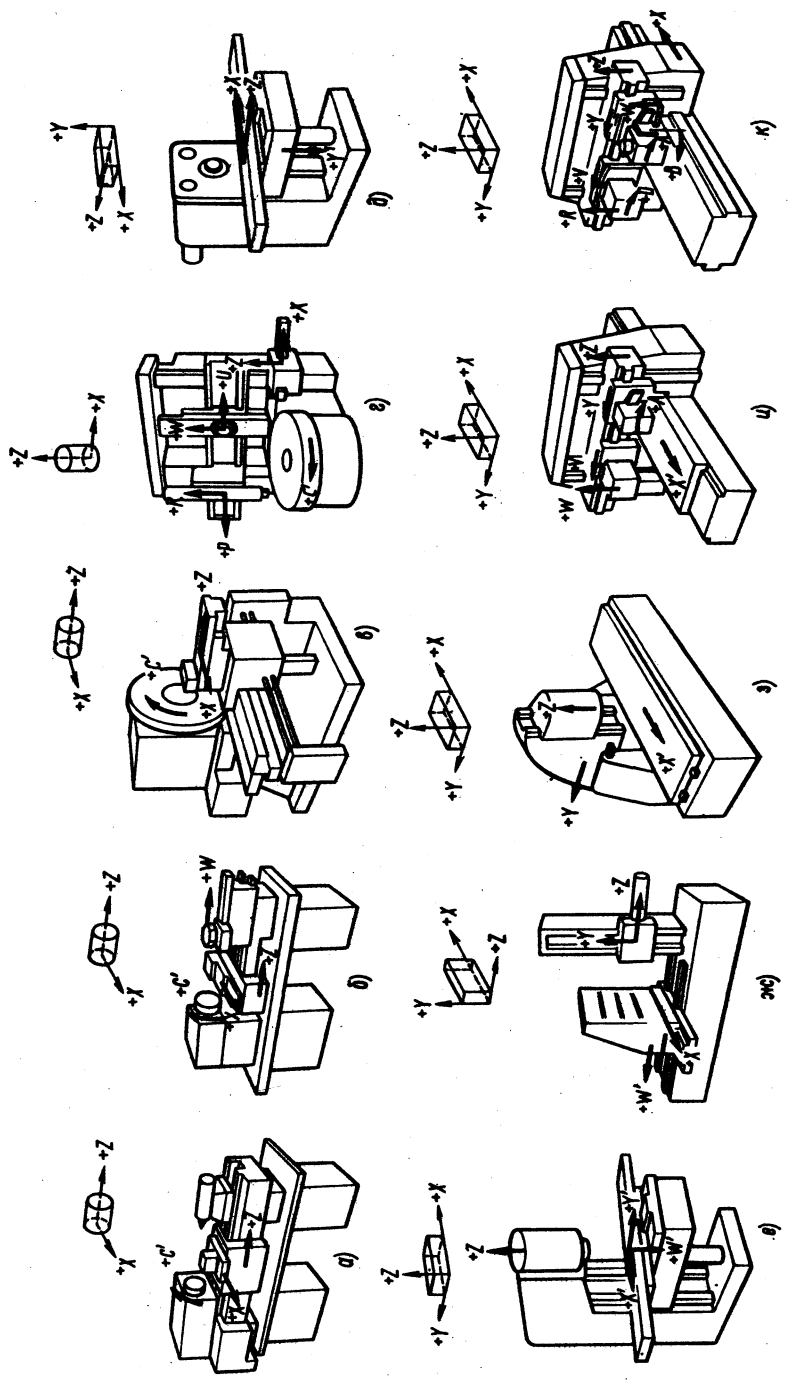
б) организации модульного принципа конструирования и изготовления станков с централизованным изготовлением узлов и механизмов станков (шпинделей и их опор, направляющих, револьверных головок, механизмов автоматического накопления и смены режущих инструментов, передач винт—гайка качения и опор ходового винта, гидро- и пневмоаппаратуры, комплектных электроприводов, систем электроавтоматики и др.);

в) внедрения прогрессивных технологических методов изготовления более износостойких деталей и узлов (подшипников, направляющих, шпинделей, ходовых винтов и гаек и др.) в результате применения ионного азотирования и цементации, использования новых, более износостойких полимерных материалов, применения закаленных чугунов и накладных стальных направляющих и др.;

г) расширения применения автоматических систем контроля износа и поломки режущих инструментов;

д) применения в современных системах управления принципов резервирования и блокировок и др.

В общей номенклатуре выпускаемых отечественных станков значительное место занимает расширяющийся выпуск станков с ЧПУ, в том числе зубообрабатывающих, шлифовальных и др.



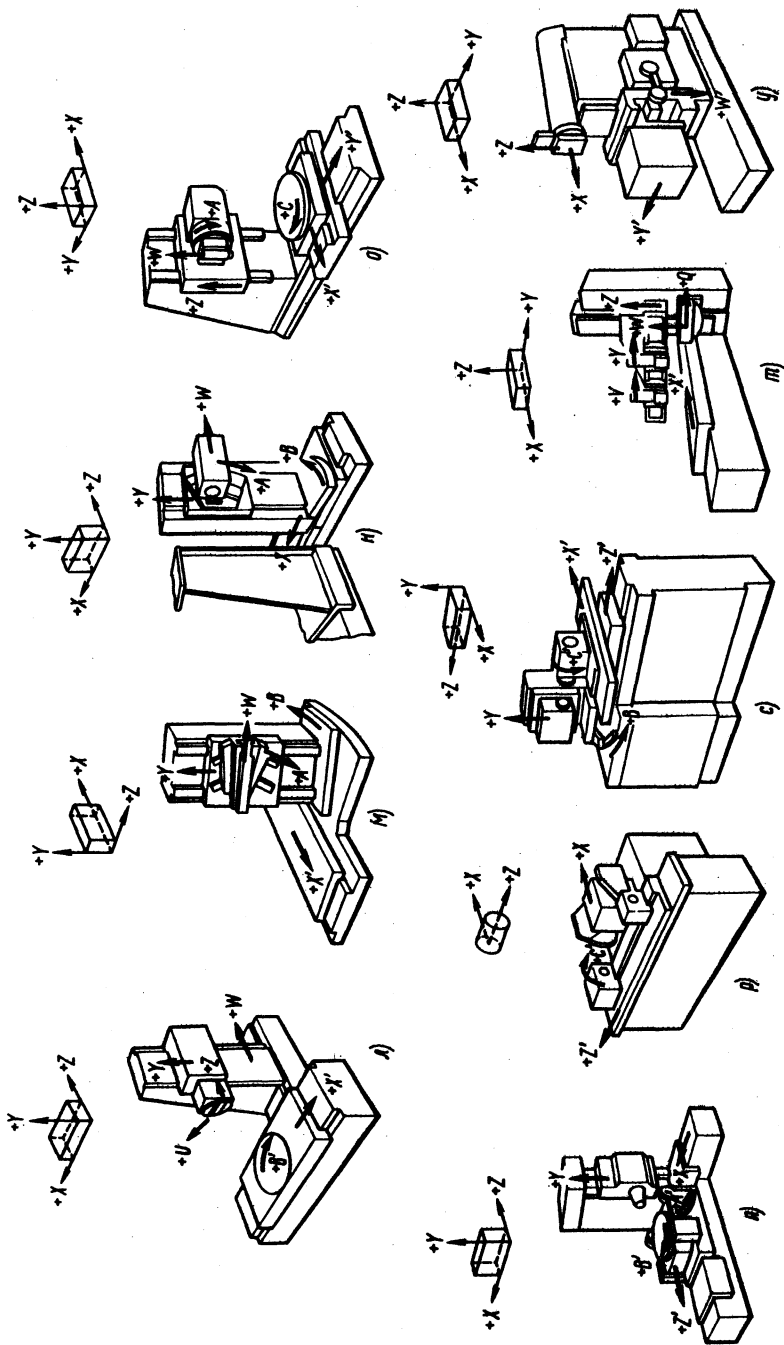


Рис. 3.2. Примеры обозначений осей координат:
 а — токарно-винторезный станок; б — токарно-револьверный станок; в — лоботокарный станок; г — токарно-карусельный станок; д — консольно-фрезерный горизонтальный станок; е — вертикальный координатно-расточной станок, консольно-фрезерный вертикальный, вертикально-сверлильный станок; ж — горизонтально-расточной станок, горизонтально-фрезерный станок; з — продольно-фрезерный вертикальный станок; и — порталный продольно-фрезерный станок; к — порталный координатно-фрезерный станок; л — пятикоординатный фрезерный станок; м — пятикоординатный фрезерный станок с крестовым поворотным столом и поворотной бабкой; н — пятикоординатный фрезерный станок с горизонтально-расточной бабкой; о — пятикоординатный фрезерный станок с крестовым поворотным столом и поворотной бабкой; п — станок для заточки режущего инструмента; р — одноосечный продольно-строгальный станок; у — поперечно-строгальный станок

В п. 3.1 были указаны обозначения станков с ЧПУ. В соответствии с рекомендациями ИСО в ГОСТ 23597—79 даны обозначения осей координат и направлений движений рабочих органов станка, связанных с заготовкой и инструментом. За основу принято перемещение инструмента относительно системы координат неподвижной заготовки. При этом стандартная система координат представляет собой правую прямоугольную систему, связанную с заготовкой, оси которой параллельны прямолинейным направляющим станка (рис. 3.1, а).

В общем случае имеются три линейных перемещения (соответственно X , Y , Z) и три вращательных движения вокруг этих осей (соответственно A , B , C). Положительное направление перемещений по осям X , Y , Z и A , B , C определяют по правилу правой руки (рис. 3.1, б). При этом положительное направление движения рабочего органа станка предпочтительно соответствует направлению отвода инструмента от заготовки. Положительным направлением вращения рабочего органа станка (A , B , C) считается вращение по часовой стрелке, если смотреть вдоль положительного направления осей координат X , Y , Z .

Направления движения рабочих органов, несущих инструмент, обозначают буквами без штриха (см. рис. 3.1, а). Если рассматривать перемещение заготовки относительно неподвижного режущего инструмента, то ее положительное направление обозначается теми же буквами, но со штрихом (X' , Y' , Z'). Ось Z всегда совмещена с осью вращения шпинделя, несущего инструмент (например, на фрезерном станке с ЧПУ) или заготовку (например, в токарных станках с ЧПУ).

Если дополнительно к основным прямолинейным движениям по осям X , Y , Z имеются вторичные движения, параллельные им, их обозначают соответственно буквами U , V , W . A для обозначения третичных движений, параллельных им, используют буквы P , Q и R соответственно. Вторичные вращательные движения, параллельные или не параллельные основным движениям A , B , C , обозначаются буквами D и E . Примеры обозначений осей координат для различных типов металлорежущих станков с ЧПУ показаны на рис. 3.2.

В табл. 3.3—3.29 приведены основные технические характеристики различных групп отечественных металлорежущих станков.

3.3. Технические характеристики токарно-револьверных автоматов и автоматов продольного точения

| Характеристика | Модель | | | |
|--|-------------|---------------|-------------|--------------------------|
| | 1В04В | 1В06А | 1М10ДА | 1Т16А |
| Наибольший диаметр прутика, мм | 4 | 6 | 10 | 16 |
| Наибольшая длина обрабатываемой детали, мм | 50 | 60 | 80 | 140 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 1600—16 000 | 1250 — 12 500 | 900 — 1250 | 450 — 6300 |
| Число позиций в револьверной головке | — | — | — | — |
| Мощность привода главного движения, кВт | 1,5 | 1,5 | 2,2 | 3,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1235 × 670 | 1280 × 670 | 1460 × 870 | 1945 × 945 |
| Масса, кг | 500 | 620 | 880 | 1270 |
| Характеристика | Модель | | | |
| | 1В116П | 1Д25ПФ40 | 1И140П | 1Д65ПФ40 |
| Наибольший диаметр прутика, мм | 18 | 25 | 40 | 65 |
| Наибольшая длина обрабатываемой детали, мм | 60 | 100 | 105 | 120 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 100 — 6300 | 20 — 6300 | 16 — 4000 | 25 — 4000 |
| Число позиций в револьверной головке | 8 | 8 | 8 | По шести в двух головках |
| Мощность привода главного движения, кВт | 3,6 | 17,2 | 11,0 | 30,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 3830 × 935 | 2950 × 1870 | 2180 × 1180 | 3150 × 1875 |
| Масса, кг | 1440 | 3600 | 3000 | 4100 |

3.4. Технические характеристики токарных многошпиндельных горизонтальных прутковых автоматов

| Характеристика | Модель | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1Б216-6К | 1Б240-6К | 1Б240-8К | 1Б265-6К | 1Б290-4К |
| Наибольший диаметр прутка, мм | 16 | 40 | 32 | 65 | 125 |
| Наибольшая длина подачи прутка, мм | 100 | 180 | 180 | 200 | 250 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 352 — 5013 | 140 — 1600 | 140 — 1600 | 73 — 1065 | 50 — 810 |
| Наибольший ход продольного суппорта, мм | 80 | 180 | 180 | 200 | 275 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 11,0 | 15,0 | 15,0 | 30,0 | 30,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 5760 × 1100 | 6170 × 1700 | 6170 × 1850 | 6265 × 1830 | 7945 × 2130 |
| Масса, кг | 5000 | 11 390 | 11 790 | 14 500 | 20 900 |

3.5. Технические характеристики токарных многошпиндельных горизонтальных патронных полуавтоматов

| Характеристика | Модель | | |
|---|-------------|-------------|-------------|
| | 1Б225П-8К | 1Б265П-6К | 1Б290П-4К |
| Наибольший диаметр патрона, мм | 80 | 160 | 250 |
| Наибольшая длина обработки, мм | 105 | 175 | 200 |
| Наибольший ход продольного суппорта, мм | 125 | 200 | 275 |
| Частота вращения шпинделей, мин ⁻¹ | 140 — 2000 | 78 — 805 | 42 — 553 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 15,0 | 30,0 | 30,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 4105 × 1320 | 4675 × 1690 | 4785 × 2160 |
| Масса, кг | 5800 | 14 500 | 18 100 |

3.6. Технические характеристики токарно-револьверных станков

| Характеристика | Модель | | |
|--|------------|-------------|-------------|
| | 1Е316П | 1Д325П | 1Г340ПЦ |
| Наибольший диаметр прутка, мм | 18 | 25 | 40 |
| Наибольший диаметр заготовки, устанавливаемой над станиной, мм | 250 | 320 | 400 |
| Наибольшая длина подачи прутка, мм | — | 75 | 100 |
| Наибольший ход револьверного суппорта, мм | 100 | 430 | 630 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 100 — 4000 | 80 — 3150 | 45 — 2000 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 1,9; 3,0 | 3,2; 5,3 | 7,1; 8,5 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 4020 × 920 | 4015 × 1000 | 4855 × 2250 |
| Масса, кг | 1203 | 1635 | 3450 |

| Характеристика | Модель | | | |
|--|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1Г340 (1Г340П) | 1М365 | 1А425 | 1В340ПФЦ |
| Наибольший диаметр прутка, мм | 40 | 65 | — | 40 |
| Наибольший диаметр заготовки, устанавливаемой над станиной, мм | 400 | 500 | 250 | 400 |
| Наибольшая длина подачи прутка, мм | 100 | — | — | 100 |
| Наибольший ход револьверного суппорта, мм | 630 | 1000 | 610 | 630 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 45 — 2000 | 34 — 1500 | 50 — 1250 | 45 — 2500 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 7,1; 8,5 | 15 | 7,5 | 7,1; 8,5 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 4860 × 1200 | 5000 × 1500 | 2570 × 1650 | 5115 × 3090 |
| Масса, кг | 3100 | 4285 | 4950 | 3400 |

3.7. Технические характеристики токарно-револьверных станков с числовым программным управлением

| Характеристика | Модель | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1П426ДФЗ | 1П426ФЗ | 1Е365ПФЗ0 | 1В340ФЗ0 | 1325ФЗ0 |
| Наибольший диаметр, мм: | | | | | |
| заготовки, устанавливаемой над станиной | 500 | 500 | 500 | 400 | 320 |
| заготовки, устанавливаемой над суппортом прутка | 250 | 400 | 250 | 200 | — |
| Растояние от переднего торца шпинделя до грани револьверной головки, мм: | 65 | — | 65 | 40 | 25 |
| наибольшее | 850 | 800 | 770 | 530 | 350 |
| наименьшее | 350 | 300 | 270 | 226 | 100 |
| Наибольшее рабочее перемещение револьверного суппорта, мм: | | | | | |
| продольное | 500 | 500 | 500 | — | — |
| поперечное | 340 | 330 | 260 | 110 | — |
| Дискретность задания перемещения, мм: | | | | | |
| продольного | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 |
| поперечного | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| Число управляемых координат: | | | | | |
| всего | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| одновременно | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Тип устройства ЧПУ | 2У22-61 | 2У22-61 | НЦ-31 | НЦ-31 | НЦ-31 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 36 — 1800 | 25 — 1800 | 31,5 — 2000 | 45 — 2500 | 90 — 4000 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 18,5 | 18,5 | 15,0 | 15,0 | 11,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 7235 × 2355 | 3550 × 1550 | 4800 × 1700 | 4640 × 2450 | 4355 × 1177 |
| Масса, кг | 9320 | 7600 | 4200 | 3600 | 2600 |

3.8. Технические характеристики токарных станков с числовым программным управлением (с резольверной головкой)

| Характеристика | Модель | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-------------|-----------|------------|-------------|------------|-----------|---|--|
| | 1П717Ф3 | 1725РФ3 | 1П420ПФ40 | 1П420ПФ30 | 1713Ф3 | 1П732РФ3 | 1740РФ3 | 1П756Ф4 | 1П756ДФ3 | |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | | | | | | | | | | |
| над станиной | 200 | 400 | 200 | — | 400 | 630 | 630 | 630 | 630 | |
| над суппортом | — | 250 | — | 200 | 250 | 400 | 400 | 500 | 500 | |
| Наибольшая длина заготовки, мм | 100 | 1000 | 125 | 130 | 710 | 300 | 1400; 2000 | 320 | 320 | |
| Дискретность задания перемещения, мм: | | | | | | | | | | |
| по оси X | 0,040 | 0,005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,005 | 0,005 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | |
| по оси Z | 0,016 | 0,01 | 0,001 | 0,001 | 0,01 | 0,01 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | |
| Число управляемых координат: | | | | | | | | | | |
| всего | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | |
| одновременно | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 16 — 2000 | 25 — 2500 | 2500 — 2500 | 20 — 4000 | 125 — 1250 | 12,5 — 1250 | 16 — 1600 | 10 — 2000 | 8 — 1600 | |
| Мощность привода главного движения, кВт | 6; 9 | 30 | 30 | 22 | 22 | 37 | 37 | 22 | 22 | |
| Тип устройства ЧПУ | Н22-1М | НЦ-31 | НЦ80-31 | НЦ80-31 | Н22-1М | Н22-1М | 2432-61 | НЦ-8031 | «System 5» фирмы Bosch (Германия) | |
| Габаритные размеры (длина X ширина), мм | 3020X3330 | 4585X2175 | 3150X2262 | 3150X1864 | 3164X1345 | 5675X2420 | 4930X2310 | 5270X2320 | 3200X3500 | |
| Масса, кг | 3185 | 7500 | 5700 | 6500 | 5230 | 11 600 | 11 600 | 12 700 | 8700 | |

3.9. Технические характеристики токарно-карусельных станков

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| | 1А512МФ3 | 1А516МФ3 | 1А525МФ3 | 1А532ЛМФ3 | 1А563Ф4 |
| Наибольшие размеры заготовки, мм: | | | | | |
| диаметр | 1250 | 1600 | 2500 | 3150 | 6300 |
| высота | 1000 | 1000 | 1600 | 1600 | 4000 |
| Диаметр планшайбы, мм | 1120 | 1400 | 2240 | 2800 | — |
| Наибольшая масса заготовки, мм | 10 000 | 15 000 | 25 000 | 25 000 | 250 000 |
| Частота вращения планшайбы, мин ⁻¹ | 1 — 335 | 0,8 — 278 | 0,27 — 127 | 0,22 — 102 | 0,31 — 31,5 |
| Наибольший крутящий момент на планшайбе, кН·м | 28 | 35 | 80 | — | 450 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 55 | 50 | 60 | 60 | 155 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 6500 × 4860 | 6500 × 4860 | 6540 × 6090 | 7190 × 6370 | 22 000 × 9770 |
| Масса, кг | 26 000 | 27 000 | 41 500 | 49 500 | 273 000 |

3.10. Технические характеристики токарных и токарно-винторезных станков

| Характеристика | Модель | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|------------------------|-------------|-------------|-----------------|--|-----------------------|-------------|--|
| | 16Б16А | 16Б16П | 16М16 | 16П16 | 16Б16КП | 16Д20П | 16К20К | 16К25Г | 16К20ВФ1С1 | |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | | | | | | | | | | |
| над стальной | 320 | 320 | 320 | 320 | 360 | 400 | 400 | 500 | 400 | |
| над суппортом | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 210 | 220 | Над выемкой 700 | 220 | |
| Длина заготовки, мм | 710 | 710 | 750 | 500 | 750 | 750; 1000; 1500 | 710; 1000; 1400; 2000 | 710; 1000; 1400; 2000 | 710; 1000 | |
| Диаметр прутка, проходящего через отверстие шпинделя, мм | 34 | 36 | 36 | — | 45 | 62 | 50 | 50 | 50 | |
| Наибольшее перемещение суппорта, мм: | | | | | | | | | | |
| продольное | 700 | 710 | 80 (ход гидросуппорта) | 520 | 710 | 750; 1000; 1500 | 125 (ход гидрокопировального суппорта) | 645; 935; 1335; 1935 | 645; 935 | |
| поперечное | 210 | 210 | — | 210 | 120 | 300 | — | 300 | 220 | |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 20—2000 | 20—2000 | 20—2000 | 16—1600 | 10—2000 | 8,5—2000 | 12,5—1600 | 12,5—1600 | 12,5—1600 | |
| Мощность привода главного движения, кВт | 3,0; 4,8 | 3,7 | 3,8; 6,3 | 3,8; 6,3 | — | 11 | 11 | 11 | 5,5 | |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 2250 × 1060 | 2270 × 1110 | 3000 × 1300 | 1995 × 1550 | 2270 × 1110 | 2880 × 1270 | 2795 × 1565 | 3795 × 1240 | 2795 × 1350 | |
| Масса, кг | — | 2150 | 2230 | 1550 | 2150 | 2900 | 3225 | 3810 | 2870 | |

| Характеристика | Модель | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| | 16K20BΦ1 | 1M63MΦ101 | 16K40 | 1M63E (1M63BГ) | 1M65 | 1M658 | 1A660 | 1A655Φ1 | КЖ1695Φ1 | КЖ16981 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | | | | | | | | | | |
| над станной | 400 | 630 | 800 | 630 (900) | 1000 | 1000 | 1250 | 1600 | 3200 | 4000 |
| над суппортом | 220 | 350 | 490 | 350 | 600 | 600 | 900 | 1250 | 2500 | 3200 |
| Длина заготовки, мм | 710; 1000 | 1500 | 3000 | 3000 | 3000; 5000 | 8000 | 6000 | 8000; 10000; 12000; 16000 | 10 000; 12 000 | 12 500 |
| Диаметр прутка, проходящего через отверстие шпинделя, мм | 53 | 80 | — | 70 | 85 | 85 | — | — | — | — |
| Наибольшее перемещение суппорта, мм: | | | | | | | | | | |
| продольное | 645; 935 | 1360 | 3000 | 2520 | 2710; 4980 | 7200 | 5000 | 10 000 | 900 | 1000 |
| поперечное | 220 | 400 | 445 | 400 | 600 | 600 | 800 | 500 | 1060 | 1500 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 16—2000 | 12,5—1600 | 6,3— —1250 | 10—1250 | 5—500 | 5—500 | 1,6—200 | 1,26—160 | 1—83 | 0,42—80 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 5,5 | 18,5 | 18,5 | 15 | 22 | 22 | 55 | 75 | 110 | 160 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1190 × 2505 | 3665 × 1590 | 5780 × × 1850 | 5190 × 1780 | 6140 × × 2200 | 11 380 × × 2200 | 13 000 × × 2710 | 16 690 × × 2805 | 16 500 × × 5260 | 23 650 × × 9660 |
| Масса, кг | 2865 | 4450 | 7800 | 5730 | 12 800 | 17 730 | 42 020 | 59 300 | 133 500 | 345 000 |

3.11. Технические характеристики токарных станков с числовым программным управлением

| Характеристика | Модель | | | | | | | |
|--|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|
| | 16Б16Т1 | КТ141ПС2 | 16К20Т.02 | 16К20Ф3С32 | 1М63МФ30 | 16К30Ф323 | 1А660Ф3 | 1А665Ф3 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | | | | | | | | |
| над станиной | 320 | 400 | 500 | 500 | 630 | 630 | 1250 | 1600 |
| над суппортом | 125 | 200 | 220 | 220 | 320 | 320 | 800 | 1100 |
| Наибольшая длина заготовки, мм | 750 | 100 | 1000 | 1000 | 1300 | 1400 | 6000; 8000; 10 000 | 8000 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 40—2000 | 56—2500 | 22,4—2240 | 22,4—2400 | 12,5—1600 | 6,3—1600 | 0,4—200 | 0,32—160 |
| Дискретность перемещений, мм: | | | | | | | | |
| продольных | 0,01 | 0,001 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,001 | 0,001 |
| поперечных | 0,005 | 0,001 | 0,005 | 0,005 | 0,01 | 0,01 | 0,001 | 0,001 |
| Тип устройства ЧПУ | «Электроника НЦ-31» | 2Р22 | «Электроника НЦ-31» | 2Р22 | «Электроника НЦ-31» | «Электроника НЦ-31» | На базе ЭВМ | На базе ЭВМ |
| Число управляемых координат | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | — | — |
| Число одновременно управляемых координат | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | — | — |
| Мощность привода главного движения, кВт | 4,2; 7,1 | 11 | 11 | 11 | 22 | 30 | 110 | 110 |
| Масса станка, кг | 2860 | 5300 | 3600 | 4050 | 6800 | 7850 | 46 700 | 53 380 |
| Габаритные размеры (длина X ширина), мм | 3100 X 2300 | 2917 X 3337 | 3230 X 1700 | 3700 X 1700 | 4680 X 2340 | 5390 X 3470 | 12 728 X X 3285 | 15 055 X X 3849 |

46 3.12. Технические характеристики токарных модулей и роботизированных технологических комплексов

| Характеристика | Модель | | | |
|---|---------------|---------------|-------------|--------------|
| | 1716ПФ4РМ2 | 1716ПФ3РМ2 | БРСК-01 | 16К20РФ3Р132 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | | | | РТК-3Д31 |
| над станцией | 320 | | | 630 |
| над суппортом | 160 | | | — |
| в патроне | 200 | 200 | | 160 — 500 |
| Наибольшая длина заготовки, устанавливаемой в центрах, мм | 750 | 750 | | 320 |
| Дискретность задания перемещений суппорта, мм | 0,001 | 0,001 | 0,01/0,005 | 0,001 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 8 — 4000 | 6 — 3000 | 45 — 2000 | 22,4 — 2240 |
| Число управляемых координат: | | | | |
| всего | 3 | 3 | 2 | 2 |
| одновременно | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Тип устройства ЧПУ | Контурная CNC | Контурная CNC | НЦ-31 | НЦ-31 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 6; 9 | 6; 9 | 7,1; 8,5 | 30 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 6800 × 2900 | 6800 × 2900 | 6000 × 2800 | 6300 × 3750 |
| Масса, кг | 5600 | 5100 | — | 12 310 |

3.13. Технические характеристики координатно-расточных станков

| Характеристика | Модель | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2421СФ10 | 24310Ф10 | 2К40СФ4 | 2Е450АФ1 | 24К60ДФ4 |
| | | | | | 24К70АФ4 |
| | | | | | 2Е450АФ30 |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина × длина), мм | 250 × 360 | 320 × 560 | 400 × 800 | 630 × 1120 | 1000 × 1600 |
| Перемещение стола, мм: | | | | | |
| продольное | — | 400 | — | 1000 | 1600 |
| поперечное | — | 250 | — | 630 | 1000 |
| Наибольший диаметр растачивания, мм | 50 | 220 | 250 | 250 | 320 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 150 — 3000 | 20 — 4000 | 6,3 — 3150 | 10 — 2000 | 6,3 — 3150 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 0,75 | 1,9 | 4,2 | 7,2 | 12 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1150 × 1070 | 2410 × 2000 | 3400 × 2400 | 3350 × 2500 | 8000 × 6000 |
| Масса, кг | 750 | 3250 | 4600 | 8000 | 36 500 |
| | | | | | 9640 |

3.14. Технические характеристики горизонтально-расточных станков

| Характеристика | Модель | | | | | | | |
|---|-------------|---------------------|---------------------|-------------|---------------|---------------------|--------------------------|-------------|
| | 2А622ПФ1 | 2А622Ф4 | 2А636Ф1, 2А636Ф2 | 2Б37ГФ2 | 2А656РФ11 | 2А637Ф1, 2А637Ф2 | ИР2637ПФ4, ИР2637ПМФ4 | 2П637МФ4 |
| Диаметр шпинделя, мм | 110 | 110 | 125 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина X длина), мм | 1120 X 1250 | 1250 X 1250 | 1600 X 1800 | 1800 X 1600 | 2500 X 2000 | 1600 X 1800 | 1600 X 1800 | 2000 X 1600 |
| Наибольшее перемещение шпиндельной бабки в продольном направлении, мм | 1000 | 710 | 1000 | 1000 | 1250 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Частота вращения выдвинутого шпинделя, мин ⁻¹ | 10—1250 | 4—1250; 6,3—2000 | 6,3—1250 | 5—800 | 7,5—900 | 5—1000 | 5—1000 | 2—1600 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 11 | 20 | 22 | 22 | 18,5 | 22 | 26—30 | 36 |
| Габаритные размеры станка, (длина X ширина), мм | 6100 X 3950 | 6335 X 3980 | 8160 X 5622 | 6960 X 5070 | 8100 X 11 500 | 8160 X 5622 | 8120 X 5700 | 8300 X 7200 |
| Масса, кг | 17 500 | 20 500 | 33 945 | 32 000 | 51 500 | 33 337 | 36 900 | 41 900 |

3.15. Технические характеристики многоосевых станков (вертикальной компоновки)

| Характеристика | Модель | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2110МП7Ф4 | ГДВ400ПМ1Ф4 | 2254ВМФ4 | СМ213В | 2С150ПМФ4 | 2570ПМФ4 |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина X длиной), мм | 630 X 400 | 630 X 400 | 400 X 630 | 630 X 1320 | 500 X 1000 | 2000 X 6000 |
| Рабочие перемещения узлов, мм: | | | | | | |
| по оси X | 630 | 630 | 500 | 1250 | 800 | 4000 |
| по оси Y | 400 | 400 | 500 | 800 | 500 | 2000 |
| по оси Z | 630 | 630 | 500 | 500 | 750 | 630 |
| Число управляемых координат: | | | | | | |
| всего | 4 | 3 | 8 | 3 | — | — |
| одновременно | 3 | 2 | 4 | — | — | — |
| Точность позиционирования, мм | 0,04 | 0,015 | 0,012 | 0,05 | — | 0,03 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 30—3000 | 40—4500 | 40—2500 | 20—800 | 28—3500 | 15—3000 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 7,5 | 7,4 | 6,3 | 8,0 | 11 | 11—20 |
| Тип устройства ЧПУ | 2С42-65 | — | 2С42 | Контурная | — | — |
| Масса, кг | 8000 | 8400 | 7850 | 21 950 | 5595 | 2600 |
| Габаритные размеры (длина X ширина), мм | 3420 X 2850 | 3440 X 2200 | 3320 X 2475 | 7900 X 4750 | 3085 X 2680 | 6500 X 5200 |

3.16. Технические характеристики многоцелевых станков (горизонтальной компоновки)

| Характеристика | Модель | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------|---------------|--|--|
| | 2202ВМФ4 | 6902ПМФ2 | 2204ВМФ2 | 2204ВМФ4 | ИР500МФ4, ИР500ПМФ4 | ИР800МФ4, ИР800ПМФ4 | ИС800ПМФ4 | ИР1600МФ4 | | |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина X длина), мм | 280 X 280 | 320 X 250 | 400 X 500 | Ø630 | 500 X 500 | 800 X 800 | 800 X 800 | — | | |
| Число управляемых координат: | | | | | | | | | | |
| всего | 4 | 4 | 5 | 8 | 3 | 3 | 3 | 4—6 | | |
| одновременно | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | | |
| Длина хода, мм: | | | | | | | | | | |
| по оси X | 320 | 320 | 500 | 500 | 800 | 1000 | 1000 | 8000 | | |
| по оси Z | 320 | 320 | 500 | 500 | 500 | 710 | 1000 | 2500 | | |
| по оси Y | 320 | 320 | 500 | 500 | 500 | 800 | 800 | 1000 | | |
| Мощность привода главного движения, кВт | 5,5 | 3 | 6,3 | 6,3 | 14 | 14 | 17, 22, 30 | 38,9 | | |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 50—3150 | 50—2500 | 32—2000 | 40—5000 | 21,2—3000 | 21,2—3000 | 1—4500 | 5—1250 | | |
| Число инструментальных гнезд в магазине | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 64; 100 | 80 | | |
| Тип устройства ЧПУ | Контурная | Контурная | «Размер 2М» | «Размер 2М», 2С42 | — | — | МС2106 | МС2106 | | |
| Масса, кг | 6300 | 4000 | 6580 | 7250 | 11 370 | 12 850 | 10 300 | 85 000 | | |
| Габаритные размеры (длина X ширина), мм | 4500 X 2800 | 4450 X 4100 | 5000 X 3000 | 3470 X 2900 | 4450 X 4655 | 5388 X 4635 | 4750 X 6150 | 16 500 X 6500 | | |

50 3.17. Технические характеристики ГПМ на базе многоцелевых станков

| Характеристика | Модель | | | |
|--|-----------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | ИР200ПМФ4, ИР200ПМ1Ф4 | ИР320ПМФ4 | ГДВ400ПМ1Ф4 | АМК-2204ВМФ4 |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина × длина), мм | 200 × 200 | 320 × 320 | 400 × 630 | 400 × 500 |
| Рабочие перемещения узлов, мм: | | | | |
| по оси X | 360 | 400 | 400 | 500 |
| по оси Y | 240 | 360 | 630 | 500 |
| по оси Z | 320 | 400 | 630 | 500 |
| Число управляемых координат: | | | | |
| всего | 4 | 4 | — | 8 |
| одновременно | — | — | — | — |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 50 — 7100 | 13 — 500 | 40 — 4500 | 40 — 2500 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 5,5 — 6,2 | 7,5 | 7,4 | 6,3 |
| Тип устройства ЧПУ | МС2106 | «Bosch Mikro 5» | 2С42 — 65 | «Размер 2М» |
| Масса, кг | 7180 | 10 000 | 6700 | 14 800 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 3840 × 3020 | 3840 × 2300 | 3470 × 2190 | 3470 × 2900 |
| Характеристика | ОП2М04А | ОП2Г04АМФ4М | ИР500ПМФ4 | ИР800ПМФ4 |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина × длина), мм | 400 × 500 | 400 × 500 | 500 × 500 | 800 × 800 |
| Рабочие перемещения узлов, мм: | | | | |
| по оси X | 630 | 630 | 1000 | 2000 |
| по оси Y | 500 | 500 | 650 | 1400 |
| по оси Z | 500 | 500 | 800 | 1000 |
| Число управляемых координат: | | | | |
| всего | 5 | 5 | 5 | 5 |
| одновременно | 3 | 3 | 3 | 4 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 20 — 3500 | 10 — 4000 | 21 — 5300 | 8 — 2000 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 11 | 7,5 | 14; 18; 22 | 25 |
| Тип устройства ЧПУ | 2С42 | «Fapic 6М-Е» | Комбинированная | — |
| Масса, кг | 17 000 | — | 15 850 | 35 000 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 3600 × 2360 | 3600 × 2360 | 5200 × 4930 | 8750 × 7960 |
| | | | | 5388 × 4635 |
| | | | | 1250 × 1250 |

3.18. Технические характеристики круглошлифовальных станков

| Характеристика | Модель | | | | | | | | |
|---|---------------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | ЗУ10В, ЗУ10А, ЗУ10С | ЗМ153ВФ20 | ЗМ153А, ЗМ153У | ЗМ152ВФ20 | ЗУ12А | ЗУ12УА, ЗУ120А, ЗУ12УС | ЗУ12УВФ10 | ЗМ132МВФ2 | ЗМ163Ф2 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 100 | 140 | 140 | 200 | 200 | 200 | 200 | 280 | 280 |
| Наибольшая длина заготовки, мм | 180 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 500 | 500 | 1000 | 1250 |
| Наибольшая скорость вращения шлифовального круга, м/с | 35 | 50 | 50 | 50 | 35 | 35 | 32, 42, 50 | 50 | 50 |
| Мощность привода шлифовального шпинделя, кВт | 1,1 | 7,5 | 5,5 | 11 | 4 | 4 | 5,5 | 11 | 15,2 |
| Масса, кг | 1850 | 4400 | 4200 | 6000 | 3800 | 4200 | 4100 | 6980 | 9500 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1360 × 1715 | 3500 × 2800 | 3070 × 2400 | 4975 × 2337 | 2700 × 2540 | 3070 × 2520 | 3040 × 2260 | 5160 × 2605 | 5900 × 2950 |

Продолжение табл. 3.18

| Характеристика | Модель | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| | ЗМ161Е | ЗУ142МВ | ЗУ143МВ | ЗУ144МВ | ЗМ173 | ЗМ174 | ЗМ175 | ЗМ196 | ЗМ197 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 280 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 800 | 800 |
| Наибольшая длина заготовки, мм | 700 | 1000 | 1400 | 2000 | 1400 | 2000 | 2800 | 4000 | 6000 |
| Наибольшая скорость вращения шлифовального круга, м/с | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Мощность привода шлифовального шпинделя, кВт | 18,5 | 11 | 11 | 11 | 17 | 17 | 17 | 25; 22 | 25; 22 |
| Масса, кг | 8880 | 7560 | 9000 | 10 830 | 11 800 | 13 000 | 14 700 | 38 400 | 43 400 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 3480 × 4345 | 5238 × 2560 | 5238 × 2560 | 6438 × 2560 | 5800 × 2560 | 6710 × 2560 | 8310 × 2560 | 14 065 × 3775 | 16 075 × 3775 |

52 3.19. Технические характеристики плоскошлифовальных станков

| Характеристика | Модель | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| | 3Е710В-1 | 3Е711ВФ2 | 3Е711АФ1 | 3Е711В1 | 3Е711ВФ1 | 3Е711ВФ3 | 3Е721ВФ3 | 3Е721АФ1 | 3Е721ГВ1 | 3П722А | |
| Ширина рабочей поверхности стола, мм | 125 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 320 | 320 | 320 | 320 | |
| Длина рабочей поверхности стола, мм | 250 | 630 | 630 | 400 | 630 | 400 | 630 | 630 | 630 | 1250 | |
| Наибольшая скорость вращения шлифовального круга, м/с | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 1,5 | 5,5 | 5,5 | 4 | 5,5 | 7,5 | 7,5 | 8,5 (9,5) | 8,5 (9,5) | 11 | |
| Масса, кг | 1000 | 3200 | 3400 | 3380 | 3580 | 3780 | 6330 | 5000 | 5500 | 7150 | |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1420 × 1150 | 2780 × 1820 | 2965 × 1980 | 2380 × 1915 | 2820 × 1915 | 2800 × 2880 | 4100 × 4000 | 3404 × 2073 | 3800 × 2250 | 4560 × 2320 | |

Продолжение табл. 3.19

| Характеристика | Модель | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--|
| | 3П72211 | 3А722В | 3Д722Ф2 | 3Д732 | 3Б724 | 3П725 | 3Д754 | 3П740 | 3П741ИВ | 3П756Л | |
| Ширина рабочей поверхности стола, мм | 320 | 320 | 320 | 320 | 400 | 630 | Диаметр стола 400 | Диаметр стола 400 | Диаметр стола 800 | Диаметр стола 1000 | |
| Длина рабочей поверхности стола, мм | 1600 | 1250 | 1250 | 800 | 2000 | 2000 | — | — | — | — | |
| Наибольшая скорость вращения шлифовального круга, м/с | 60 | 35 | 35 | 30 | 35 | 35 | 23 | 60 | 60 | 25,5 | |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 18,5 | 11 | 15 | 17 | 22 | 30 | 13 | 15 | 18,5 | 30 | |
| Масса, кг | 9375 | 7150 | 9500 | 8750 | 19 890 | 15 500 | 5090 | 5921 | 10 340 | 10 300 | |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 5235 × 2165 | 4560 × 2660 | 4450 × 2190 | 4090 × 2200 | 5660 × 2580 | 6050 × 2800 | 2030 × 1030 | 3050 × 2550 | 3630 × 2875 | 2840 × 2555 | |

3.20. Технические характеристики зубодолбежных полуавтоматов для цилиндрических колес

| Характеристика | Модель | | | |
|---|------------|-------------|-------------|-------------|
| | 5111 | 5A122 | 5A140П | 51A80Ф2 |
| Наибольший делительный диаметр обрабатываемого зубчатого колеса, мм | 90 | 250 | 500 | 800 |
| Наибольший модуль, мм | 1 | 5 | 8 | 12 |
| Наибольшая ширина нарезаемого венца, мм | 20 | 20 | 100 | 200 |
| Число двойных ходов долбяка в мин | 250 — 1600 | 250 — 1600 | 55 — 560 | — |
| Мощность привода главного движения, кВт | 1,1 | 4,5 | 7,5 | 11 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 940 × 795 | 1000 × 1800 | 1975 × 1690 | 3000 × 1100 |
| Масса, кг | 1400 | 4500 | 7500 | 11 000 |

3.21. Технические характеристики зубофрезерных станков для цилиндрических колес

| Характеристика | Модель | | | | |
|--|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 53B05B | 53B10BФ4 | 53A20B | 53B30ПФ2 | 53Д50Н |
| Наибольший диаметр зубчатого колеса, мм | 50 | 125 | 200 | 320 | 500 |
| Наибольший модуль, мм | 1 | 2,5 | 4 | 6 | 10 |
| Наибольшая длина вертикального перемещения фрезерного суппорта, мм | — | — | — | 220 | 400 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 1 — 5000 | 2240 | 80 — 500 | 80 — 600 | 45 — 450 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 1,1 | 3 | 2,8 | 8,5 | 15 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1000 × 760 | 2800 × 2430 | 2060 × 1126 | 2300 × 1950 | 3470 × 1800 |
| Масса, кг | 600 | 2900 | 4300 | 6000 | 10 000 |

3.22. Технические характеристики зубострогальных полуавтоматов для прямозубых конических колес

| Характеристика | Модель | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 5M236B | 5C276П | 5C286П | 5E283 |
| Наибольший диаметр зубчатого колеса, мм | 125 | 500 | 800 | 1600 |
| Наибольший внешний окружной модуль, мм | 2,5 | 10 | 16 | 30 |
| Наибольшая ширина зубчатого венца, мм | 18 | 80 | 150 | 270 |
| Наибольшее внешнее конусное расстояние, мм | 63 | 250 | 460 | 800 |
| Число двойных ходов ползуна в мин | 100 — 810 | 48 — 400 | 34 — 167 | 17 — 127 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 1,1 | 4,0 | 7,5 | 7,5 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1690 × 1160 | 2885 × 1980 | 3235 × 2530 | 3785 × 2780 |
| Масса, кг | 2600 | 8800 | 15 100 | 19 000 |

3.23. Технические характеристики зуборезных полуавтоматов для конических колес с кругвыми зубьями

| Характеристика | Модель | | | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| | 5С23П | 5М26В | 5С270П | 5С280П |
| Наибольший диаметр зубчатого колеса, мм | 125 | 320 | 500 | 800 |
| Наибольший средний нормальный модуль, мм | 2,5 | 9 | 10 | 12 |
| Наибольшая ширина зубчатого венца, мм | 20 | — | 80 | 125 |
| Наибольшее среднее конусное расстояние, мм | 62 | — | 220 | 360 |
| Частота вращения инструментального шпинделя, мин ⁻¹ | 110 — 550 | 24 — 225 | 26 — 252 | 18 — 172 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 1,3 | 4,0 | 4,0 | 7,5 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм Масса, кг | 1845 × 1160 3100 | 3150 × 2130 8700 | 2885 × 1980 8800 | 3235 × 2530 15 100 |

3.24. Технические характеристики горизонтально- и вертикально-фрезерных консольных станков

| Характеристика | Модель | | |
|---|-------------|-------------|-------------|
| | 6Е80Ш | 6Д82ШФ20 | 6Т83Г |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина × длина), мм | 200 × 800 | 320 × 1250 | 400 × 1600 |
| Наибольшее перемещение стола, мм: | | | |
| продольное | 630 | 900 | 1120 |
| поперечное | 250 | 320 | 400 |
| вертикальное | 400 | 400 | 420 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 71 — 3150 | 20 — 2000 | 31,5 — 1600 |
| Расстояние от торца шпинделя до рабочей поверхности стола, мм | — | 50 — 450 | 30 — 450 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 3,0 | 5,5 | 11,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1755 × 1495 | 2650 × 2200 | 2570 × 2250 |
| Масса, кг | 1600 | 2800 | 3750 |

| Характеристика | Модель | | |
|---|-------------|-------------|-------------|
| | 6Т83 | 6Т12Ф20 | 6Т13 |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина × длина), мм | 400 × 1000 | 320 × 1250 | 400 × 1600 |
| Наибольшее перемещение стола, мм: | | | |
| продольное | 1120 | 800 | 1120 |
| поперечное | 400 | 270 | 400 |
| вертикальное | 360 | 420 | 430 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 31,5 — 1600 | 20 — 2000 | 31,5 — 1600 |
| Расстояние от торца шпинделя до рабочей поверхности стола, мм | 30 — 400 | 30 — 450 | 70 — 500 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 11,0 | 7,5 | 11,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 2570 × 2250 | 2280 × 1950 | 2570 × 2252 |
| Масса, кг | 3870 | 3600 | 4270 |

3.25. Технические характеристики вертикально-фрезерных станков с крестовым столом

| Характеристика | Модель | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| | 65А60Ф4-11 | 65А80Ф4 | 65А90Ф4 |
| Размеры рабочей поверхности стола (ширина × длина), мм | 630 × 2000 | 800 × 2000 | 1000 × 2500 |
| Наибольшее расстояние от торца шпинделя до рабочей поверхности стола, мм | 900 | 900 | 1000 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 5 — 2000 | 5 — 2000 | 5 — 2000 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 20 | 22 | 22 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 6185 × 3825 | 4780 × 4050 | 4800 × 5900 |
| Масса, кг | 16 800 | 16 000 | 21 500 |

3.26. Технические характеристики фрезерных широкоуниверсальных инструментальных станков

| Характеристика | Модель | | | |
|--|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | 6Е75ПФ1 | 6720ВФ2 | 67К25П | 67К32ВФ4 |
| Размеры рабочей поверхности основного вертикального стола (ширина × длина), мм | 200 × 500 | — | 250 × 630 | — |
| Предельные размеры обрабатываемых наружных поверхностей, мм | — | 300 × 230 × × 300 | — | 550 × 400 × × 400 |
| Наибольшее перемещение вертикального стола, мм: | | | | |
| продольное | 300 | 320 | 400 | 600 |
| вертикальное | 300 | 320 | 500 | 450 |
| Наибольшее поперечное перемещение шпиндельной бабки, мм | — | 250 | 320 | 450 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 63 — 3150 | 40 — 2240 | 40 — 2000 | — |
| Мощность привода главного движения, кВт | 1,5 | 2,2 | 2,2 | 5,5 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1350 × 1400 | 1650 × 1550 | 1630 × 1505 | 2600 × 2700 |
| Масса, кг | 800 | 950 | 1350 | 3300 |

3.27. Технические характеристики продольно-строгальных одно- и двухстоечных станков

| Характеристика | Модель | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 7Б110 | 7Б112 | 7Б116 | 7Б210 | 7Б212 | 7Б216 |
| Размеры стола (ширина × длина), мм | 900 × 3000 | 1120 × 4000 | 1400 × 6000 | 900 × 3000 | 1120 × 4000 | 1400 × 6000 |
| Ширина обработки, мм | 1000 | 1250 | 1600 | 1000 | 1250 | 1600 |
| Высота устанавливаемой заготовки, мм | 900 | 1120 | 1400 | 900 | 1120 | 1400 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 71 | 132 | 132 | 132 | 132 | 132 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 3750 × 10 300 | 4200 × 11 500 | 4500 × 14 000 | 4000 × 10 100 | 4600 × 11 300 | 4800 × 14 000 |
| Масса, кг | 26 200 | 33 500 | 47 200 | 26 200 | 33 500 | 46 200 |

3.28. Технические характеристики долбежных станков

| Характеристика | Модель | | | |
|--|------------|-------------|-------------|-------------|
| | 7401 | 7402 | 7403 | 7405 |
| Ход долбяка, мм | 10 — 100 | 20 — 200 | 120 — 320 | 115 — 500 |
| Наибольшее расстояние: от наружной плоскости резцедержателя до станины | 320 | 450 | 650 | 770 |
| от плоскости стола до нижнего конца направляющей долбяка | 200 | 320 | 500 | 715 |
| Диаметр рабочей поверхности стола, мм | 360 | 500 | 630 | 800 |
| Число двойных ходов долбяка в мин | 41 — 253 | 32 — 202 | 3 — 38 | 3 — 38 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 1,5 | 3,0 | 11,0 | 11,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 1640 × 980 | 1900 × 1270 | 2850 × 2160 | 3440 × 2760 |
| Масса, кг | 1100 | 2000 | 5660 | 8200 |

3.29. Технические характеристики протяжных станков

| Характеристика | Модель | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 7А534 | 7612 | 7633 | 7634 |
| Номинальная тяговая сила, кН | 250 | 40 | 250 | 250 |
| Наибольшая длина хода рабочих салазок, мм | 1600 | 1000 | 1250 | 1600 |
| Скорость рабочего хода, м/мин | 1,5 — 13 | 2 — 12,3 | 1,5 — 13 | 1,5 — 13 |
| Мощность привода главного движения, кВт | 37,0 | 7,5 | 37,0 | 37,0 |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 7275 × 2200 | 2150 × 2150 | 4825 × 1590 | 4825 × 1590 |
| Масса, кг | 6150 | 3350 | 10 700 | 11 900 |

3.3. Технические характеристики основных групп зарубежных станков

Металлорежущие станки выпускают в настоящее время многие зарубежные фирмы различных стран мира. Наибольшее количество металлорежущих станков производят в Японии, Германии, США, Италии, Швейцарии, Франции, Англии, Испании.

В настоящее время металлорежущие станки выпускают также Бразилия, КНР, Южная Корея, Болгария, Испания, Румыния, Индия, Турция, Тайвань и др. При этом в ряде указанных стран металлорежущие станки выпускают по лицензиям или в кооперации с передовыми станкостроительными фирмами. В отдельных случаях это более простое оборудование (обычные универсальные станки нормальной точности). Современное наукоемкое прецизионное металлообрабатывающее

оборудование с высокой степенью автоматизации в большинстве случаев выпускают традиционные станкостроительные фирмы.

Проектирование и производство зарубежных металлорежущих станков имеет следующие особенности.

1. Большинство станкостроительных фирм специализируется на выпуске определенной группы металлорежущих станков (токарных, фрезерных, сверлильно-расточных, многоцелевых, шлифовальных, зубообрабатывающих и др.). Эти металлорежущие станки выпускают, как правило, небольшими партиями, но при достаточно широком диапазоне их типоразмеров и модификаций.

2. Станкостроительные фирмы выполняют заказ на любой металлорежущий станок из выпускаемой гаммы, включая при необходимости и специальное исполнение станка.

3. Выпускаемые станки оснащают по желанию заказчика необходимыми приспособлениями, режущим инструментом и другими устройствами.

4. При проектировании и изготовлении металлорежущих станков фирма-изготовитель использует комплектующие изделия (устройство ЧПУ, приводные электродвигатели, гидро- и пневмооборудование, электрооборудование, направляющие, подшипники шпинделя и др.) тех фирм, которые пожелает заказчик.

5. Многие зарубежные фирмы переходят от производства отдельных металлорежущих станков к комплексному решению технологической задачи потребителя (разрабатывают технологические процессы обработки заданных заготовок, проектируют и изготавливают соответствующий металлорежущий станок, оснащают его необходимыми приспособлениями, режущими инструментами, измерительными устройствами и др.).

6. Проектирование и производство металлорежущих станков осуществляют на основе широкой кооперации с другими фирмами-изготовителями комплектующих изделий и, как следствие этого, на основе широкого применения модульного принципа построения.

Многие фирмы выпускают унифицированные комплектующие узлы и механизмы для различных станков (устройства ЧПУ, револьверные головки для токарных станков с ЧПУ, готовые шпиндели станка, различные зажимные патроны, направляющие, передачи ходовой винт — гайка, собранные опоры для ходовых винтов и др.), а также комплектующие устройства общего назначения, применяемые в металлорежущих станках (приводные электродвигатели, гидро- и пневмоаппаратура, различные муфты, промышленные роботы, транспортно-накопительные устройства и др.). Имеются также фирмы, которые изготавливают

базовые литые и сварные детали станков (станины, основания, стойки, корпуса и др.) с предварительной их обработкой.

Станкостроительные фирмы также широко используют услуги и этих фирм при производстве металлорежущих станков.

Многие зарубежные металлорежущие станки аналогичны металлорежущим станкам, выпускаемым отечественной станкостроительной промышленностью. Имеется много зарубежных станкостроительных фирм, которые выпускают примерно одинаковых типоразмеров металлорежущие станки и комплектующие узлы.

Наряду с новыми современными металлорежущими станками с ЧПУ и построенными на их основе РТК, ГПМ и ГПС ряд зарубежных фирм выпускает традиционные универсальные металлорежущие станки (токарные, фрезерные, сверлильные, шлифовальные и др.). Ниже приведены технические характеристики основных групп металлорежущих станков тех фирм, которые наиболее известны в нашей стране, а также станков, отличающихся от отечественных прецизионностью, более широкими технологическими возможностями, новым решением компоновки и конструкции ряда узлов.

Токарные станки. Зарубежные фирмы выпускают в основном следующие виды токарных станков:

широкоуниверсальные с ручным управлением (во многих случаях с системой цифровой индикации);

одношпиндельные с ЧПУ с горизонтальной компоновкой шпинделя с одной или двумя револьверными головками (в патронном или центровом исполнении) с наклонной компоновкой суппортов; фронтальные одно- и двухшпиндельные с ЧПУ (с наклонной и вертикальной компоновкой суппортов с револьверными головками);

одно- и двухшпиндельные с ЧПУ с вертикальной компоновкой шпинделей;

токарно-карусельные с ЧПУ средних, больших и очень больших размеров;

станки по специальному заказу.

Большую долю выпускаемых токарных станков составляют станки второго вида (рис. 3.3). Токарные станки подобной компоновки и конструкции выпускают фирмы Voest—Alpine (Австрия), Gildemeister, Heyligenstaedt, Heinemann, Monforts (Германия), Georg Fischer (Швейцария), Okuma (Япония), Cincinnati Milacron (США), Ramo (Франция), Colchester (Англия), Maho Graziano, Biglia (Италия) и др.

Некоторые фирмы выпускают токарные станки с ЧПУ с вертикальной компоновкой суппортов с револьверными головками (с одной

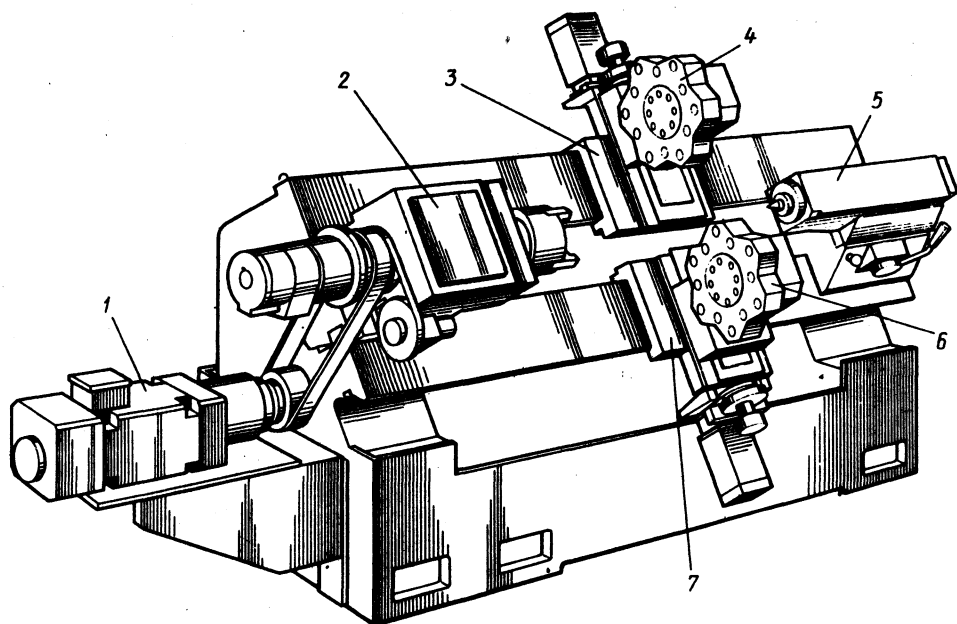


Рис. 3.3. Компонка токарного станка с ЧПУ с наклонным расположением суппортов с двумя револьверными головками:

1— приводной электродвигатель; 2— узел шпинделя; 3— верхний суппорт; 4— верхняя револьверная головка; 5— задняя бабка; 6— нижняя револьверная головка; 7— нижний суппорт

или двумя). На станках с одной револьверной головкой 1 применяют традиционную компоновку токарно-револьверных автоматов (рис. 3.4, а). При применении двух револьверных головок 1 и 2 используют компоновку, показанную на рис. 3.4, б. Токарные станки с ЧПУ такой компоновки выпускают фирмы Index, Traub, Gildemeister (Германия) и др.

С целью расширения технологических возможностей и, в частности, для обработки заготовки с двух сторон выпускают токарные станки с ЧПУ с двумя револьверными го-

ловками и двумя соосными шпинделями (рис. 3.5 и рис. 3.6), а также с тремя револьверными головками (рис. 3.7). В первом варианте (см. рис. 3.5) рабочий шпиндель 1 имеет обычное исполнение, а второй шпиндель 3, расположенный соосно с первым, имеет кроме вращения и осевое перемещение. Револьверные головки 2 и 4, кроме обработки, осуществляют также подачу заготовок в зажимные патроны шпинделей 1 и 3. На рис. 3.5 показана обработка заготовки при такой компоновке револьверных головок и шпинделей.

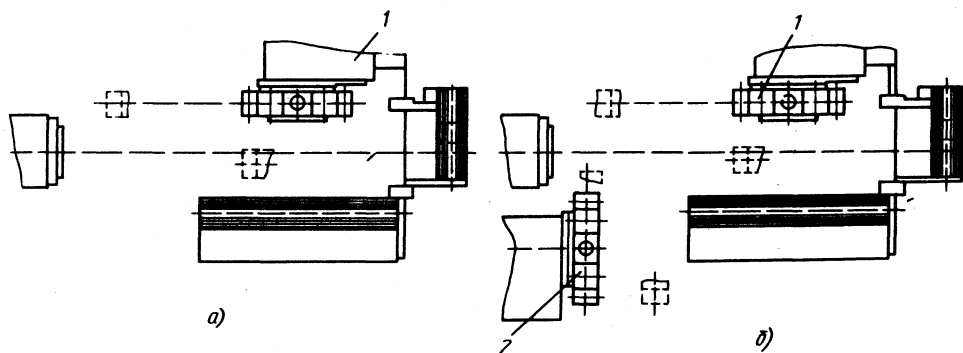


Рис. 3.4. Расположение револьверных головок при их вертикальной компоновке:
а — с одной револьверной головкой, б — с двумя револьверными головками

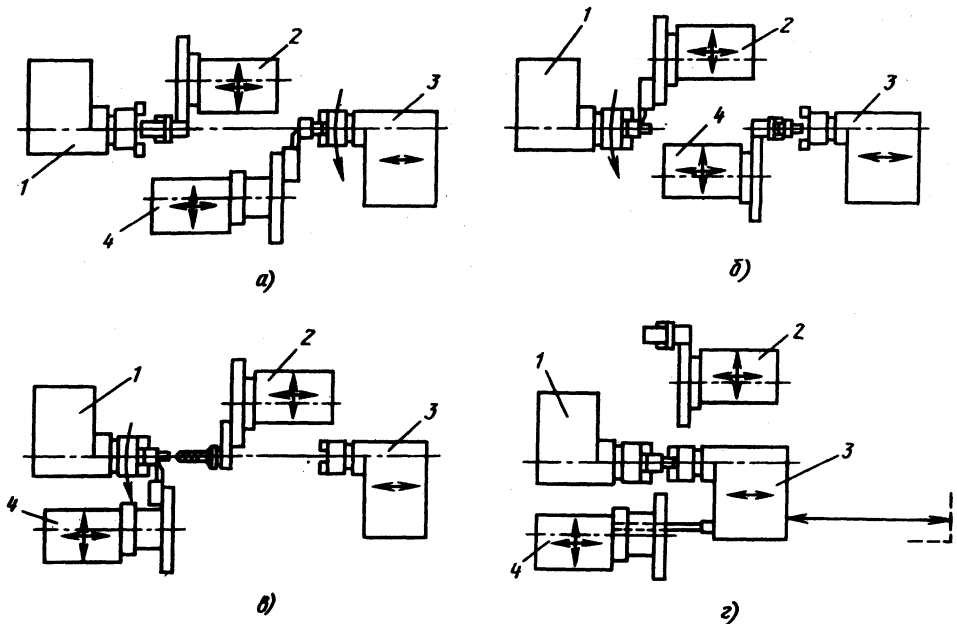


Рис. 3.5. Расположение двух шпинделей и двух револьверных головок в токарном станке с ЧПУ мод. GT50 фирмы Gildemeister Italiana (Италия):

а — обработка предыдущей заготовки со стороны другого торца в шпинделе 3 и загрузка следующей заготовки в патрон шпинделя 1; *б* — окончание обработки предыдущей заготовки, ее съем из шпинделя 3, начало обработки заготовки в шпинделе 1; *в* — продолжение обработки заготовки в шпинделе 1 инструментами обеих револьверных головок; *г* — подход шпинделя 3, зажим в нем заготовки с обработанной стороны для последующей обработки со стороны другого торца, подготовка загрузки следующей заготовки в патрон шпинделя 1

При втором варианте (см. рис. 3.6) применяют также две револьверные головки 2 и 4, но расположены они встречно. Второй рабочий шпиндель 3 в отличие от первого рабочего шпинделя 1 кроме вращения перемещается по двум координатам: X и Z . При этом револьверная головка 2 неподвижна.

Технологические возможности токарных станков с ЧПУ расширяются при применении трех револьверных головок 1, 2 и 3 (см. рис. 3.7). При этом револьверная головка 2, кроме обработки заготовки, закрепленной в патроне рабочего шпинделя 4, выполняет роль второго рабочего шпинделя при обработке со стороны отрезки. Револьверная головка 3 не перемещается.

Токарные станки с ЧПУ с компоновками револьверных головок, показанными на рис. 3.5—3.7, выпускают фирмы Gildemeister (Германия), Ebosa (Швейцария), Monforts (Германия), Traub (Германия), Biglia (Италия), Voley (Германия), Heid (Австрия) и др.

Фронтальные одно- и двухшпиндельные токарные станки с ЧПУ выпускают фирмы Pittler, Weissger и Emag (Германия), Minganti (Италия), Heiligenstaedt (Германия) и др. На

рис. 3.8 показаны варианты компоновок фронтальных одно- и двухшпиндельных станков с ЧПУ с наклонным (рис. 3.8, *а—д*) и вертикальным (рис. 3.8, *е—к*) расположением суппортов с револьверными головками, а также даны варианты компоновок с поворотными двухшпиндельными головками (рис. 3.8, *л, м*),

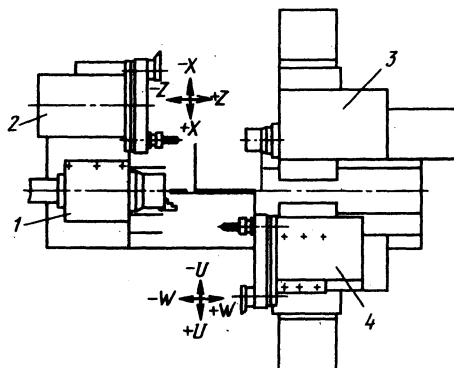


Рис. 3.6. Расположение двух шпинделей и двух револьверных головок в токарном станке с ЧПУ фирмы Ebosa (Швейцария)

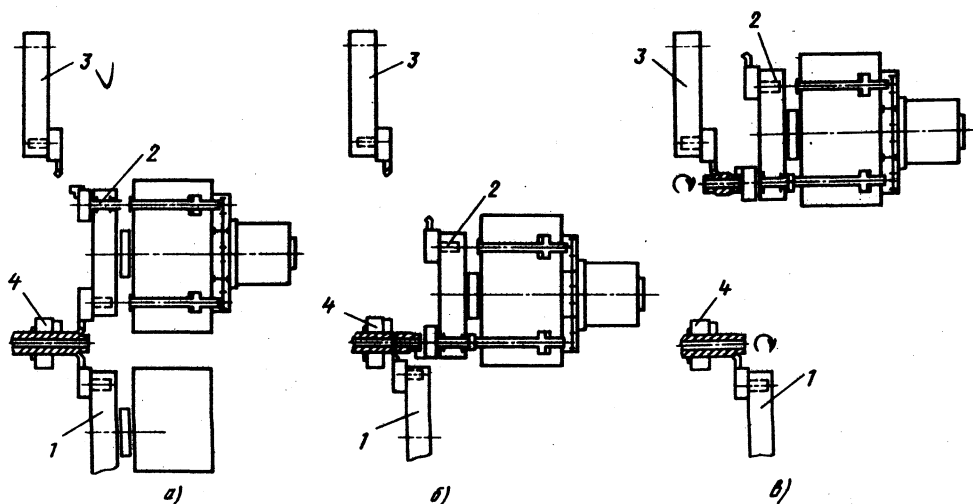


Рис. 3.7. Расположение трех револьверных головок токарного станка с ЧПУ фирмы Monforts (Германия): а — обработка заготовки в шпинделе четырьмя инструментами, установленными в револьверных головках 1 и 2; б — отрезка обработанной заготовки и зажим ее в патроне револьверной головки 2; в — окончание обработки заготовки, зажатой в патроне головки 2 инструментами, расположенными в головке 3, и начало обработки следующей заготовки в шпинделе 4

применяемых, в частности, в станках мод. DZ 200(300, 400) CNC фирмы Weisser (Германия).

Фирма Biglia (Италия) выпускает двухшпиндельные станки В2М (рис. 3.9, а) и В2М 4А (рис. 3.9, б), в которых шпиндели 1 и 5 (см. рис. 3.9, а) и 1 и 4 (см. рис. 3.9, б) расположены соосно. Заготовки в каждом шпинделе на станках В2М обрабатываются поочередно режущими инструментами, расположенными в револьверных головках 2 и 4 (см. рис. 3.9, а), установленных на едином суппорте 3.

В станке В2М 4А при той же компоновке шпинделей применяют также две револьверные головки 2 и 3 (см. рис. 3.9, б), но установлены они на двух самостоятельных суппортах, что позволяет обрабатывать заготовки, установленные в обоих шпинделях одновременно.

Фирма Heufligenstaedt (Германия) также выпускает двухшпиндельные токарные станки с ЧПУ мод. «Heunutwin 280» с соосным расположением шпинделей 1 и 3 (рис. 3.10), но с единой для них двоярной револьверной головкой 2.

Ниже приведены краткие технические характеристики отдельных моделей токарных станков с ЧПУ, выпускаемых зарубежными фирмами. Фирма Schaublin (Швейцария) выпускает гамму небольших и средних высокопрецизионных токарных станков с ЧПУ (табл. 3.30).

Токарный станок с ЧПУ мод. 102-CNC имеет крестовый суппорт (рис. 3.11) в двух исполнениях: с тремя резцедержателями (рис. 3.11, а): передним 1, задним 3 и фронтальным 2, и с двумя резцедержателями: 1 и 3 (рис. 3.11, б) — при применении задней бабки 2.

Токарный станок мод. 110-CNC выполняют либо с одной восьмипозиционной револьверной головкой и задним центром, либо только с суппортом с обычными резцедержателями.

Токарный станок 130-CNC может быть выполнен в двух основных вариантах: с одной 12-позиционной револьверной головкой и задней бабкой и с двумя 12-позиционными револьверными головками.

Фирма Voley (Германия) также выпускает гамму небольших и средних прецизионных токарных станков с ЧПУ (табл. 3.31). Указанные в таблице модели имеют несколько модификаций.

Токарные станки мод. ВКН 100 выпускают в пяти модификациях: ВКН 100А — с линейным горизонтальным суппортом (его схема аналогична схеме, приведенной на рис. 3.11, а); ВКН 100В — с одной 12-позиционной револьверной головкой; ВКН 100С — с одной 12-позиционной револьверной головкой и задней бабкой; ВКН 100 D — с двумя 12-позиционными револьверными головками; ВКН 100Е — с двумя 12-позиционными револьверными головками и двумя расположенными соосно рабочими шпинделями (его схема аналогична схеме, приведенной на рис. 3.6).

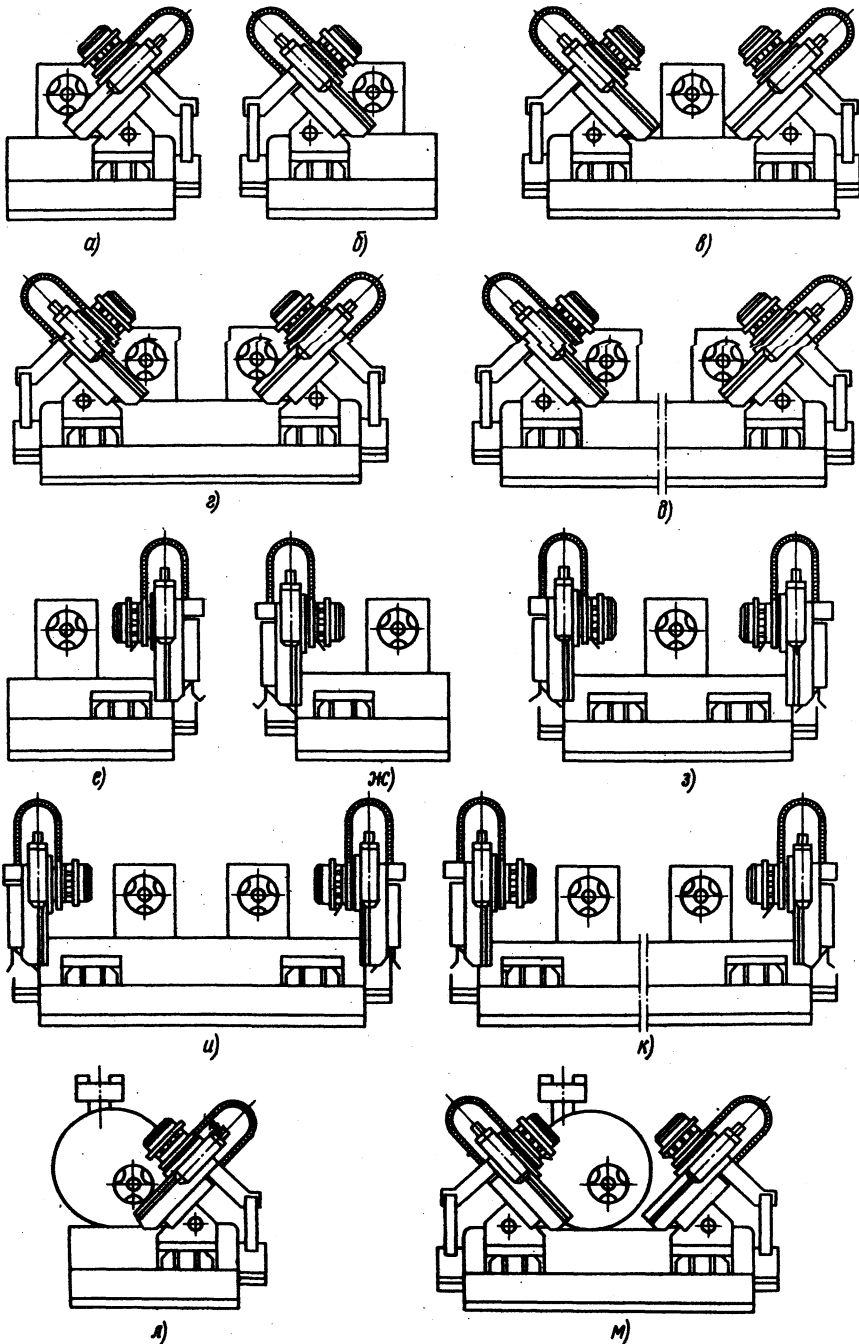


Рис. 3.8. Компонка суппортов во фронтальных одно- и многшпindleльных токарных станках с ЧПУ соответственно с наклонными и вертикальными расположением суппортов:
одношпindleльные: а, е—с одним правым суппортом; б, ж—с одним левым суппортом; в, з—с двумя суппортами; г—с двухпозиционной поворотной шпindleльной бабкой и правым суппортом; к—с двухпозиционной поворотной шпindleльной бабкой и двумя суппортами; д, и—с двумя суппортами с близким расположением шпindleлей; л, м—с двумя суппортами с разнесенными шпindleлями

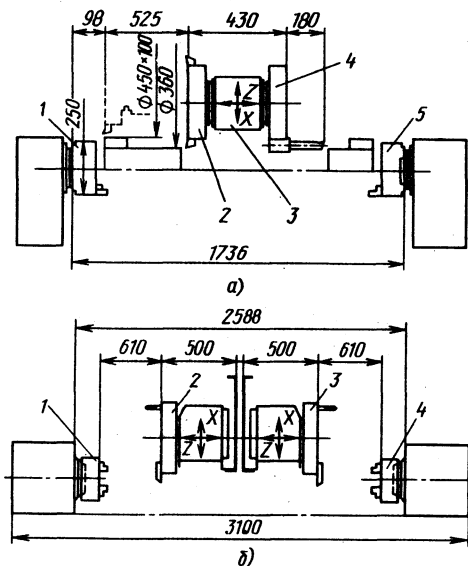


Рис. 3.9. Расположение шпинделей и суппорта с револьверными головками в токарных станках с ЧПУ фирмы Biglia (Италия):

а — с двумя револьверными головками на одном суппорте; б — с двумя револьверными головками на разных суппортах

Токарные станки мод. BDN160 выпускают в трех модификациях: BDN160R42 и BDN160R60 с одной 12-позиционной револьверной головкой, расположенной на наклонном суппорте, и с задней бабкой (отличие этих модификаций только в диаметре обрабатываемых заготовок); BDN160R-ZB с одной 16-позиционной револьверной головкой, расположенной на наклонном суппорте и двумя противоположно расположенными рабочими шпинделями.

Токарные станки DUO3030 и DUO4230 отличаются только диаметром обрабатываемых заготовок и числом позиций в револьверных головках. Они имеют по две револьверные головки, расположенные на наклонных суппортах, и второй противоположно расположенный рабочий шпindel (их схема аналогична схеме, приведенной на рис. 3.6).

Одношпиндельные токарные станки с ЧПУ с горизонтальной компоновкой шпинделя с одной или двумя револьверными головками (в патронном или центровом исполнении) с наклонной компоновкой суппортов выпускают многие зарубежные фирмы.

В табл. 3.32 и 3.33 приведены основные технические характеристики средних и крупных токарных станков с ЧПУ указанного типа.

В качестве примера в табл. 3.34–3.35 приведены основные технические характеристики фронтальных двухшпиндельных токарных станков с ЧПУ, выпускаемых фирмами Weisser, Pittler, Emag, Heiligenstaedt (Германия) и Minganti (Италия). На рис. 3.8 были показаны варианты компоновок суппортов станков, выпускаемых, в частности, фирмой Weisser.

На рис. 3.12 показаны схемы компоновок одно- и двухшпиндельных вертикальных токарных станков с ЧПУ для обработки заготовок в патроне (рис. 3.12, а—е) и в центрах (рис. 3.12, ж—и). На таких станках может быть установлено от одного до трех суппортов. Технические параметры станков данного типа, выпускаемых фирмами Minganti и Pittler приведены в табл. 3.36.

В табл. 3.37 приведены основные технические характеристики токарно-карусельных станков фирмы Berthiez (Франция).

Определенный интерес представляют двухшпиндельные токарные станки с горизонталь-

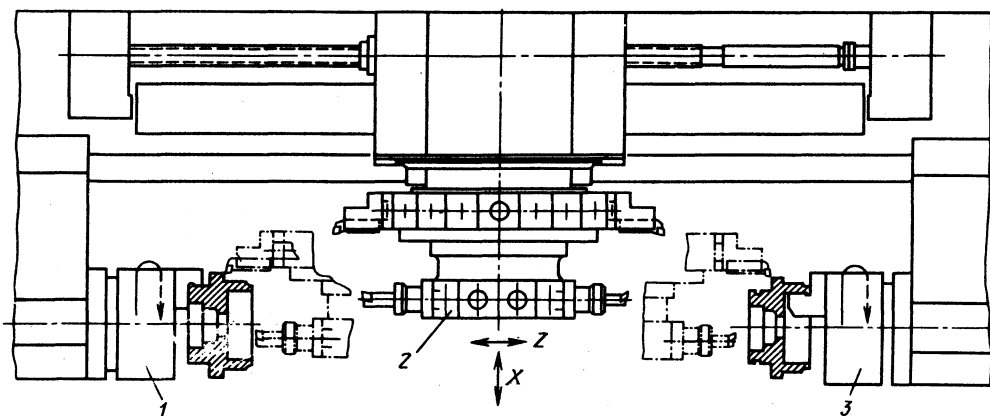


Рис. 3.10. Расположение шпинделей и двойной револьверной головки токарного станка с ЧПУ мод. Heunutwin 250 фирмы Heiligenstaedt (Германия)

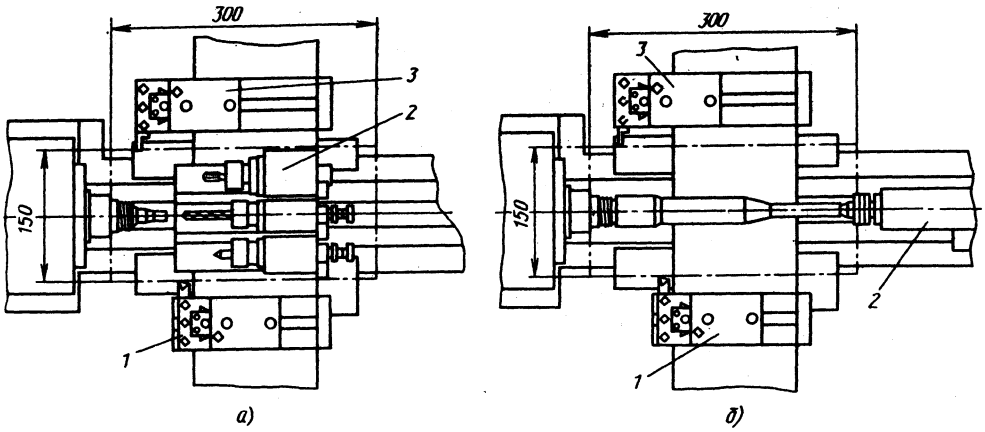


Рис. 3.11. Расположение суппортов токарного станка с ЧПУ мод. 102-CNC фирмы Schaublin (Швейцария)

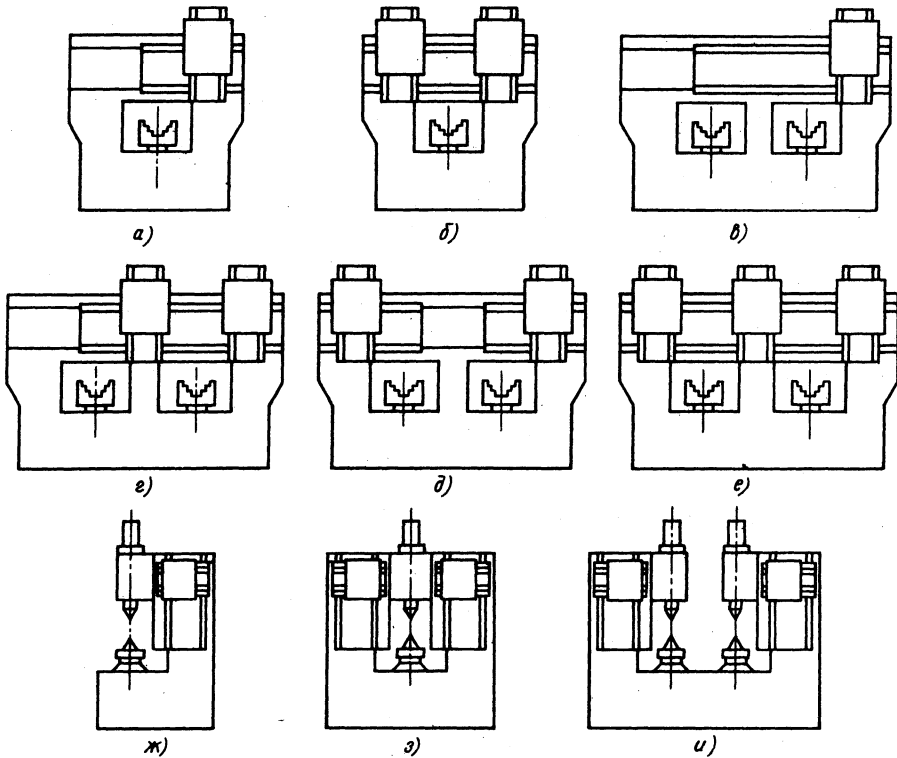


Рис. 3.12. Компонки вертикальных одно- и двухшпиндельных токарных станков с ЧПУ:
 а, б — одношпиндельные с одним и двумя суппортами; в, г, д, е — двухшпиндельные с одним, двумя и тремя суппортами; ж, з — одношпиндельные с одним и двумя суппортами; и — двухшпиндельный

3.30. Технические характеристики прецизионных токарных станков с ЧПУ фирмы Schaublin (Швейцария)

| Характеристика | Модель | | |
|---|---------------|-----------------|---------------------|
| | 102-CNC | 110-CNC | 130-CNC |
| Наибольший диаметр прутка, обрабатываемого в цанге, мм | 14,5 | 14,5; 19; 24 | 36 |
| Наибольший диаметр заготовки, устанавливаемой над суппортом, мм | 75 | 115 | 520 |
| Высота центров, мм | 102 | — | — |
| Наибольшее расстояние между центрами, мм | 300 | 300 | 300 |
| Мощность главного привода, кВт | 4 | 5,5 | 14 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 30 — 5000 | 30 — 6000 | 30 — 5000 |
| Наибольшее перемещение суппортов, мм: | | | |
| по оси X | 150 | 220 | 210 |
| по оси Z | 300 | 300 | 375 |
| Скорость подачи, мм/мин: | | | |
| по оси X | 0 — 2000 | 0 — 5000 | 0 — 6000 |
| по оси Z | 0 — 2000 | 0 — 5000 | 0 — 10 000 |
| Скорость быстрых перемещений суппортов, м/мин: | | | |
| по оси X | 4 | 6 | 6 |
| по оси Z | 5 | 10 | 12 |
| Дискретность перемещения, мм: | | | |
| по оси X | 0,001; 0,0005 | 0,0005; 0,00005 | 0,0005 (по радиусу) |
| по оси Z | 0,001; 0,0005 | 0,001; 0,0001 | 0,001 |
| Число позиций в revolverной головке | — | 8 | 12 |
| Масса, кг | 1100 | 1340 | 4000 |

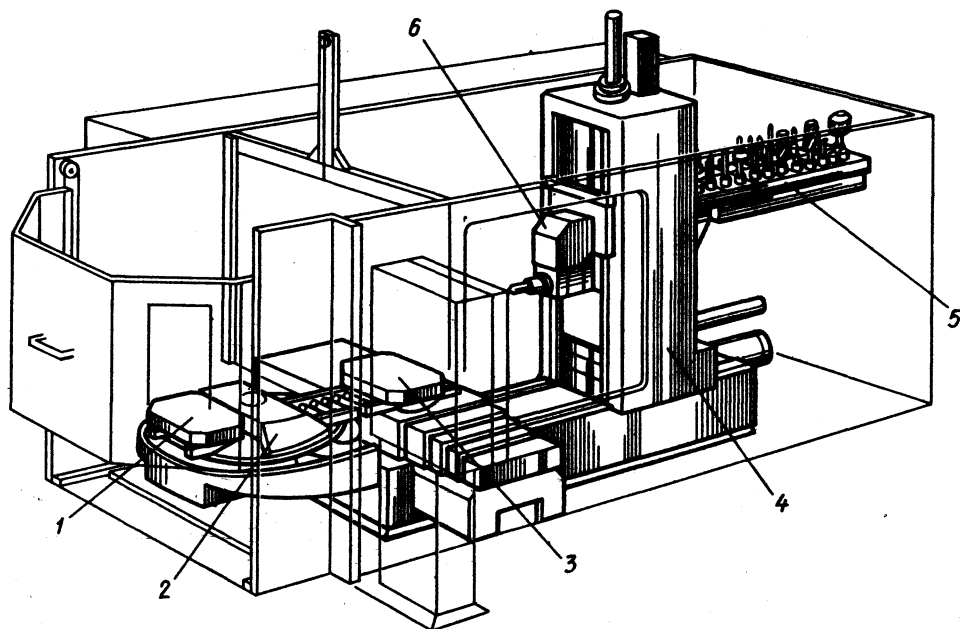


Рис. 3.13. Многоцелевой станок с ЧПУ мод. ВЕА2 фирмы Neller (Германия):
 1 — палета на поворотном столе; 2 — поворотный (перегрузочный) стол; 3 — палета в рабочей зоне станка;
 4 — подвижная колонна станка; 5 — инструментальный магазин; 6 — шпиндельная бабка

3.31. Технические характеристики прецизионных токарных станков с ЧПУ фирмы Voley (Германия)

| Характеристика | Модель | | |
|---|-------------------|------------|-----------------------------|
| | BKN100E | BDN160R-ZB | DUO3030, DUO4230 |
| Рабочий шпиндель левый: | | | |
| наибольший диаметр заготовки, обрабатываемой в цанге, мм | 30 | 42 | 30 (42) |
| диаметр зажимного патрона, мм | 100 — 130 | 140 | 130 (140) |
| мощность главного привода, кВт | 8,7 | 11 | 12 |
| частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 50 — 6300 | 50 — 6300 | 50 — 6300 |
| Рабочий шпиндель правый: | | | |
| наибольший диаметр заготовки, обрабатываемой в цанге, мм | 30 | 42 | 42 |
| диаметр зажимного патрона, мм | 70 | 70 | 70 |
| мощность главного привода, кВт | 4,4 | 4,4 | 6 |
| частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 1 — 3000 | 1 — 3000 | 1 — 4000 |
| Наименьшее перемещение суппорта, мм: | | | |
| по оси X | 170 | 120 | 170 |
| по оси Z | 200 | 350 | 230 |
| Наибольшее перемещение правого рабочего шпинделя, мм: | | | |
| по оси U | 170 | — | 205 |
| по оси W | 200 | 350 | 230 |
| Скорость подачи суппорта и правого рабочего шпинделя по осям X, Z, U, W, мм/мин | 1 — 1000 | 1 — 1000 | 1 — 1500 |
| Наибольшее перемещение задней бабки, мм | — | 100 | — |
| Число позиций в револьверной головке | Две головки по 12 | 16 | Две головки по 12 или по 16 |
| Масса станка, кг | 2300 | 3300 | 4300 |

ной соосной компоновкой шпинделей и с револьверными головками (см. рис. 3.9 и рис. 3.10). В табл. 3.38 приведены основные технические характеристики некоторых моделей указанных станков.

Необходимо отметить, что многие из рассмотренных токарных станков с ЧПУ приспособлены для создания на их базе РТК и для применения в ГПС.

Многоцелевые станки. Эта группа металлорежущих станков с ЧПУ предназначена для обработки деталей типа плит, фланцев и различных корпусных деталей. Многоцелевые станки различных типоразмеров выпускают многие зарубежные фирмы: Deckel, Hüller Hille, Heller, Ixion, Maho, Mauser, Scharmann, Steinel, Werner und Kolb (Германия), Dixi, Mikron SIP, Schaublin, Whali (Швейцария), Comau, Mandelli, Novar, Olivetti, Saimp (Италия), Cincinnati Milacron, Ex-Cell-0, Gidding Lewis, Kearney Trecker, Moore (США), Chiron, Hitachi Seiki, Makino, Mori Seiki, Tsugami, Yamazaki (Япония) и др.

Современный многоцелевой станок выполняет одновременно функции сверлильного, фрезерного и расточного станка (рис. 3.13). Технологические возможности и высокая степень

автоматизации этих станков обеспечиваются наличием трех и более независимо управляемых системой ЧПУ координатных перемещений рабочих органов, широкого диапазона бесступенчато регулируемых частот вращения шпинделя и подач рабочих органов, автоматической смены режущих инструментов и заготовок, накапливаемых в необходимых количествах в специальных магазинах и др.

В основном эти станки выпускают с горизонтальной компоновкой шпинделя, но изготавливают также станки с вертикальной компоновкой шпинделя. Некоторые фирмы, например фирма Mandelli (Италия), выпускают многоцелевые станки с двухпозиционными поворотными шпиндельными головками, что позволяет вести обработку как с вертикальной, так и с горизонтальной компоновкой шпинделя.

В табл. 3.39 приведены основные технические характеристики многоцелевых станков, выпускаемых различными фирмами.

Основные способы накопления и автоматической смены режущих инструментов и заготовок на многоцелевых станках, а также конструкции соответствующих механизмов рассмотрены во втором томе данного справочника.

Особенности компоновок и конструктивные

3.32. Технические характеристики токарных станков с ЧПУ с револьверными головками (с наклонными суппортами)

| Характеристика | Фирма и модель | | | | | | | |
|---|----------------|----------------------------------|---------------------|-------------|---------------|--------------|-------------------------|--|
| | MaHo Graziano | | Cincinnati Milacron | Monforts | Georg Fischer | | Okuma | |
| | GR300C | GR500C | CINTURN 1400 | MNC5 | NDM-16 | NDM-40 | ACTCH | |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | | | | | | | | |
| устанавливаемой над станиной | 370 | 650 | 483 | 500 | 500 | 620 | 540 | |
| устанавливаемой над суппортом | 310 | 430 | 318 | 280 | 300 | 410 | 390 | |
| Расстояние между центрами, мм | 655 | 1000 1500 2250 | — | — | — | — | 750 | |
| Наибольшая длина обтачивания, мм | — | — | — | 750 1250 | 500 1000 | 1300 2300 | 730 | |
| Диаметр зажимного патрона, мм | — | — | 203; 305 | — | — | — | — | |
| Мощность главного привода, кВт | 15 | 37; 53 | 22; 37; 60 | 34 | 40 | 30 | 22; 30 | |
| Наибольшая частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 5000 | 2500 | 5000 | 6000 | 4000 | 3200 | 3500 | |
| Перемещение суппортов, мм: | | | | | | | | |
| по оси X | 250 | 320 (верхний), 220 (нижний) | 200 | 220 | — | — | 245 | |
| по оси Z | 620 | 2340 (верхний), 1340 (нижний) | 610 | 840 | — | — | 750 | |
| Ход пиноли задней бабки, мм | 125 | 140 | — | — | 120 | 120 | — | |
| Число позиций в револьверной головке | 12 | Две по 12 | Две по 8 | Две по 12 | 12 | 12 | Верхняя 12, нижняя 8 | |
| Скорость быстрого перемещения суппорта, м/мин | 10 | 15 | — | 10 | 10 | 10 | — | |

| Характеристика | Фирма и модель | | | | | | | | | |
|---|----------------|------|-----------|-------|-----------|----------------------|------------|--------------|------|----------------|
| | Biglia | | Heid | | Heinemann | | | Voest-Alpine | | Heiligenstaedt |
| | B131/SI | B600 | S300 | DN300 | DN600 | MOC2000 | WNC500S-MT | WNC700S-MT | SUK | |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | 520 | 560 | 540 | 690 | 1230 | 870 | 540 | 750 | 650 | |
| устанавливаемой над станиной | — | — | — | 530 | 980 | 600 | 450 | 610 | 330 | |
| устанавливаемой над суппортом | 800 | 800 | — | — | — | — | 1000 | 1250 | 985 | |
| Расстояние между центрами, мм | 420 | 650 | 1820 | — | — | 1250 | — | — | 850 | |
| Наибольшая длина облачивания, мм | — | — | — | — | — | 1750 | — | — | — | |
| Диаметр зажимного патрона, мм | — | — | 315 | — | — | 3000 | 200 | 315 | 315 | |
| Мощность главного привода, кВт | 15 | 26 | 53 | 63 | 100 | 50 | 35; 60,5 | 60,5; 118 | 53 | |
| Наибольшая частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 4150 | 3200 | 4000 | 4000 | 1500 | 2800 | 6000 | 3150 | 5000 | |
| Перемещение суппортов, мм: | 190 | 225 | — | — | — | Верхний 520 | 305 | 480 | — | |
| по оси X | — | — | — | — | — | Нижний 310 | 1345 | 1808 | — | |
| по оси Z | 420 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| Ход пиноли задней бабки, мм | — | — | — | 150 | 150 | — | 125, 160 | 160, 220 | 140 | |
| Число позиций в револьверной головке | 12 | 12 | Две по 12 | 12 | 10 | Верхняя 12, нижняя 8 | Две по 12 | Две по 12 | 12 | |
| Скорость быстрого перемещения суппорта, м/мин | 12 | 12 | — | 10 | 10 | — | — | — | 15 | |

3.33. Технические характеристики токарных станков с ЧПУ с револьверными головками (с наклонными суппортами)

| Характеристика | Фирма и модель | | | | Index |
|---|----------------|----------|------------|-----------|---------|
| | Golchester | | Ramo | GSC42* | |
| | CNC350 | CNC6000 | | | |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | | | | | |
| устанавливаемой над станиной | 400 | 760 | 310 | — | — |
| устанавливаемой над суппортом | 290 | 520 | 160 | — | — |
| Наибольшая длина обрабатываемой, мм | 350 | — | — | — | 1200 |
| Диаметр отверстия шпинделя, мм | 58 | 168 | 42 | — | 65 |
| Диаметр зажимного патрона, мм | — | — | 132 | 100 | 250 |
| Мощность главного привода, кВт | 5,5; 7,5 | 26 | 10 | 10,5 | 42 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 120—6000 | 100—1000 | 5000, 8000 | 31,5—6300 | 50—5000 |
| Перемещения суппорта, мм: | | | | | |
| по оси X | — | — | 150 | 100 и 80 | 20 |
| по оси Z | — | — | 500 | 200 и 140 | 200 |
| Число позиций в револьверной головке | 12 | — | — | Две по 12 | 8 |
| Скорость быстрого перемещения суппортов, м/мин: | | | | | |
| по оси X | 10 | 10 | — | — | 7 |
| по оси Z | 15 | 10 | — | — | 7 |

* Модель имеет две головки.

| Характеристика | Фирма и модель | | | | | |
|---|------------------------|-----------|---------|--------------|-------------|-----------|
| | Traub | | | Gildemeister | | |
| | TNA480D | TNS30D | TNS60 | TND300 | N.E.F. CT40 | GT50 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм: | | | | | | |
| устанавливаемой над станиной | 660 | 390 | — | 400 | 400 | — |
| устанавливаемой над суппортом | 345 | 200 | 450 | 170 | 225 | — |
| Наибольшая длина облачивания, мм | 1000 | 220 | 490 | 500 | 600; 1000 | — |
| Диаметр отверстия шпинделя, мм | — | 30 | 60/65 | 42 | 72 | 50 |
| Диаметр зажимного патрона, мм | 315 | 140 | 200 | 160/175 | — | 160 |
| Мощность главного привода, кВт | 34; 41 | 16; 24,6 | 19; 22 | 18 | 22 | 12 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 4000 | 8000 | 10—4000 | 56—5600 | 20—4000 | 4500 |
| Перемещения суппорта, мм: | | | | | | |
| по оси X | 285 | 140 | 168 | 180 | 260 | 450 |
| по оси Z | 1070 | 220 | 490 | 550 | 640 | Две по 12 |
| Число позиций в револьверной головке | Первая 14, вторая 8 | Две по 12 | 12 | 12 | 12 | |
| Скорость быстрого перемещения суппортов, м/мин: | | | | | | |
| по оси X | 10 | 16 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| по оси Z | 15 | 16 | 15 | 15 | 10 | 15 |

3.34. Технические характеристики фронтальных одно- и двухшпиндельных токарных станков «Frontog» с ЧПУ фирмы Weisser (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | | | |
|--|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-----------|--|
| | 16-2 | 25-2 | 30-2 | 21Q-2 | 23Q-2 | 27Q-2 | 200-2 | |
| Наибольший диаметр заготовки, устанавливаемой на станке, мм | 520 | 575 | 575 | 310 | 440 | 550 | — | |
| Наибольший диаметр и длина обрабатываемой детали, мм: | | | | | | | | |
| при загрузке вручную | 200 × 100 | 300 × 150 | 450 × 150 | 220 × 100 | 250 × 100 | 380 × 150 | — | |
| при автоматической загрузке | 180 × 80 | 300 × 120 | 360 × 150 | 210 × 80 | 230 × 80 | 320 × 120 | 250 × 120 | |
| Диаметр зажимного патрона, мм | 160, 200 | 250, 315 | 315, 400 | 200, 250 | 250, 315 | 315, 400 | 250; 315 | |
| Расстояние между шпинделями, мм | 270 или 450 | 450 или 850 | 450 или 850 | 320 | 450 | 450 или 550 | — | |
| Мощность главного привода, кВт | 8,5; 19; 25 | 33,5; 45; 58 | 45; 58 | 19; 25; 33,5 | 25; 33,5; 45 | 45; 58 | 33,5; 25 | |
| Наибольшая частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 6000 | 3500 | 2000 | 5600 | 4000 | 3000 | — | |
| Наибольшее перемещение суппорта, мм: | | | | | | | | |
| по оси X | 280 | 300 | 350 | 400 | 400 | 550 | 200 | |
| по оси Z | 280 | 350 | 550 | 250 | 250 | 350 | 280 | |
| Скорость быстрого перемещения суппорта по осям X, и Z, м/мин | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |

3.35. Технические характеристики фронтальных токарных станков с ЧПУ

| Характеристика | Фирма и модель | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------|---------------|---------------|----------------|-------|----------|----------|
| | Pittler | | Emag | | Heyligenstaedt | | Minganti | |
| | Petra 1 | Petra 2 | MSC12 | MSC22 | FD180 | FD250 | TS6 | TS8 |
| Наибольший диаметр заготовки, устанавливаемой на станке, мм | 295 | 600 | 260 | 410 | 200 | 280 | 250 | 350 |
| Диаметр зажимного патрона, мм | 130; 160; 200 | 250; 315; 400; 500 | 160; 200; 250 | 250; 315; 400 | 200 | 280 | 160; 250 | 315; 400 |
| Расстояние между шпинделями, мм | 300 или 350 | До 1300 | 270 или 540 | 420 или 840 | — | — | 700 | 870 |
| Мощность главного привода (один шпиндель), кВт | До 45 | 55 | 25 | 45 | 60 | 75 | 30 | 45 |
| Наибольшая частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 6300 | 4000 | 5000 | 3200 | 6300 | 5600 | 6000 | 3200 |
| Наибольшее перемещение суппортов, мм: | | | | | | | | |
| по оси X | 315 | 500 | 410 | 710 | 370 | 370 | 330 | 380 |
| по оси Z | 280 | 400 | 270 | 355 | 300 | 300 | 330 | 380 |
| Скорость быстрого перемещения суппортов, м/мин | 12 | 12 | 15 | 10 | 14 | 14 | 15 | 15 |

3.36. Технические характеристики вертикальных одно- и двухшпиндельных токарных станков с ЧПУ

| Характеристика | Фирма и модель | | | | |
|---|-----------------|---------------|--------------|--------------|---------|
| | Minganti | | Pittler | | |
| | MV512 (MV524) | MV812 (MV824) | PV500 | PV800 | PV1500 |
| Число шпинделей | 1 (2) | 1 (2) | 1 или 2 | 1 или 2 | 1 или 2 |
| Наибольший диаметр заготовки, устанавливаемой на станке, мм | 600 | 900 | 700 | 1000 | 1500 |
| Мощность главного привода, кВт | 36; 45 | 45; 75 | 37; 55 | 55; 90 | 90; 150 |
| Наибольшая частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 2500 | 1000 | 2500 | 1600 | 630 |
| Наибольшее перемещение суппортов, мм: | | | | | |
| по оси X | 510 | 720 (510) | 500 или 1800 | 700 или 2500 | 700 |
| по оси Z | 460 | 615 (460) | 450 | 630 | 800 |
| Число позиций в револьверной головке | 4; 6; 8; 12 | | 4; 6; 8; 12 | | 4; 5 |
| Вместимость инструментального магазина | 16; 24; 60; 240 | | | | |

особенности многоцелевых станков, на базе которых строятся ГПМ и ГПС, рассмотрены в третьем томе данного справочника.

Шлифовальные и заточные станки. Зарубежные фирмы выпускают широкую гамму шлифовальных станков (плоско- и круглошлифовальные только для наружного или внутреннего шлифования, а также универсальные для обоих видов обработки) и заточных (для заточки режущих инструментов).

Эти станки выпускают в универсальном исполнении с ручным управлением, универсальном с управлением системой ЧПУ и в специальном исполнении. Некоторые фирмы, используя возможности систем ЧПУ, выпускают круглошлифовальные станки с двумя крестовыми суппортами со шлифовальными бабками для наружного и внутреннего шлифования (рис. 3.14) с управлением каждого суппорта по двум осям координат. При этом привод

3.37. Технические характеристики токарно-карусельных станков с ЧПУ фирмы Berthiez (Франция)

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| | TFM 100 | TFM 125 | TFM 160 | TFM 200 | TFM 250 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 1240 | 1550 | 1880 | 2300 | 2800 |
| Наибольшая высота заготовки, мм | 1000 | 1300 | 1600 | 1800 | 2300 |
| Диаметр карусели (стола), мм | 1050 | 1300 | 1650 | 2050 | 2550 |
| Частота вращения карусели, мин ⁻¹ | 2—250 или 3,15—400 | 1,6—200 или 2,5—315 | 1,25—160 или 2—250 | 1—125 или 1,6—200 | 0,8—100 или 1,25—160 |
| Мощность главного привода, кВт | 37 | 37 | 37 | 55 | 55 |
| Скорость подачи суппортов, мм/мин | 0,1—1000 | | | | |
| Поперечное сечение ползуна (ширина × длина), мм | 190 × 210 | 190 × 210 | 190 × 210 | 224 × 224 | |
| Вертикальное перемещение ползуна, мм | 1000 | | | 1250 | |
| Масса, кг | 15 000 | 18 000 | 23 000 | 32 000 | 45 000 |
| Габаритные размеры (ширина × × длина), мм | 3850 × 4300 | 4150 × 4400 | 4600 × 4700 | 6750 × 4700 | 7250 × 5100 |

Рис. 3.14. Перемещения рабочих органов в круглошлифовальных станках с ЧПУ

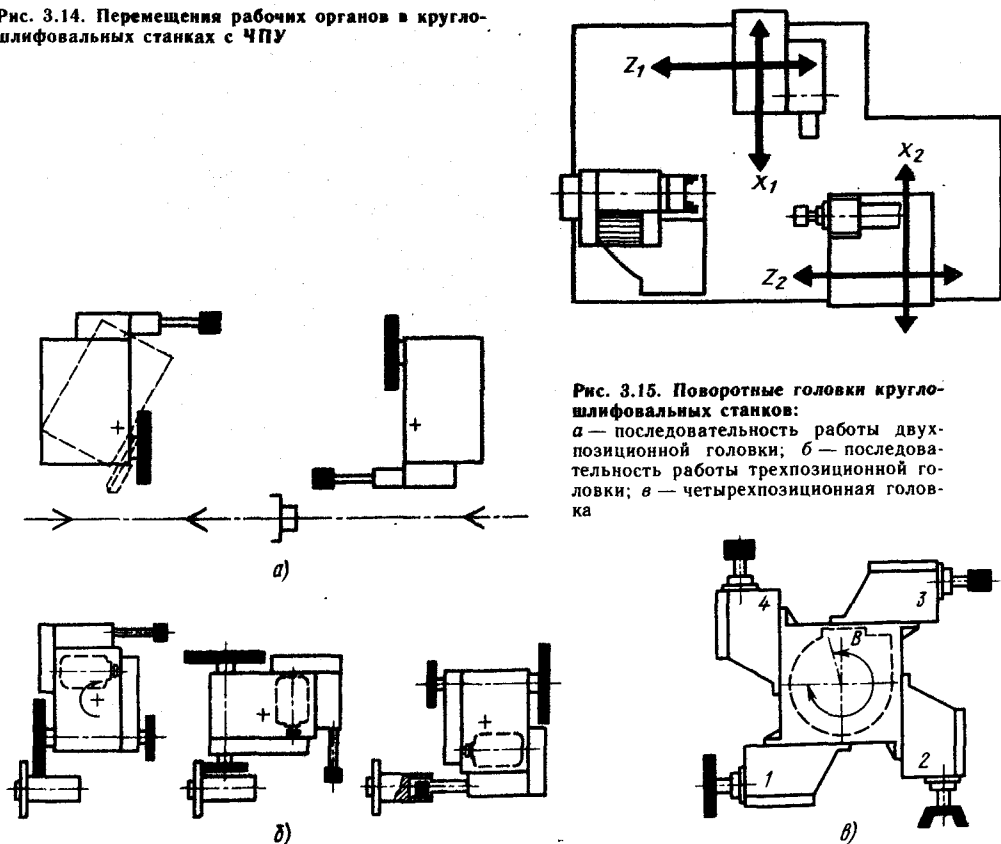


Рис. 3.15. Поворотные головки круглошлифовальных станков: а — последовательность работы двухпозиционной головки; б — последовательность работы трехпозиционной головки; в — четырехпозиционная головка

3.38. Технические характеристики двухшпиндельных токарных станков с ЧПУ (с соосной компоновкой шпинделей)

| Характеристика | Фирма и модель | | |
|---|----------------|-------------|-------------------------------------|
| | Biglia | | Heyligenstaedt |
| | B2M | B2M-4A | «Heynutwin 250» |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 355 | 355 | 280 |
| Наибольшая длина обработки, мм | 650 | — | — |
| Расстояние между шпиндельными бабками, мм | 1736 | 2588 | — |
| Мощность главного привода, кВт | 24 | 30 | 53 |
| Частота вращения шпинделей, мин ⁻¹ | 60 — 3500 | 60 — 2200 | До 5000 |
| Наибольшее перемещение суппорта, мм: | | | |
| по оси X | 225 | 225 | — |
| по оси Z | 1050 | 610 | — |
| Скорость быстрого перемещения суппортов, м/мин: | | | |
| по оси X | 10 | 10 | До 24 |
| по оси Z | 12 | 12 | |
| Число позиций в revolverных головках | Две по 8 | Две по 12 | 20 на наружной, 10 на внутренней |
| Габаритные размеры (длина × ширина), мм | 5700 × 2400 | 6600 × 2400 | 3840 × 2300 |
| Масса, кг | 5200 | 9800 | — |

хода каждого суппорта осуществляется от индивидуальных электродвигателей, управляемых системой ЧПУ.

Отличительной особенностью шлифовальных станков является применение двух-, трех- и четырехпозиционных поворотных головок с инструментами (шлифовальными кругами) для

наружного и внутреннего шлифования (рис. 3.15).

Для снижения уровня вибраций и потерь на трение на шлифовальных станках ряд фирм изготавливает станину станка из гранитана S100 и делает покрытие направляющих гранитаном S200.

3.39. Технические характеристики многоцелевых станков

| Характеристика | Фирма и модель | | | | | |
|---|----------------|---------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| | Mori Seiki | Hitachi Seiki | Whali | Scharmann | Huifer | Hille |
| | MH-50 | HC500 | 53 | Solon I | nb-h90 | nb-htwin |
| Размеры рабочей зоны, мм: | | | | | | |
| перемещение по X | 800 | 710 | 700 | 800 | 630 | 800 |
| перемещение по Y | 650 | 630 | 500 | 650 | 500 | 500 |
| перемещение по Z | 750 | 560 | 700 | 650 | 580 | 630 |
| Размеры палеты (или стола), мм | 500 × 500 | 500 × 500 | 400 × 400; 500 × 400 | 650 × 650 | 400 × 500 | 500 × 630 |
| Мощность главного привода, кВт | 15 | — | 10 | 20 | 13 | 27 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 6000 | 20 — 3600 | 7000 | 14 — 3500 | 25 — 6000 | 28 — 6000 |
| Скорость рабочей подачи по трем осям, мм/мин | — | — | — | 1 — 6000 | 1 — 10 000 | 1 — 10 000 |
| Скорость быстрых перемещений рабочих органов, м/мин | — | — | 15 | 12 | 22 | 15 |
| Число инструментов в магазине | 60 — 200 | 40 | 24 — 192 | 40; 60; 80 | 99 — 203 | 40 |
| Время смены инструмента (от реза до реза), с | — | — | 7 | — | 8 | 10 |

| Характеристика | Фирма и модель | | | | | |
|---|----------------|-----------------|-----------|-----------|---------|-----------|
| | Mikron | | Dixi | Schaublin | | Saimp |
| | WF21D | WF51D | 280CNC | 32CNC | 34CNC | Mectra 6 |
| Размеры рабочей зоны, мм: | | | | | | |
| перемещения по X | 450 | 710 | 800 | 520 | 700 | 820 |
| перемещение по Y | 400 | 500 | 800 | 320 | 500 | 760 |
| перемещение по Z | 400 | 460 | 800 | 320 | 500 | 760 |
| Размеры палеты (или стола), мм | 350 × 700 | 500 × × 1000 | 630 × 630 | — | — | 630 × 630 |
| Мощность главного привода, кВт | 3,3; 4 | 4,5; 6 | 18,5 | 5 | 5 | 18; 22 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 40—4000 | 40—4000 | 10—3000 | 30—7000 | 30—7000 | 20—4500 |
| Скорость рабочей подачи по трем осям, мм/мин | 2—3000 | 2—3000 | — | 0—5000 | 0—5000 | 5—6000 |
| Скорость быстрых перемещений рабочих органов, м/мин | 6 | 6 | 10 | 10 | 10 | 15 |
| Число инструментов в магазине | 40 | 40 | — | 32 | 32; 64 | 50; 100 |
| Время смены инструмента (от реза до реза), с | — | — | — | 8 | 8 | 13 |

Продолжение табл. 3.39

| Характеристика | Фирма и модель | | | | |
|---|-------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | Werner und Kolb | Novar | Heller | | Ixon |
| | TC630 | KBF1000 | BEA05 | BEA2 | 30CNCW |
| Размеры рабочей зоны, мм: | | | | | |
| перемещения по X | 1000 | 2500 | 500 | 800 | 600 |
| перемещение по Y | 800 | 1000 | 400 | 630 | 350 (400) |
| перемещение по Z | 800 | 1400 (1900) | 560 | 630 | 600 (700) |
| Размеры палеты (или стола), мм | 630 × 630; 630 × 800 | 3000 × 1000 | 400 × 400 | 500 × 630 | — |
| Мощность главного привода, кВт | 32 | 18 | 36 | 36 | 10,8 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 20—5000 | 10—2250 | 45—6000 | 45—4000 | 40—7000 |
| Скорость рабочей подачи по трем осям, мм/мин | 0—10 000 | 10—2000 | 0—10 000 | | — |
| Скорость быстрых перемещений рабочих органов, м/мин | 15 | 7,5 | 12 | 15 | — |
| Число инструментов в магазине | 50; 60; 72 | 40 | 40 | 40 | 12; 24 |
| Время смены инструмента (от реза до реза), с | 11,5 | — | 6 | 8 | 9 |

Плоскошлифовальные станки, включая и профишлифовальные, выпускают фирмы Naupli—Blohm (Германия), Jones—Shipman (Англия), Jng (Германия), ELB—Schliff (Германия), Aba Werke (Германия), Megerle (Швейцария), Discus (Германия) и др. Ряд фирм, в частности фирмы Waldrich—Coburg (Германия), Favretto (Италия) и другие, выпускают продольно-

шлифовальные станки для обработки направляющих металлорежущих станков.

В табл. 3.40, 3.41 и 3.42 приведены технические характеристики плоскошлифовальных станков.

Круглошлифовальные станки выпускают фирмы Fritz Studer (Швейцария), Schaudt (Германия), Overbeck (Германия), Fortuna

| Характеристика | Фирма и модель | | | | |
|---|------------------------|----------|----------|------------|---------|
| | Cincinnati Milacron | Deckel | | Mandelli | Maho |
| | TC-30 | DC-30 | DC-55 | Mandelli 7 | MC50S |
| Размеры рабочей зоны, мм: | | | | | |
| перемещения по X | 1000—1200 | 500 | 1000 | 1000 | 600 |
| перемещения по Y | 1000—1500 | 400 | 800 | 800 | 400 |
| перемещения по Z | 1000 | 500 | 800 | 850 (1050) | 500 |
| Размеры палеты (или стола), мм | — | 400×400; | 630×630; | 630×630; | 500×400 |
| | | 400×500 | 630×800 | 630×800 | |
| Мощность главного привода, кВт | 22,5 | 11,8 | 35 | 30 | 15 |
| Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 20—4000 | 1—7000 | 1—6000 | 30—6000 | 20—8000 |
| Скорость рабочей подачи по трем осям, мм/мин | 10—10 000 | 1—4000 | 1—20 000 | 10—18 000 | 1—6000 |
| Скорость быстрых перемещений рабочих органов, м/мин | 12 | 15 | 20 | 18 | 15 |
| Число инструментов в магазине | 60—140 | 40—148 | 40—160 | 40—160 | 62; 120 |
| Время смены инструмента (от реза до реза), с | 15 | — | — | — | — |

3.40. Технические характеристики плоскошлифовальных станков фирмы Jones Shipman (Англия)

| Характеристика | Модель | | |
|---|---------------|---------------|---------------|
| | 1400X | 540L | «Format 5CNC» |
| Наибольшая длина шлифования, мм | 609 | 457 | 457 |
| Наибольшая ширина шлифования, мм | 200 | 152 | 150 |
| Расстояние между осью шпинделя и поверхностью стола, мм | 385 | 100 | 400 |
| Размеры шлифовального круга (наружный диаметр × ширина × диаметр посадочного отверстия), мм | 250 × 25 × 76 | 200 × 25 × 32 | 200 × 25 × 32 |
| Дискретность системы управления, мм | — | — | 0,001 |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 2,2 | 1,5 | — |

(Германия), Tschudin (Швейцария), Kellenberger (Швейцария), Wotan (Германия) и др.

Фирма Fritz Studer (Швейцария) выпускает гамму круглошлифовальных станков S35, S40-2, S40-4, S45-4, S45-6 (с четырехпозиционной поворотной головкой) для наружного и внутреннего шлифования и S50-4 для наружного, внутреннего и торцового шлифования. В табл. 3.43 приведены технические характеристики круглошлифовальных станков данной фирмы, на которых можно выполнять наружное и внутреннее шлифование при применении поворотных шлифовальных головок (см. рис. 3.15).

Технические характеристики круглошлифовальных станков фирмы Schaudt (Германия) приведены в табл. 3.44.

Фирма Overbeck (Германия) выпускает прецизионные круглошлифовальные станки серии R для наружного шлифования, серии RV для наружного и внутреннего шлифования (табл. 3.45), серии RS с угловой (30°) подачей шлифовального круга для одновременного шлифования цилиндрической и торцевой поверхностей (табл. 3.46), внутришлифовальные станки серии I (табл. 3.47) и другие, в том числе и специального исполнения.

Фирма Tschudin (Швейцария) выпускает гамму прецизионных круглошлифовальных станков (табл. 3.48), а также бесцентровошлифовальных станков для мелких заготовок ESO-100 и ESO-400-CNC с автоматической подачей и отводом деталей и др. Технические характеристики прецизионных круглошлифо-

3.41. Технические характеристики плоскошлифовальных станков фирмы Haini Blohm (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | | | |
|---|-------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------------|----------------|
| | «Blohm 306» | «Blohm 309» | «Blohm 310/3» | «Blohm 315/3» | «Blohm 610/3» | HFS204 | HFS6V | HFS15V |
| Наибольшая длина шлифования, мм | 600 | 900 | 1000 | 1500 | 1000 | 450 | 600 | 1500 |
| Наибольшая ширина шлифования, мм | 200 | 200 | 400 | 400 | 400 | 230 | 400 | 400 |
| Рабочая площадь стола (ширина × длина), мм | 1020 × 300 | 1320 × 300 | 1600 × 300 | 2100 × 300 | 1600 × 600 | 760 × 200 | 1020 × 300 | 2170 × 300 |
| Расстояние между осью шпинделя и поверхностью стола, мм | 800 | 800 | 650 | 650 | 650 | 520 | 800 | 775 |
| Размеры шлифовального круга (наружный диаметр × ширина × диаметр посадочного отверстия) | | 350 × 50 × 127 | | 400 × 80 × 203 | | 225 × 25 × 51 | | 350 × 50 × 127 |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 18 | 18 | 18,5 | 18,5 | 30 | 2,2 | 11 | 11 |
| Масса, кг | 3300 | 3900 | 6500 | 7700 | 9200 | 2100 | 3300 | 5300 |

Примечание. Станки HFS204, HFS6V и HFS15V с ручным управлением, остальные станки с ЧПУ.

3.42. Технические характеристики плоско- и профишлифовальных станков фирмы ELB-Schliff (Германия)

| Характеристика | Модель | | | |
|----------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| | SWN | SWBEO | SWBD | SWDE |
| Длина шлифуемой поверхности, мм | 500 — 1000 | 600 — 5000 | 1200 — 1500 | 1000 — 5000 |
| Ширина шлифуемой поверхности, мм | 375 | 550 | 650 | 750 — 900 |

Примечание. Станки SWDE предназначены для шлифования направляющих.

3.43. Технические характеристики круглошлифовальных станков с ЧПУ для наружного и внутреннего шлифования фирмы Fritz Studer (Швейцария)

| Характеристика | Модель | |
|---|----------------|-----------------|
| | S35 | S40-4 |
| Высота центров, мм | 175 | 125, 175, 225 |
| Расстояние между центрами, мм | 1000 | 650, 1000, 1600 |
| Наибольшая масса заготовки, устанавливаемой в центрах, кг | 130 | 130 |
| Наибольший диаметр шлифуемой поверхности, мм | 300 | — |
| Наибольшая длина шлифуемой поверхности, мм | 540 | — |
| Наибольшее перемещение, мм: | | |
| продольное по оси Z | 650 | — |
| поперечное по оси X | 267 | 275 |
| Дискретность перемещений, мм: | | |
| по оси Z | 0,0005 | 0,001 |
| по оси X | 0,00025 | 0,001 |
| Скорость перемещений, мм/мин: | | |
| по оси Z | 0,015 — 10 000 | 0,01 — 10 000 |
| по оси X | 0,0075 — 5000 | 0,01 — 5000 |
| Размеры шлифовального круга (наружный диаметр × ширина × диаметр посадочного отверстия), мм | 500 × 80 × 203 | 400 × 80 × 127 |
| Частота вращения шлифовального круга, мин ⁻¹ | | 1670 |
| Диапазон частот вращения заготовки, мин ⁻¹ | | 30 — 750 |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 7,5 | 5,5 |

3.44. Технические характеристики круглошлифовальных станков фирмы Schaudt (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|--------|-----|-----|-----|----------|
| | A501 | PS4 | PS5 | T3U | PF43 |
| Высота центров, мм | 180 | 150 | 180 | — | 150; 180 |
| Наибольшая длина шлифуемой поверхности, мм | 1500 | 960 | 880 | 530 | 1750 |
| Наибольшая масса заготовки, устанавливаемой в центрах, кг | 400 | 250 | 600 | 50 | 300 |
| Диаметр шлифовального круга, мм | 500 | 750 | 900 | 400 | 500 |
| Ширина шлифовального круга, мм | 80 | 125 | 125 | 80 | 100 |
| Наибольшее поперечное перемещение шлифовальной бабки, мм | 300 | 295 | 425 | 290 | 320 |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 7,5 | 7,5 | 15 | 9,5 | 11 |

3.45. Технические характеристики шлифовальных станков фирмы Overbeck (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | |
|--|--------|------|------|----------|---------|---------|
| | 250I | 400I | 600I | 600I1500 | 410ICNC | 610ICNC |
| Наибольшая длина заготовки, мм | 250 | 250 | 350 | 1500 | 400 | 600 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 140 | 200 | 300 | 240 | 300 | 500 |
| Наибольший диаметр шлифуемой поверхности, мм | 90 | 140 | 250 | 200 | 250 | 460 |
| Наибольшая длина шлифуемой поверхности, мм | 160 | 160 | 250 | 250 | 200 | 300 |
| Наибольшая масса заготовки, кг | 15 | 25 | 50 | — | 170 | 280 |

3.46. Технические характеристики прецизионных круглошлифовальных станков фирмы Overbeck (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | | |
|--|--------|------|---------|----------|-------|-------|-------|
| | 250R | 400R | 600RCNC | 1040RCNC | 250RU | 400RU | 600RU |
| Наибольший диаметр заготовки, зажимаемой в патроне, мм | — | — | — | — | 100 | 100 | 180 |
| Наибольшая длина заготовки, мм | 280 | 430 | 650 | 1050 | 280 | 430 | 650 |
| Наибольший диаметр шлифуемой поверхности, мм | 100 | 100 | 190 | 250 | 100 | 100 | 180 |
| Наибольшая длина шлифуемой поверхности, мм | 250 | 400 | 600 | 1000 | 250 | 400 | 630 |
| Наибольшая масса заготовки, кг: | | | | | | | |
| зажимаемой в центрах | 12 | 12 | 120 | 200 | 12 | 12 | 50 |
| устанавливаемой в патроне | — | — | — | — | 6 | 6 | 30 |

3.47. Технические характеристики круглошлифовальных станков с подачей круга под углом фирмы Overbeck (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | | |
|--|--------|-------|-------|--------|----------|-----------|-----------|
| | 250RS | 400RS | 600RS | 1000RS | 600RSCNC | 1040RSCNC | 2010RSCNC |
| Наибольшая длина заготовки, мм | 280 | 430 | 650 | 1050 | 650 | 1050 | 2000 |
| Наибольший диаметр шлифуемой поверхности, мм | 100 | 100 | 180 | 180 | 180 | 250 | 250 |
| Наибольшая длина шлифуемой поверхности, мм | 250 | 400 | 630 | 1000 | 600 | 1000 | 2000 |
| Наибольшая ширина шлифовального круга, мм | 65 | 65 | 80 | 80 | 100 | 125 | 125 |

3.48. Технические характеристики прецизионных круглошлифовальных станков фирмы Tschudin (Швейцария)

| Характеристика | Модель | | |
|---|----------------|----------|----------|
| | HTG310 | HTG410U | HTG610U |
| Высота центров, мм | 100 | 150 | 150 |
| Расстояние между центрами, мм | 340 | 480 | 680 |
| Размеры шлифовального круга (наружный диаметр × ширина × диаметр посадочного отверстия), мм | 350 × 50 × 127 | | |
| Частота вращения заготовки, мин ⁻¹ | 50 — 500 | 65 — 500 | 65 — 500 |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 3 | 3 | 3 |

важных станков, выпускаемых фирмой Kellenberger (Швейцария) и фирмой Fortuna (Германия), приведены соответственно в табл. 3.49 и 3.50.

Фирма Wotan (Германия) выпускает тяжелые внутришлифовальные станки для обработки внутренних, наружных и торцовых поверхностей (кроме мод. К) (табл. 3.51). Компонентные решения данных станков с указанием возможных перемещений рабочих органов показаны на рис. 3.16.

Фирма Sielemann (Германия), выпускает широкоуниверсальные шлифовальные станки с ЧПУ с поворотным столом (табл. 3.52). Конструктивно шлифовальная бабка этих станков может быть выполнена в разных вариантах (рис. 3.17), в результате чего станки имеют широкие технологические возможности (рис. 3.18).

Основные технические характеристики заточных станков с ЧПУ фирмы Walter (Австрия) приведены в табл. 3.53.

Зубо- и резьбообрабатывающие станки. Эту группу станков выпускают многие зарубежные фирмы: Gleason (США), Lorenz, Liebherr, Pfauter, Hurth, Klingelberg (Германия), Mikron, Oerlikon, Wahli (Швейцария) и др.

Как в нашей стране, так и за рубежом выпускают широкую гамму зубофрезерных, зубодолбежных и зубострогальных станков для изготовления цилиндрических и конических зубчатых колес с прямыми, косыми и спиральными зубьями. Многие фирмы выпускают данные станки с ЧПУ, где все движения рабочих органов производятся от индивидуальных электродвигателей с управлением системой ЧПУ.

3.49. Технические характеристики прецизионных круглошлифовальных станков фирмы Kellenberger (Швейцария)

| Характеристика | Модель | | | | | | |
|---|----------------|-------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | 600U | 1000U | UR125 × 600CNC | UR125 × 1000CNC | UR125 × 1500CNC | R125 × 600CNC | R125 × 1000CNC |
| Высота центров, мм | 125 | 250 | 125 | | | | |
| Расстояние между центрами, мм | 600 | 1000 | 600 | 1000 | 1500 | 600 | 1000 |
| Размеры шлифовального круга (наружный диаметр × ширина × диаметр посадочного отверстия), мм | 400 × 50 × 127 | | 400 × 63 × 127 | | | 500 × 100 × 203 | |
| Наибольшие перемещения, мм: шлифовальной бабки | 245 | | 270 | | | | |
| стола | 900 | 1300 | 600 | 100 | 1500 | 600 | 1000 |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 3 | | 4,4 | | | 7,5 | |

3.50. Технические характеристики круглошлифовальных станков фирмы Fortuna (Германия)

| Характеристика | Модель | | |
|---|-----------------|------------------|------------------------------|
| | FM41 | FM43 | FM45 |
| Высота центров, мм | 135 | 175, 225 | 225 |
| Расстояние между центрами, мм | 1000, 1600 | 1000, 1600, 2000 | 1000, 1600, 2500, 3000 |
| Масса заготовки, устанавливаемой в центрах, кг | 100 | 300 | 800 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 270 | 350; 450 | 450 |
| Размеры шлифовального круга (наружный диаметр × ширина × диаметр посадочного отверстия), мм | 600 × 100 × 203 | 600 × 150 × 304 | 750 × 250 × 304 |
| Наибольшие перемещения, мм: шлифовальной бабки | | 350 | 450 |
| стола с заготовкой | 1140, 1740 | 1140, 1740, 2140 | 1240, 1840, 2240, 2730, 3240 |
| Скорость подачи шлифовальной бабки, мм/мин | | 0,01 — 10 000 | |
| Частота вращения шпинделя с заготовкой, мин ⁻¹ | 33 — 833 | 5 — 800 | 5 — 600 |
| Скорость подачи стола с заготовкой, мм/мин | | 0,01 — 10 000 | |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 11 | 18,5 | 22 |

3.51. Технические характеристики внутришлифовальных станков типа SX2 фирмы Wotan (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|----------------|----------------|-------------|--------------|----------------------|
| | K | G | U | R | L |
| Наибольший диаметр обрабатываемой заготовки, мм | 500 | 600 и более | 700 и более | 1100 и более | 500 и более |
| Наибольший диаметр обрабатываемого отверстия, мм | 400 | 600 | 600 | 900 | 400 |
| Наибольший диаметр наружной поверхности заготовки, мм | — | 600 | 700 | 1100 | — |
| Ход стола, мм | 500, 800, 1300 | 500, 800, 1300 | | 800 | 500, 800, 1300, 1600 |
| Длина шлифуемого отверстия, мм | 250, 500, 800 | 250, 500, 800 | | 500 | 250, 500, 800, 1100 |
| Угол поворота шпиндельной бабки с заготовкой, ° | 25 | 30 | 90 | 30 | 10 |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | | | 15 | | |

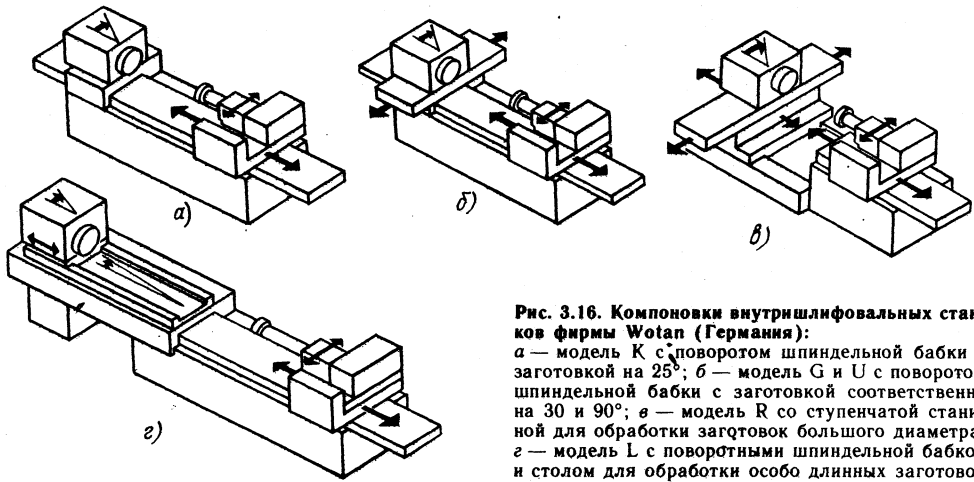


Рис. 3.16. Компоненты внутришлифовальных станков фирмы Wotan (Германия):
 а — модель К с поворотом шпиндельной бабки с заготовкой на 25° ; б — модель G и U с поворотом шпиндельной бабки с заготовкой соответственно на 30 и 90° ; в — модель R со ступенчатой станиной для обработки заготовок большого диаметра; г — модель L с поворотными шпиндельной бабкой и столом для обработки особо длинных заготовок

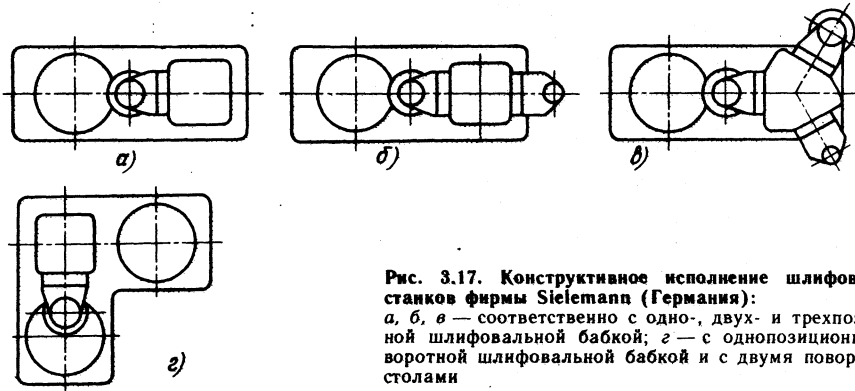


Рис. 3.17. Конструктивное исполнение шлифовальных станков фирмы Sielemann (Германия):
 а, б, в — соответственно с одно-, двух- и трехпозиционной шлифовальной бабкой; г — с однопозиционной поворотной шлифовальной бабкой и с двумя поворотными столами

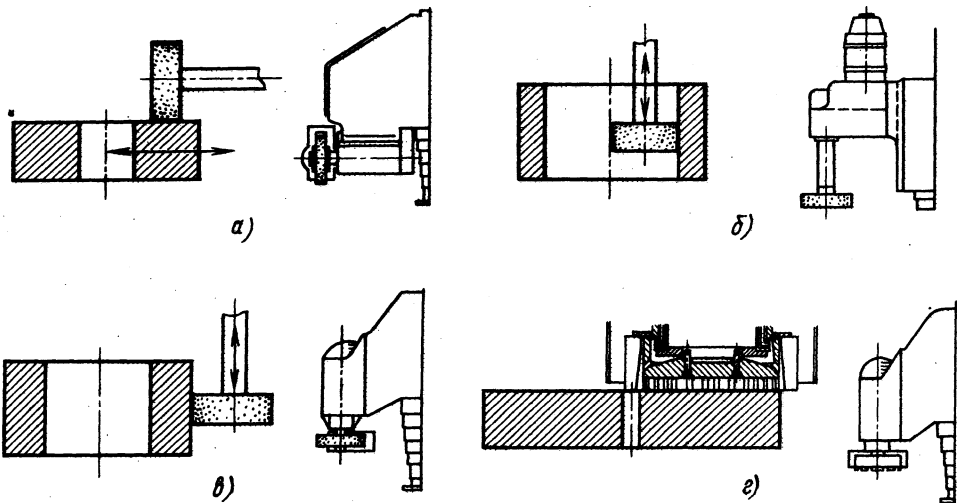
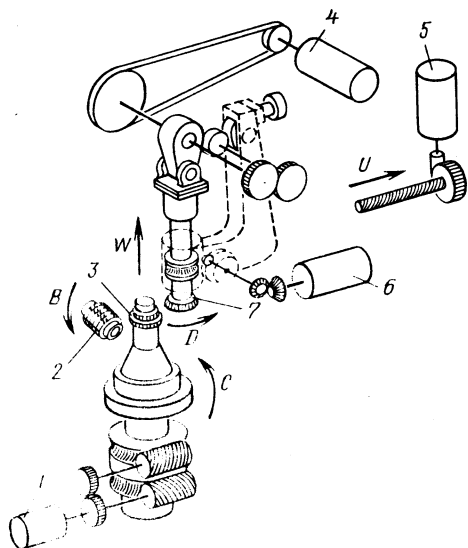


Рис. 3.18. Варианты обработки заготовок на шлифовальных станках фирмы Sielemann (Германия):
 а — плоское шлифование; б и в — соответственно внутреннее и наружное шлифование цилиндрических поверхностей; г — плоское шлифование с внутренней подачей охлаждающей жидкости

Рис. 3.19. Схема зубообрабатывающего станка с ЧПУ модели «Shobber 150» фирмы Pfauter (Германия):

1 — привод вращения заготовки (по координате C);
 2 — червячная фреза (вращение по координате B);
 3 — заготовка; 4 — привод возвратно-поступательного перемещения долбяка (по координате W); 5 — привод радиальной подачи инструмента (по координате U); 6 — привод вращения долбяка (по координате D); 7 — долбяк



Фирма Pfauter (Германия) разработала станки моделей Shobber — 150; 250; 300, где заготовки обрабатываются одновременно зубофрезерованием и зубодолблением (рис. 3.19).

3.52. Технические характеристики шлифовальных станков с ЧПУ с поворотным столом фирмы Sielemann (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | |
|---|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | R40 | R60 | R80 | R100 | R130 | R160 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1300 | 1600 |
| Наибольшая высота заготовки, мм | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Диаметр поворотного стола, мм | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1300 | 1600 |
| Частота вращения стола (с бесступенчатым регулированием), мин ⁻¹ | 3 — 300 | 2 — 200 | 1 — 100 | 1 — 60 | 1 — 50 | 1 — 40 |
| Наибольшая нагрузка на стол, Н | 4000 | 5000 | 8000 | 15 000 | 25 000 | 30 000 |

Примечание. Наибольший угол, обрабатываемый на заготовке, равен 45°.

3.53. Технические характеристики заточных станков с ЧПУ фирмы Walter (Австрия)

| Характеристика | Модель | | |
|--|-----------------------|------------------------|------------------|
| | Helitronic 30CNC LIP2 | Helitronic 50CNC CIP5R | Helitronic 35CNC |
| Высота центров, мм | — | — | 165 |
| Наибольшее расстояние между центрами, мм | 430 | 650 | 280 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 265 | 200 | 320 |
| Наибольший диаметр шлифовального круга, мм | 200 | | |
| Наибольшее перемещение шлифовальной бабки, мм: | | | |
| вертикальное | 230 | 270 | 250 |
| поперечное | 220 | 280 | 190 |
| Мощность привода шлифовального круга, кВт | 1,4 | 3 | 3 |

3.54. Технические характеристики зубофрезерных станков с ЧПУ с горизонтальным расположением заготовки фирмы Pfauter (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | |
|----------------------------------|--------|--------|-----------------|--------|------------------|
| | PE125H | PE300H | PE300HSF | PE500H | PE500HSF |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 130 | 300 | 300 | 500 | 500 |
| Модуль, мм | 4* | 8* | 8*, 15**, 30*** | 12* | 12*, 15**, 30*** |
| Перемещение суппорта, мм | 400 | 800 | 800 | 4000 | 4000 |

*Нарезание червячной фрезой. **Нарезание дисковой фрезой. ***Нарезание пальцевой фрезой.

3.55. Технические характеристики зубофрезерных станков с ЧПУ с вертикальным расположением заготовки фирмы Pfauter (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | PE80 | PE150 | PE250 | PE300 | PE500 | PE750 | PE1000 | PE1503 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 80 | 150 | 250 | 350 | 500 | 750 | 1000 | 1500 |
| Модуль, мм | 2,5 | 4 | 5 | 8 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| Наибольшее перемещение суппорта, мм | 200 | 200 | 200 | 400 | 400 | 700 | 700 | 600 |

3.56. Технические характеристики зубофрезерных станков с ЧПУ фирмы Liebherr (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | | |
|----------------------------------|--------|------|-------|------|------|-------|--|
| | L252 | L402 | LC502 | L652 | L902 | L1202 | |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 250 | 400 | 500 | 650 | 900 | 1250 | |
| Модуль, мм | 6 | 10 | 10 | 12 | 12 | 18 | |

3.57. Технические характеристики зубодолбежных станков с ЧПУ фирмы Liebherr (Германия)

| Характеристика | Модель | | |
|----------------------------------|--------|----------|-------|
| | WS1 | WS401CNC | WS501 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 250 | 400 | 500 |
| Модуль, мм | 5 | 8 | 8 |

3.58. Технические характеристики зубодолбежных станков фирмы Lorenz (Германия)

| Характеристика | Модель | | | | | | |
|---------------------------------------|----------|-------|----------|----------|-------|--------|--------|
| | LS152CNC | LS180 | LS304CNC | LS424CNC | LS630 | LS1000 | LS1250 |
| Наибольший диаметр заготовки, мм | 150 | 180 | 300 | 420 | 630 | 1000 | 1250 |
| Наибольшая ширина зубчатого венца, мм | 42 | 42 | 70 | 120 | 200 | 200 | 200 |
| Модуль, мм | 5 | 5 | 6 | 8 | 12 | 12 | 12 |

3.59. Технические характеристики зубообрабатывающих станков фирмы Oerlikon (Швейцария)

| Характеристика | Модель | |
|---|------------------|------------------|
| | «Spiromatic S17» | «Spiromatic S27» |
| Наибольший диаметр колеса при среднем угле наклона линии зуба 30°, мм | 400 | 680 |
| Наибольшая ширина зубчатого венца, мм | 60 | 100 |
| Нормальный модуль (в середине зубчатого венца), мм | 1,5 — 8,5 | 2,65 — 13 |
| Длина образующей делительного конуса, мм | 205 | 350 |
| Наименьшее (наибольшее) передаточное отношение | 1:1 (1:10) | 1:1 (1:10) |
| Общая мощность, потребляемая станком, кВт | 18 | 28 |

3.60. Технические характеристики зубошлифовальных станков фирмы Reishauer (Швейцария)

| Характеристика | Модель | | | | |
|--|---------|---------|---------|----------|---------|
| | RZ300E | NZA | AZA | ZB | RZP |
| Наименьший диаметр окружности впадин, мм | 10 | 10 | 10 | 34 | — |
| Наибольший диаметр окружности выступов, мм | 300 | 330 | 360 | 770 | 80 |
| Наибольшая масса зажимаемой заготовки, кг | 50 | 60 | 60 | 300 | 7 |
| Модуль, мм | 0,5 — 6 | 0,5 — 6 | 0,5 — 6 | 0,5 — 8 | 3 |
| Число зубьев | 7 — 256 | 8 — 130 | 8 — 260 | 11 — 280 | 13 — 18 |
| Наибольший ход каретки, мм | 180 | 180 | 180 | 290 | — |
| Наибольший угол наклона зуба, ° | ±45 | ±45 | ±45 | ±30 | ±40 |
| Наибольшая ширина шлифовального круга, мм | 84 | 84 | 104 | 104 | 40 |

В табл. 3.54—3.58 приведены основные технические характеристики зубофрезерных и зубодолбежных станков, выпускаемых зарубежными фирмами. Фирмы Oerlikon (Швейцария) и Klingelberg (Германия) выпускают станки для нарезания конических зубчатых колес со спиральным зубом (табл. 3.59).

Фирма Klingelberg (Германия) выпускает зубообрабатывающие станки для обработки конических колес со спиральным зубом делительным диаметром 4—2000 мм, нормальным модулем 0,3—35 мм, наибольшим торцовым модулем 50 мм с числом зубьев 5—120 и наибольшей шириной зуба 350 мм.

3.61. Технические характеристики резьбошлифовальных станков фирмы Reishauer (Швейцария)

| Характеристика | Модель | | | | |
|--|--------|---------|---------|---------|---------|
| | RAG | US | UL900 | UL2000 | USG35 |
| Диаметр резьбы, мм: | | | | | |
| наименьший | 1 | 2 | 10 | 10 | 10 |
| наибольший | 20 | 250 | 250 | 250 | 350 |
| Шаг резьбы, мм: | | | | | |
| наименьший | 0,25 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| наибольший | 4 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Наибольший угол подъема винтовой линии резьбы, ° | ±7 | ±40 | ±40 | ±40 | ±40 |
| Наибольшая длина шлифования, мм | 230 | 450 | 900 | 2000 | 450 |
| Частота вращения заготовки, мин ⁻¹ | 10—140 | 0,4—160 | 0,4—160 | 0,4—160 | 0,4—160 |

Зубо- и резьбошлифовальные станки. В табл. 3.60 и 3.61 приведены основные технические характеристики зубо- и резьбошлифовальных станков фирмы Reishauer (Швейцария). Фирма BHS Höfler (Германия) выпускает зубошлифовальные станки для заготовок диаметром 400—4000 мм, модулем до 32 мм при наибольшей ширине зубчатого колеса до 1550 мм. Фирма Osterwalder (Швейцария) выпускает резьбошлифовальные станки для обработки наружных (высота центров 300 мм, диаметр заготовки 300 мм)

и внутренних (диаметр обработки наименьший 10 мм, наибольший 200 мм, наибольшая длина заготовки 200 мм) резьб.

Список литературы

1. **Металлорежущие станки**, выпускаемые в СССР. Справочно-информационный материал. М.: КНТЦ ЭНИКС. ЭНИМС, 1990. 425 с.
2. **Справочник технолога-машиностроителя**. В 2-х т. Т. 2/Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

Глава 4

Проектирование технологии механической обработки на станках

4.1. Режущий инструмент

Инструмент для обработки резанием может иметь один или несколько режущих элементов (зубьев), которые могут работать одновременно или последовательно, непрерывно или с перерывами, обеспечивая срез материала срезаемого слоя с постоянной или переменной скоростью движения относительно обрабатываемой детали (рис. 4.1).

Токарный резец характеризуется одним режущим элементом, работающим с постоянной скоростью резания v ; он имеет переднюю поверхность 3 (рис. 4.2) и одну (4) или несколько задних поверхностей, из которых одна называется главной задней поверхностью, а остальные — вспомогательными задними поверхностями. Передняя поверхность режущего элемента токарного резца взаимно пересекаясь, образуют соответственно главную 2 и вспомогательную 5 режущие кромки. Точка пересечения главной и вспомогательной режущих кромок носит название вершины режущей части 6. Режущие кромки и примыкающие к ним контактные поверхности на передней и задней поверхностях в совокупности образуют лезвия. Они играют роль режущего клина и называются соответственно главным лезвием и вспомогательными лезвиями.

Геометрические параметры режущей части в инструментальной системе координат определяют положение передних и задних поверхностей, главных и вспомогательных режущих кромок, образующих режущие элементы (зубья). Они представляют собой систему угловых размеров и называются геометрическими параметрами (см. ГОСТ 25762—83). Конкретные значения геометрических параметров проставляют на рабочих чертежах инструментов таким образом, чтобы по ним можно было изготовить

режущие элементы (зубья) заданной формы и с необходимой точностью.

Системы координатных плоскостей формулируются на основе следующих понятий: вектора скорости подачи v_s , вектора окружной скорости $v_{окр}$ и вектора результирующей скорости v плоскостей. Положение этих скоростей определяются углами μ и η (см. рис. 4.1).

Геометрические параметры рабочей части инструмента определяются, исходя из приведенной системы координатных плоскостей. Инструментальная система координат — прямоугольная система координат с началом в вершине резца, в которой инструмент рассматривается как пространственное геометрическое тело, находящееся в состоянии покоя (см. рис. 4.2). В связи с этим представляется возможным установить для данного инструмента постоянные геометрические параметры. Они часто называются углами заточки инструмента и служат

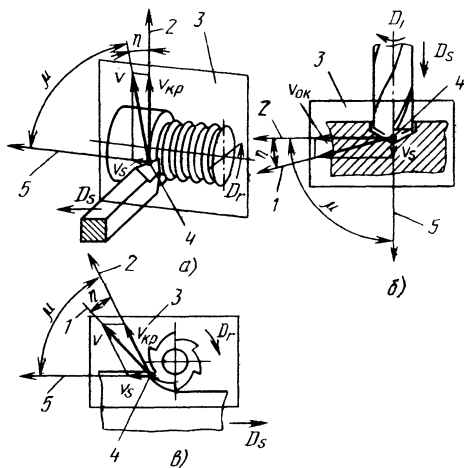


Рис. 4.1. Элементы движений в процессе резания при обтачивании (а), сверлении (б) и фрезеровании (в):

1 — направление скорости результирующего движения резания; 2 — направление скорости главного движения резания; 3 — рабочая плоскость; 4 — рассматриваемая точка режущей кромки; 5 — направление скорости движения подачи

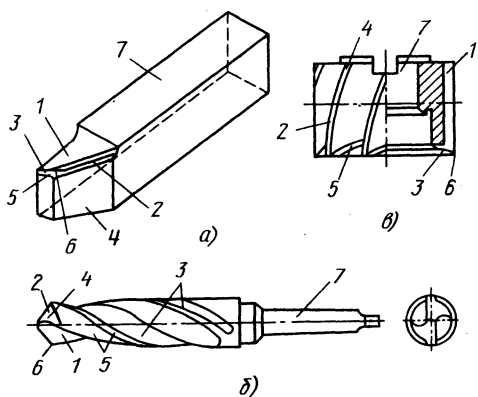


Рис. 4.2. Геометрические и конструктивные элементы режущих инструментов:

а — токарного резца; б — сверла; в — фрезы; 1 — передняя поверхность лезвия; 2 — главная режущая кромка; 3 — вспомогательная режущая кромка; 4 — главная задняя поверхность лезвия; 5 — вспомогательная задняя поверхность лезвия; 6 — вершина лезвия; 7 — крепежная часть инструмента

для определения формы режущей части при изготовлении и контроле инструмента. При производстве инструмента обработка передней и задней поверхностей инструмента осуществляется относительно конструкторской и технологической (установочных) баз инструмента в системе трех перпендикулярных плоскостей (см. рис. 4.1).

Режущий инструмент состоит из двух основных частей — рабочей содержащей режущий клин инструмента, и крепежной части 7. Боль-

шинство конструкций металлорежущего инструмента изготовляют составными: рабочая часть из инструментального материала, крепежная — из обычных конструкционных сталей.

Рабочую часть инструментов в виде пластин или стержней из быстрорежущей стали (ГОСТ 19265—73) соединяют с крепежной частью с помощью сварки. Эксплуатационные и технологические свойства, рекомендуемые области применения наиболее распространенных быстрорежущих сталей приведены в табл. 4.1.

Марки твердых сплавов и рекомендуемые области применения твердосплавного инструмента приведены в табл. 4.2.

Металлорежущие инструменты изнашиваются по передней и задней поверхностям. Вид износа определяется подачей, скоростью резания и свойствами обрабатываемого материала. Изнашивание по задней поверхности характерно для малых подач (до 0,1 мм/об), низких скоростей и обработки хрупких материалов. По мере увеличения скорости резания и подачи появляется износ передней поверхности в виде лунки. Изнашивание по задней поверхности — основная причина потери инструментом его режущих свойств.

Обработку резцами производят на токарных, револьверных, расточных, карусельных, строгальных и долбежных станках, а также на токарных автоматах и полуавтоматах.

Токарные резцы подразделяют:

по виду обработки — проходные, подрезные, отрезные, прорезные, расточные, фасонные; по типу операции — черновые и чистовые;

4.1. Быстрорежущая сталь, рекомендуемая для режущих инструментов

| Сталь | Прочность, износостойкость | Шлифуемость | Изготавливаемый инструмент |
|----------------------------|---|---|--|
| P18 | Удовлетворительная прочность, повышенная износостойкость при малых и средних скоростях резания | Удовлетворительная | Режущий инструмент всех видов, в том числе для обработки обычных конструкционных материалов в условиях динамических нагрузок |
| P9 | Удовлетворительная прочность, повышенная износостойкость при средних и повышенных скоростях резания, повышенная пластичность при температурах горячего деформирования | Пониженная по сравнению со шлифуемостью стали P18 | Простой формы с малым объемом шлифованных поверхностей (резцы, сверла, зенкера и др.) для обработки обычных конструкционных материалов |
| P6M5 | Повышенная прочность | Удовлетворительная | То же, что и для стали P18 |
| P18K5Ф2, P9M4K8, P6M5K5 | Повышенные вторичная твердость и износостойкость | Пониженная, но лучше, чем стали P14Ф4 | Для обработки высокопрочных, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов в условиях повышенного нагрева режущей кромки |

§ 4.2. Марки твердого сплава для инструментов при различных видах обработки резанием

| Обработка | Твердый сплав при обработке | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|---|---------------------|
| | углеродистой и легированной стали | труднообрабатываемых материалов | коррозионно-стойкой стали аустенитного класса | закаленной стали |
| Черновое точение по корке и окалине при неравномерном сечении среза и прерывистом резании с ударами | T15K10, T5K12, BK8, BK8-B | T5K12, TT7K12, BK8, BK8-B | T5K12, BK8-B, BK8 | — |
| Получистовое и чистовое точение при непрерывном резании | T15K6, T14K8, T5K10 | BK4, BK8, BK8-B | BK4, BK8 | T5K10, BK4, BK8 |
| Точное точение при прерывистом резании | T30K4, T15K6 | — | BK6-M | T14K8, T5K10, BK4 |
| Отрезание и прорезание канавок | T15K6, T14K8, T5K10 | BK4, BK8, BK8-B | BK6-M, BK4 | BK6-M, BK4 |
| Предварительное нарезание резьбы | T15K6, T14K8 | T15K6, T14K8, BK4 | BK6-M, BK4 | BK6-M, BK4 |
| Окончательное нарезание резьбы | T30K4, T15K6 | T30K4, T15K6 | BK6-M, BK3-M | BK3-M |
| Строгание и долбление | T15K12B, BK8-B, BK15 | T5K12 | T15K12, BK8, BK15 | — |
| Черновое фрезерование | T15K6, T14K8, T5K10 | TT5K10, BK4, BK8 | T5K12, T5K10, T14K8 | — |
| Получистовое и чистовое фрезерование | T30K4, T15K6, T14K8 | T15K6, T14K8, T5K10 | T15K6, T14K8 | — |
| Сверление отверстий | T15K6, T5K12B, BK8 | T5K12B, BK8, BK8-B | T5K12B, BK8-B | — |
| Расверливание предварительно просверленных отверстий | T14K8, T5K10, T15K6 | BK4, BK8 | BK8 | T14K8, T5K10, BK3 |
| Расверливание глубоких отверстий в литых, кованых и штампованных деталях, а также отверстий с неравномерным припуском и прерывистым резанием | T5K10, T5K12, BK8, BK8-B | T5K12, TT7K12, BK8, BK4 | T5K12, BK8, BK4 | — |
| Получистовое и чистовое зенкерование | T30K4, T15K6, T14K8 | T15K6, T14K8, T5K10, BK6-M | BK6-M | — |
| Предварительное и окончательное развертывание | T30K4, T15K6 | T30K4, T15K6, BK6-M, BK3-M | BK6-M, BK4 | T30K4, BK3-M, BK6-M |

| Обработка | титана и сплавов по основе | Твердый сплав при обработке | | | цветных металлов и их сплавов | неметаллических материалов |
|--|----------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| | | чугуна с НВ | | | | |
| | | 240 | 400 — 700 | | | |
| Черновое точение по корке и охалание при неравномерном сечении среза и прерывистом резании с ударами | ВК8, ВК8-В | ВК8, ВК8-В, ВК4 | ВК8, ВК8-В | ВК4, ВК6, ВК8 | ВК4, ВК6 | |
| Получистовое и чистовое точение при непрерывном резании | ВК4 | ВК4, ВК6, ВК8 | ВК6-М | ВК3, ВК3-М, ВК4 | ВК6 | |
| Точное точение при прерывистом резании | ВК4 | ВК3, ВК3-М, ВК4 | ВК6-М, ВК3 | ВК3, ВК3-М, ВК4 | ВК3, ВК3-М, ВК4 | |
| Отрезание и прорезание канавок | ВК4, ВК8 | ВК4, ВК6, ВК8 | ВК3, ВК6-М | ВК3, ВК3-М, ВК4 | ВК3, ВК3-М, ВК4 | |
| Предварительное нарезание резьбы | ВК4, ВК6-М | ВК3, ВК3-М | ВК6-М, ВК3-М | ВК4, ВК6, ВК6-М | ВК3, ВК3-М, ВК4 | |
| Окончательное нарезание резьбы | ВК3-М | ВК4 | ВК3 | ВК3, ВК3-М | ВК3, ВК3-М | |
| Строгание и долбление | — | ВК8, ВК8-В | — | ВК8, ВК8-В | ВК4, ВК6, ВК8 | |
| Черновое фрезерование | ВК4 | ВК4, ВК6, ВК8 | — | ВК4, ВК6, ВК8 | ВК3, ВК4 | |
| Получистовое и чистовое фрезерование | ВК8 | ВК6, ВК4 | ВК6-М | ВК3, ВК3-М, ВК4 | ВК3, ВК3-М | |
| Сверление отверстий | ВК8, ВК8-М | ВК4, ВК6, ВК8 | ВК8, ВК8-В | ВК4, ВК6, ВК8 | ВК3, ВК4 | |
| Расверливание предварительно просверленных отверстий | Т14К8, Т5К10, ВК8 | ВК4, ВК8 | ВК3, ВК3-М, ВК4 | ВК6-М, ВК3, ВК4, ВК3-М | ВК3, ВК3-М | |
| Расверление глубоких отверстий в литых, кованых и штампованных деталях, а также отверстий с неравномерным припуском и прерывистым резанием | — | ВК8-М, ВК8, ВК4 | — | ВК4, ВК8, ВК8-М | — | |
| Получистовое и чистовое зенкерование | ВК4, ВК8 | ВК3, ВК3-М, ВК4 | ВК4 | ВК8 | ВК3, ВК3-М, ВК4 | |
| Предварительное и окончательное развертывание | ВК4, ВК6-М, ВК3-М | ВК3, ВК3-М, ВК6-М | ВК6-М, ВК3-М | ВК8-М | ВК4 | |

по движению подачи относительно обрабатываемой заготовки — радиальные и тангенциальные;

по конструкции головки — прямые, отогнутые и оттянутые;

по направлению движения подачи — правые и левые;

по виду инструментального материала — твердосплавные, алмазные и оснащенные синтетическими сверхтвёрдыми материалами, а также из быстрорежущей легированной углеродистой стали;

по способу изготовления — цельные с головкой, сделанной как одно целое со стержнем, и составные с головкой, приваренной встык; в виде пластины, припаянной к державке или сменными режущими пластинами; два последних вида получили наибольшее распространение.

Применение многогранных твердосплавных неперетачиваемых пластин на резах обеспечивает:

повышение стойкости на 20—25 % по сравнению с напаянными резами;

возможность повышения режимов резания благодаря простоте восстановления режущих свойств многогранных пластин путем их поворота;

сокращение затрат на инструмент в 2—3 раза, потерь вольфрама и кобальта в 4—4,5 раза, вспомогательного времени на смену и повторную заточку резцов;

упрощение инструментального хозяйства вследствие необходимости при стандартных державках иметь только сменные неперетачиваемые пластины.

Базовые поверхности державок для установки сменных пластин выполняют таким образом, чтобы они без регулировки и наладки занимали положение в пределах заданных допусков. Поэтому многогранные неперетачиваемые пластины выпускают трех степеней точности: нормальной (шлифование только по верхней и нижней поверхностям), повышенной — для токарного и расточного инструмента (шлифование и по боковым граням), высокой — для многолезвийного инструмента.

Типовые конструкции пластин и устройств механического крепления сменных пластин 3 показаны на рис. 4.3. Наиболее проста схема крепления пластины клином (рис. 4.3, в); для этого ее свободно надевают на запрессованный в державке 1 штифт 6. Поджим к нему осуществляют винтом 4, пружиной 5 и клином 7, причем одна из сторон клина контактирует с боковой поверхностью пластины, а другая — со скосом на державке реза. Подкладка 2 предохраняет режущую пластину от механических повреждений. Недостатками этой конструкции являются низкая точность и недостаточная жест-

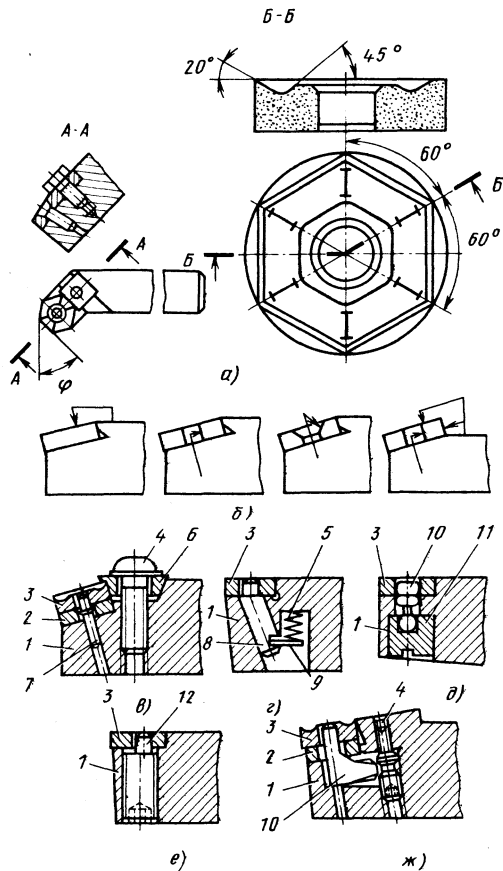


Рис. 4.3. Типовые конструкции пластин и устройств механического крепления

кость крепления пластины. Схемы крепления режущих пластин в закрытых базах, выполненных на державке, не имеют этих недостатков. Поджим режущей пластины к базе на державке реза может осуществляться различными способами: косою тягой (рис. 4.3, в), качающимся штифтом (рис. 4.3, д), эксцентриком (рис. 4.3, е) и рычажным механизмом (рис. 4.3, ж). Крепление пластин косою тягой (см. рис. 4.3, в) упрощает конструкцию, так как под действием винта или упругих элементов державки тяга перемещается вдоль наклонного отверстия державки, а выступающая головка тяги вместе с пластиной перемещается к базе и прижимает пластину к ней. Недосток этой схемы — трудность размещения подкладки под пластиной.

Более надежными, но более сложными являются методы крепления пластин на державке качающимся штифтом (см. рис. 4.3, д) и эксцентриком (см. рис. 4.3, е); последний способ является наиболее надежным.

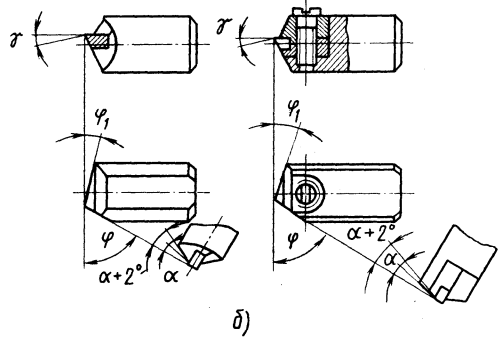
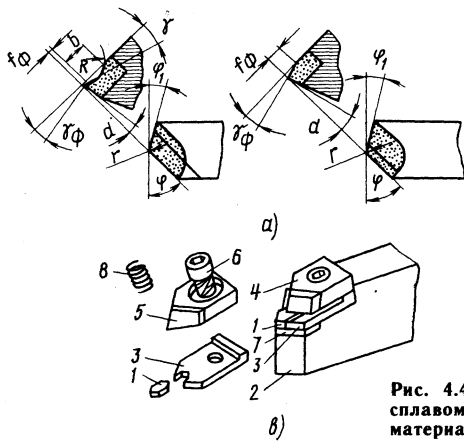


Рис. 4.4. Типовые конструкции резцов, оснащенных твердым сплавом (а), алмазами (б) и синтетическими сверхтвердыми материалами (в)

Инструменты с механическим креплением пластин имеют ряд недостатков; среди них основным является низкая надежность и жесткость. Это относится прежде всего к поверхности контакта пластины с опорной плоскостью державки. Кроме того, их эксплуатация сопро-

вождается повышенным изнашиванием крепежных элементов. Сборные инструменты имеют большие габаритные размеры.

Виды резцов и их параметры приведены на рис. 4.4 и в табл. 4.3—4.12.

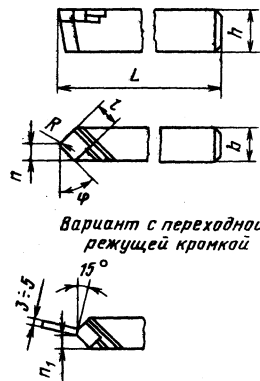
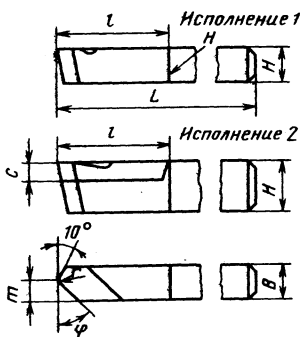
Продолжение табл. 4.3

4.3. Токарные проходные прямые резцы (правые и левые)

Размеры, мм

С пластинами из твердого сплава (по ГОСТ 18878 — 73)

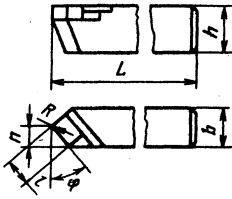
С пластинами из быстрорежущей стали (по ГОСТ 18869 — 73)



| H | B | L | l | m при φ, ° | | | c | r |
|----|----|-----|----|------------|-----|----|----|-----|
| | | | | 45 | 60 | 65 | | |
| 10 | 10 | 60 | 30 | — | — | 3 | — | 0,5 |
| 16 | 10 | 100 | 40 | 6 | 4,5 | — | — | 0,5 |
| 16 | 16 | 80 | 30 | 9 | 7 | — | — | 1,0 |
| 20 | 12 | 120 | 40 | 7 | 6 | — | 6 | 1,0 |
| 20 | 20 | 120 | 40 | 12 | 9 | — | 6 | 1,0 |
| 25 | 16 | 140 | 50 | 9 | 7 | — | 8 | 1,0 |
| 32 | 20 | 170 | 60 | 12 | 9 | — | 10 | 1,0 |

| h | b | L | n при φ, ° | | n ₁ при φ, ° | | l | R |
|----|----|-----|------------|-----|-------------------------|------|----|-----|
| | | | 45 | 60 | 45 | 60 | | |
| 16 | 10 | 100 | 6 | 4,5 | 5 | 4 | 8 | 0,5 |
| 20 | 12 | 120 | 7 | 6 | 5,5 | 5,5 | 10 | 1,0 |
| 20 | 16 | 120 | 9 | 7 | 8 | 6,5 | 12 | 1,0 |
| 25 | 16 | 140 | 9 | 7 | 8 | 6,5 | 12 | 1,0 |
| 32 | 20 | 170 | 12 | 9 | 10,5 | 8,5 | 16 | 1,5 |
| 32 | 25 | 170 | 14 | 11 | 12,5 | 10,5 | 20 | 2,0 |
| 40 | 25 | 200 | 14 | — | 12,5 | — | 20 | 2,0 |

С пластинами из твердого сплава, с углом врезания пластины в стержень 0° (по ГОСТ 18878—73)



| h | b | L | n при φ, ° | | l | R |
|----|----|-----|------------|-----|----|-----|
| | | | 45 | 60 | | |
| 16 | 10 | 100 | 6 | 4,5 | 8 | 0,5 |
| 20 | 12 | 120 | 7 | 6 | 10 | 1,0 |
| 20 | 16 | 120 | 9 | 7 | 12 | 1,0 |
| 25 | 16 | 140 | 9 | 7 | 12 | 1,0 |
| 32 | 20 | 170 | 12 | 9 | 16 | 1,5 |
| 40 | 25 | 200 | 14 | 11 | 20 | 2,0 |

4.4. Токарные проходные упорные отогнутые резцы с углом в плане 90° (правые и левые)
Размеры, мм

| Эскиз | h | b | L | n | l | R |
|-------|---|---|---|---|---|---|
|-------|---|---|---|---|---|---|

С пластинами из быстрорежущей стали (по ГОСТ 18870 — 73)

| | | | | | | |
|--|----|----|-----|---|----|-----|
| | 16 | 10 | 100 | 4 | 12 | 0,5 |
| | 20 | 12 | 120 | 5 | 16 | 1,0 |
| | 25 | 16 | 140 | 6 | 20 | 1,0 |
| | 32 | 20 | 170 | 7 | 25 | 1,0 |
| | 40 | 25 | 200 | 9 | 30 | 1,5 |

С пластинами из твердого сплава (по ГОСТ 18879 — 73)

| | | | | | | |
|--|----|----|-----|----|----|-----|
| | 16 | 10 | 100 | 4 | 10 | 0,5 |
| | 16 | 12 | 100 | 5 | 12 | 0,5 |
| | 20 | 16 | 120 | 6 | 16 | 1,0 |
| | 25 | 16 | 140 | 7 | 16 | 1,0 |
| | 25 | 20 | 140 | 8 | 20 | 1,5 |
| | 32 | 20 | 170 | 8 | 20 | 1,5 |
| | 40 | 25 | 200 | 10 | 25 | 2,0 |

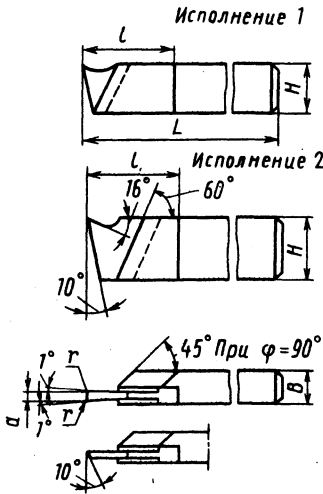
С пластинами из твердого сплава с углом врезания пластин в стержень 0° (по ГОСТ 18879 — 73)

| | | | | | | |
|--|----|----|-----|----|----|-----|
| | 16 | 10 | 100 | 4 | 10 | 0,5 |
| | 16 | 12 | 100 | 5 | 12 | 0,5 |
| | 20 | 16 | 120 | 6 | 16 | 1,0 |
| | 25 | 16 | 140 | 7 | 16 | 1,0 |
| | 25 | 20 | 140 | 8 | 20 | 1,5 |
| | 32 | 20 | 170 | 8 | 20 | 1,5 |
| | 40 | 25 | 200 | 10 | 25 | 2,0 |

4.5. Точарные отрезные резцы
Размеры, мм

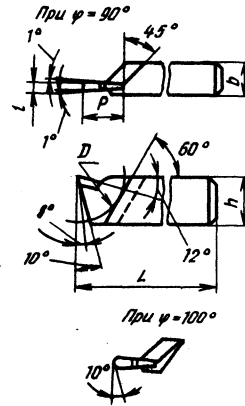
Продолжение табл. 4.5

Из быстрорежущей стали
(по ГОСТ 18874 — 73)



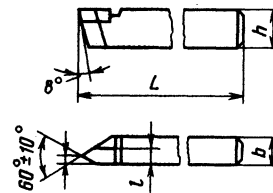
| H | B | L | l | a | r | Наибольший диаметр обрабатываемой заготовки D |
|----|----|-----|----|---|-----|---|
| 16 | 10 | 100 | 30 | 3 | 0,2 | 30 |
| 20 | 12 | 120 | 50 | 3 | | 30 |
| | | | | 4 | | 35 |
| 25 | 16 | 140 | 60 | 3 | 0,2 | 30 |
| | | | | 5 | | 50 |
| 32 | 20 | 170 | 60 | 4 | | 35 |
| | | | | 6 | 60 | |

С пластинами из твердого сплава
(по ГОСТ 18884 — 73)



| h | b | L | p | l | Наибольший диаметр обрабатываемой заготовки D |
|----|----|-----|----|---|---|
| 16 | 10 | 100 | 20 | 3 | 30 |
| 20 | 12 | 120 | 25 | 4 | 35 |
| 25 | 16 | 140 | 35 | 5 | 50 |
| 32 | 20 | 170 | 38 | 6 | 60 |
| 40 | 25 | 200 | 45 | 8 | 70 |

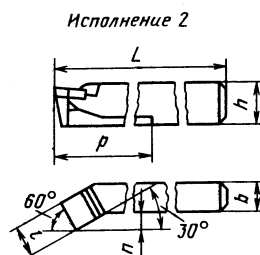
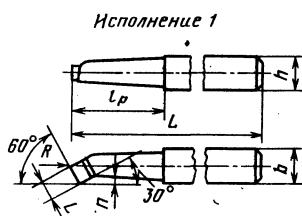
4.6. Точарные резьбовые резцы с пластинами из твердого сплава
(по ГОСТ 18885 — 73)
Размеры, мм



| h | b | L | n | l | Шаг резьбы |
|----|----|-----|---|----|------------|
| 20 | 12 | 120 | 3 | 6 | 0,8 — 3 |
| 25 | 16 | 140 | 4 | 8 | 1,25 — 5 |
| 32 | 20 | 170 | 5 | 10 | 2 — 6 |

4.7. Токарные расточные резцы с углом в плане $\varphi = 60^\circ$ с пластинами из твердого сплава (по ГОСТ 18882 — 73)

Размеры, мм



| h | b | L | p | m | l |
|-----|-----|-----|-----|---------|--------|
| 16 | 16 | 120 | 25 | 3,5 | 8 |
| | | 140 | 40 | | |
| | | 170 | 60 | | |
| 20 | 20 | 140 | 40 | 5,5 | 10 |
| | | 170 | 70 | 6,0 | 12 |
| | | 200 | 80 | | |
| 25 | 25 | 200 | 70 | $< 8,0$ | < 14 |
| | | 240 | 100 | | |

| h | b | L | p | h | l |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 12 | 170 | 80 | 6 | 12 |
| | | | | | |
| 20 | 16 | 200 | 100 | 6 | 14 |
| | | | | | |
| 25 | 20 | 240 | 120 | 10 | 18 |
| | | | | | |

Примечание. Для резцов обоих исполнений $R = 1$ мм.

4.8. Токарные сборные проходные резцы с механическим креплением твердосплавных пластин клином

Размеры, мм

| Эскиз | h | b | h_0 | L | f | Диаметр описанной окружности |
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|------------------------------|
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|------------------------------|

С трехгранными пластинами

| Эскиз | h | b | h_0 | L | f | Диаметр описанной окружности |
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|------------------------------|
| | 16 | 16 | 16 | 120 | 20 | 14 |
| | 20 | 16 | 20 | 120 | 20 | 14 |
| | 20 | 20 | 20 | 120 | 25 | 18 |
| | 25 | 20 | 25 | 140 | 25 | 18 |
| | 25 | 25 | 25 | 140 | 32 | 22 |
| | 32 | 25 | 32 | 170 | 32 | 22 |
| | 32 | 32 | 32 | 170 | 40 | 26 |
| | 40 | 32 | 40 | 200 | 40 | 26 |

| Эскиз | h | b | h_0 | L | f | Диаметр описанной окружности |
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|------------------------------|
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|------------------------------|

С четырехгранными пластинами

| Эскиз | h | b | h_0 | L | f | Диаметр описанной окружности |
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|------------------------------|
| | 16 | 16 | 16 | 120 | 16 | 14 |
| | 20 | 16 | 20 | 120 | 16 | 14 |
| | 20 | 20 | 20 | 120 | 20 | 18 |
| | 25 | 20 | 25 | 140 | 20 | 18 |
| | 25 | 25 | 25 | 140 | 25 | 18 |
| | 32 | 25 | 32 | 170 | 25 | 22 |

С пятигранными пластинами

| Эскиз | h | b | h_0 | L | f | Диаметр описанной окружности |
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|------------------------------|
| | 20 | 20 | 20 | 120 | 20 | 18 |
| | 25 | 20 | 25 | 140 | 20 | 18 |
| | 32 | 25 | 32 | 170 | 25 | 22 |
| | 40 | 32 | 40 | 200 | 32 | 26 |

4.9. Токарные расточные резцы с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин клином

Размеры, мм

| Эскиз | h | h_0 | Длина резца | Минимальный диаметр растачиваемого отверстия |
|-------|-----|-------|---------------|--|
| | 35 | 25 | 200; 240; 320 | 75 |
| | 45 | 32 | 200; 240; 400 | |
| | 50 | 40 | 400 | 87 |

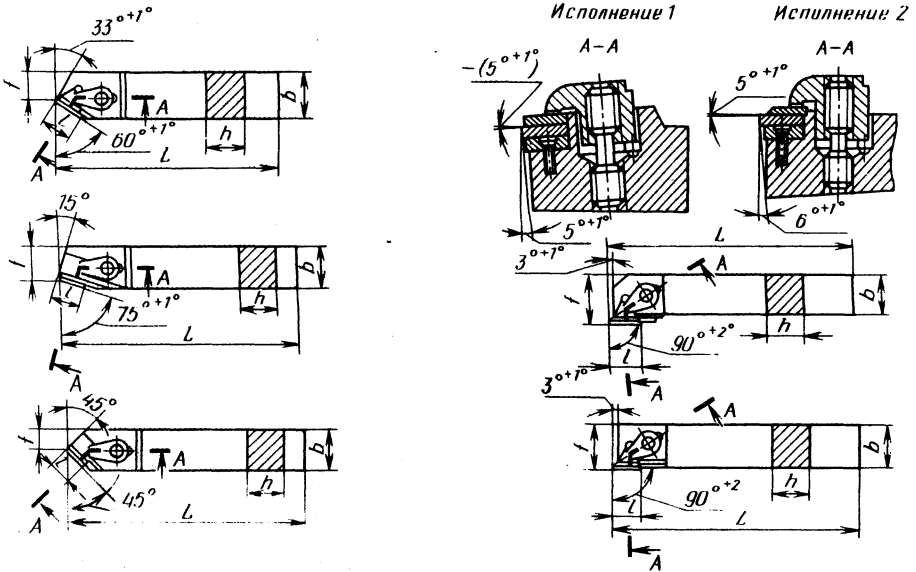
4.10. Токарные проходные резцы с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин клин-прихватом

Размеры, мм

| Эскиз | h | b | h_0 | f | L | p |
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
| | 16 | 16 | 16 | 20 | 100 | 25 |
| | 20 | 16 | 20 | 20 | 125 | 25 |
| | 20 | 20 | 20 | 25 | 125 | 32 |
| | 25 | 29 | 25 | 25 | 150 | 32 |
| | 25 | 25 | 25 | 32 | 150 | 32 |
| | 32 | 25 | 32 | 32 | 170 | 32 |
| | 32 | 32 | 32 | 40 | 170 | 36 |
| | 40 | 32 | 40 | 40 | 200 | 45 |
| | 40 | 40 | 40 | 50 | 200 | 45 |
| | 40 | 40 | 50 | 50 | 250 | 45 |
| | 50 | 40 | 50 | 50 | 250 | 45 |

4.11. Токарные сборные проходные резцы с механическим креплением многогранных пластин из твердого сплава без отверстия

Размеры, мм



| h | b | L | f при φ, ° | | | | | l*2 | l*3 |
|----|----|-----|------------|------|----|----|------|-------|-----|
| | | | 90*1 | 90 | 60 | 65 | 45 | | |
| 12 | 12 | 880 | 16 | 12,5 | 13 | — | 6 | 11 | 9 |
| 16 | 16 | 100 | 20 | 16,5 | 13 | 13 | 8 | 11,16 | 9 |
| 20 | 20 | 125 | 25 | 20,5 | 17 | 17 | 10 | 16 | 12 |
| 25 | 25 | 150 | 32 | 25,5 | 22 | 22 | 12,5 | 16 | 12 |
| 32 | 25 | 170 | 32 | 25,5 | 22 | 22 | 12,5 | 16 | 12 |
| 32 | 32 | 170 | 40 | 33 | 27 | 27 | 16 | 22 | 19 |
| 40 | 40 | 200 | 50 | 41 | 35 | 35 | — | 22,27 | 19 |
| 50 | 50 | 250 | 60 | — | — | 43 | — | — | 25 |

*1 Отогнутый резец.

*2 Резец с трехгранной пластиной.

*3 Резец с четырехгранной пластиной.

4.12. Токарные проходные резцы отогнутые, оснащенные пластинами из композита

Размеры, мм

| Резцы | H | B | L | φ, ° |
|-------------------------|----|----|-----|------|
| С двухслойной пластиной | 20 | 12 | 125 | 90 |
| | 25 | | | 140 |

| Резцы | H | B | L | $\varphi, ^\circ$ |
|---------------------------|----|----|-----|-------------------|
| С цилиндрической вставкой | 16 | 16 | 100 | 45 |
| | 20 | 20 | 125 | 45 |
| Паяные | 8 | 8 | 32 | 45 |
| | 10 | 10 | 40 | 45 |
| | 10 | 10 | 65 | 45 |
| | 12 | 12 | 70 | 60 |

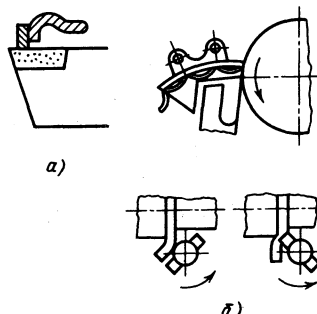
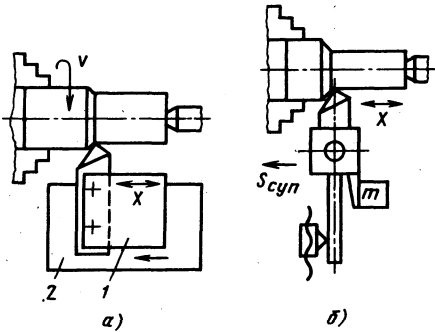
Интенсификация процессов обработки резанием обусловлена широким внедрением твердосплавного и керамического инструмента и многоинструментной обработки. Это приводит к увеличению количества стружки, образующейся в единицу времени. При обработке резанием большинства конструкционных материалов образуется сливная стружка. Наматываясь на вращающиеся и поступательно движущиеся узлы станков и инструмента, попадая в зазоры, она препятствует работе как автоматизированного, так и универсального оборудования и является причиной преждевременного изнашивания и аварий станков и приспособлений. Будучи нагретой до высокой температуры, она представ-

ляет опасность для рабочего и является причиной травм. Помимо этого, сливная стружка загромождает цеховое пространство и создает большие трудности при последующей транспортировке и переработке.

Надежность удаления стружки со станка обеспечивается путем последовательного выполнения двух этапов — дроблением в зоне резания (табл. 4.13) и выносом стружки из рабочего пространства станка. При наличии мелкодробленой стружки вынос ее из зоны обработки не вызывает затруднений; он выполняется с помощью применяющихся с успехом на многих станках и автоматических линиях шнеков и конвейеров.

4.13. Способы стружкодробления или стружкозавивания на станках

| Конструктивное исполнение | Эскиз |
|---|-------|
| С заточкой на передней поверхности резца: а) лунки б) уступа | |
| С накладными стружколомателями, установленными на передней поверхности: а) нерегулируемыми б) регулируемыми | |

| Конструктивное исполнение | Эскиз |
|--|--|
| С экранами: а) неподвижными б) подвижными |  |
| С применением вибросуппортов, обеспечивающих: а) вынужденные колебания (1 — вибратор с резцедержавкой; 2 — суппорт станка) б) автоколебания, обусловленные самим процессом резания на станке |  |

Резцы с мелкими стружколомающими лунками чаще всего применяют для стружкодробления (рис. 4.4, а). Это обусловлено большой универсальностью и надежностью в работе, простотой в изготовлении и эксплуатации по сравнению с другими конструкциями резцов, имеющих неподвижные упоры, накладные стружколомы, регулируемые упоры и экраны. Работа резцов со стружколомающими лунками рассчитана на черновое и чистовое точение при $S=0,05...0,8$ мм/об и $t=0,5...5$ мм. Лунку затачивают по передней поверхности резца вдоль главной режущей кромки на некотором расстоянии от нее; она может быть замкнутой или сквозной (рис. 4.4, а). Сквозные лунки применяют на резцах, работающих без удара. Замкнутые лунки используют в тех случаях, когда необходимо повысить прочность вершины резца.

Осевой инструмент предназначен для обработки отверстий; она производится сверлением, зенкерованием, развертыванием. Особое место занимают операции получения глубоких отверстий; к ним относится отверстие, отношение диаметра которого к глубине $l/d > 10$. У этих групп в последние годы выделяются суперглубокие отверстия $l/d > 100$. Они требуют при-

менения специальных станков и инструментов [6].

Сверление — это способ обработки резанием, обеспечивающий получение в сплошном металле глухих и сквозных цилиндрических отверстий; этот метод механической обработки обеспечивает 10—12-й квалитет и $Ra=40...10$ мкм. Отличительными особенностями процесса резания при сверлении, которые необходимо учитывать при конструировании станков, являются следующие:

переменное значение скоростей резания по длине режущей кромки от нуля в центре до максимума на периферии;

переменные значения переднего и заднего углов по длине режущей кромки; при этом передний угол у наружного диаметра имеет наибольшую величину, уменьшаясь к центру; наоборот, значения задних углов возрастают от периферии к центру;

наличие поперечной кромки или перемычки, крайне затрудняющей процесс резания из-за скоростей резания на ней, близких к нулю, и больших отрицательных передних углов;

трудность конструктивного обеспечения высокой жесткости инструмента;

затруднен процесс удаления стружки из зоны резания;

понижен теплопровод и малая эффективность подвода СОЖ в зону резания.

Спиральное сверло (рис. 4.5) состоит из рабочей части и хвостовика; рабочую часть сверла подразделяют на режущую (заборную) часть, несущую главные, режущие, кромки инструмента 1—2, 3—4, и направляющую часть с ленточками 2—5, 4—6 на винтовой поверхности перьев; кроме того, сверло имеет перемычку 1—3. Сверла изготавливают из инструментальных (У10А) и быстрорежущих (P18, P9, P9K5, PK10) сталей. Они могут быть оснащены пластинами из твердых сплавов, а также изготавливаться целиком из твердого сплава. Сверла последнего вида в первую очередь применяют для получения отверстий малых диаметров в труднообрабатываемых материалах. Наиболее широко в настоящее время применяют сверла из быстрорежущей стали P9K5. Для придания сверлам из быстрорежущей стали соответствующих свойств их подвергают закалке до твердости HRC, 62—65. Сверла из быстрорежущей стали диаметром 8 мм и выше изготавливают сварными. В этом случае хвостовая часть делается из стали 50.

Сверла бывают с фрезерованными винтовыми канавками и витые. Основные типы сверл показаны в табл. 4.14:

Сверла являются инструментом с ограниченными габаритными размерами; большое значение имеют конструктивные параметры сверл,

определяемые длиной рабочей части сверла, площадью поперечного сечения корпуса сверла, обратной конусностью, шириной направляющих ленточек и углом наклона винтовых канавок.

Поперечная кромка или перемычка (1—3 на рис. 4.5) определяет жесткость и прочность сверла; вместе с тем увеличение длины режущей кромки перемычки отрицательно сказывается на процессе сверления.

Геометрия заточки сверл характеризуется передним углом α и углом наклона винтовой канавки ω , а также двойным углом в плане 2φ и задним углом α .

Передний угол γ имеет у периферии наибольшее значение, а к центру уменьшается до значений, близких к нулю; это изменение угла по длине режущей кромки сверла определяется формулой $\operatorname{tg}\gamma_A = d_A \operatorname{tg}\omega / d \sin\varphi$, где d_A — диаметр, определяющий значение γ_A в точке А (см. рис. 2.22).

Угол наклона винтовых канавок ω сверл имеет некоторое оптимальное значение. Увеличение угла наклона винтовой канавки до определенного предела вызывает снижение работы пластической деформации и работы трения стружки о переднюю поверхность, так как увеличивается передний угол сверла. Благодаря этому крутящий момент и осевые силы уменьшаются. При значениях ω , больших оптимального, значительно возрастает путь движения стружки по канавкам инструмента при той же глубине сверления.

4.14. Основные типы сверл

Размеры, мм

| Сверла | ГОСТ или ТУ | Диаметр сверла d | Длина сверла L | Длина рабочей части l |
|--|-------------------|--------------------|------------------|-------------------------|
| Спиральные из быстрорежущей стали с цилиндрическим хвостовиком: | | | | |
| короткая серия | ГОСТ 4010 — 77 | 0,5 — 20 | 20 — 131 | 3 — 60 |
| средняя серия | ГОСТ 10902 — 77 | 0,3 — 20 | 19 — 205 | 3 — 140 |
| длинная серия | ГОСТ 886 — 77 | 1,0 — 20 | 56 — 254 | 33 — 166 |
| Спиральные из быстрорежущей стали с коническим хвостовиком: | | | | |
| нормальные | ГОСТ 10903 — 77 | 5 — 80 | 133 — 514 | 52 — 260 |
| удлиненные | ГОСТ 2092 — 77 | 6 — 30 | 225 — 395 | 145 — 275 |
| для станков с ЧПУ | ОСТ 220-2 — 80 | 6 — 30 | 133 — 296 | 57 — 175 |
| Спиральные из быстрорежущей стали для обработки труднообрабатываемых материалов: | | | | |
| с коническим хвостовиком, средняя серия | ГОСТ 20697 — 75 | 6 — 20 | 140 — 240 | 60 — 140 |
| с цилиндрическим хвостовиком, средняя серия | ГОСТ 20695 — 75 | 3 — 10 | 60 — 135 | 32 — 90 |
| для обработки глубоких отверстий | ТУ 2-035-731 — 80 | 4,5 — 10 | 139 — 205 | 87 — 140 |
| Сверла центровочные комбинированные (типы А, В, С) | ГОСТ 14952 — 75 | — | — | — |

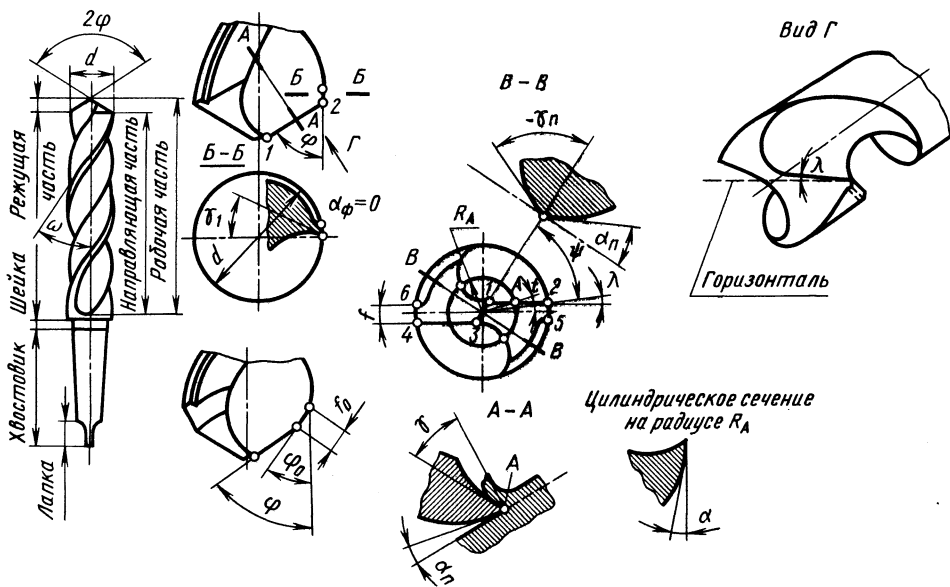


Рис. 4.5. Конструкция спирального сверла с различной формой заточки

Двойная заточка с углами ϕ и ϕ_0 (см. рис. 4.5) производится для повышения стойкости сверла и скоростей резания при сверлении труднообрабатываемых материалов, прежде всего высокопрочных и титановых сплавов; в этом случае кроме угла 2ϕ производится вторая заточка с $2\phi = 70 \dots 80^\circ$ на длине второй режущей кромки, равной $(0,18 \dots 0,22)l$.

Зенкерование — это способ обработки резанием предварительно просверленного, отштампованного или отлитого отверстия в целях достижения более правильной геометрической формы, большей точности (до 9–10-го квалитетов) и меньшей шероховатости поверхности (до $Ra = 1,25$ мкм).

Зенкеры применяют для обработки резанием предварительно обработанного отверстия в целях достижения более правильной геометрической формы, бо́льшей точности и меньшей шероховатости. Часто режущая кромка зенкера затачивается с двойным углом ϕ и ϕ_0 (кромки 1–2 и 2–3) для улучшения процесса резания на периферии (рис. 4.6). Преимущество зенкерования перед рассверливанием сверлом при обработке отверстий, полученных после отливки и штамповки, заключается в том, что обрабатывается большее число зубьев и, следовательно, достигается бо́льшая производительность.

Зенкеры классифицируют следующим образом: по назначению — спиральное — для обработки сквозных цилиндрических отверстий, цилиндрические — для обработки торцов у литых

обышек (цековки) и отверстий под головки винтов, конические (зенковки) — для обработки конических гнезд и центров в заготовках; по способу крепления — хвостовые и насадные; по конструктивным особенностям — цельные, напайные, сборные с вставными зубьями; по характеру работы — черновые или чистовые, комбинированные и ступенчатые.

Основные типы зенкеров приведены в табл. 4.15.

Рабочую часть зенкеров и зенковок изготавливают из быстрорежущей стали (HRC, 63–66) по ГОСТ 19265–73. Для оснащения рабочей части твердосплавных зенкеров и зенковок применяют твердосплавные пластины, которые изготавливают из сплавов марок ВК6, ВК8, ВК8-В, Т5К10, Т15К6, ВК6-М, Т14К8 по ГОСТ 3882–74.

Развертывание — это способ получения более точных отверстий с более низкой шероховатостью поверхности по сравнению с зенкерованием. Развертывание обеспечивает более правильную, чем зенкерование, геометрическую форму отверстия, точность обработки в пределах 7–9-го квалитетов и параметр шероховатости поверхности до $Ra = 0,63 \dots 0,16$ мкм; при развертывании в отдельных случаях (например, при доводке передних и задних поверхностей алмазными кругами и биении в центрах зубьев не более 0,01 мм) можно получить 5-й квалитет точности и $Ra = 0,16 \dots 0,02$ мкм.

Отличительные особенности развертывания, обеспечивающие получение высоких классов

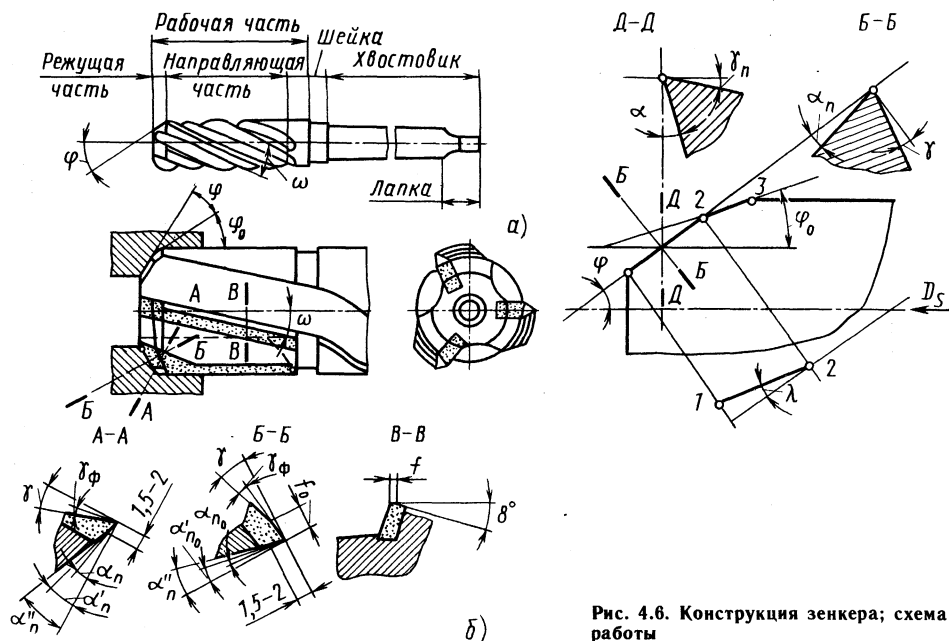


Рис. 4.6. Конструкция зенкера; схема его работы

4.15. Основные типы стандартных зенкеров и зенковок
Размеры, мм

| Инструмент | ГОСТ | Диаметр инструмента D | Длина инструмента L | Длина рабочей части l | Диаметр отверстия d |
|--|------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| Зенкеры цельные: с коническим хвостовиком | 12489 — 71 | 10 — 40 | 160 — 350 | 80 — 200 | — |
| насадные | | 32 — 80 | 30 — 52 | 10 — 18 | 13 — 32 |
| Зенкеры, оснащенные пластинами из твердого сплава: с коническим хвостовиком | 2255 — 71 | 14 — 50 | 180 — 355 | 85 — 210 | — |
| насадные | | 32 — 80 | 40 — 65 | — | — |
| Зенкеры насадные со вставными ножами из быстрорежущей стали | | 50 — 100 | 60 — 76 | — | 22 — 40 |
| Зенкеры со вставными ножами, оснащенные пластинами из твердого сплава: с коническим хвостовиком | 12510 — 71 | 30 — 50 | 262 — 308 | — | — |
| насадные | | 50 — 100 | 58 — 74 | — | 22 — 40 |
| Зенкеры цельные твердосплавные для обработки заготовок из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, с хвостовиком: цилиндрическим | 21543 — 76 | 3 — 10 | 61 — 133 | 12 — 20 | — |
| коническим | 21544 — 76 | 7,8 — 12 | 156 — 182 | 18 — 22 | — |
| Зенковки цилиндрические (для обработки опорных поверхностей под крепежные детали): с цилиндрическим хвостовиком | — | 2,3 — 14 | 40 — 100 | 6 — 20 | — |
| с коническим хвостовиком | — | 11 — 40 | 125 — 250 | — | — |
| насадные | — | 34 — 63 | 40 — 50 | — | — |

точности и малую шероховатость, следующие: малые углы в плане инструмента ϕ и, следовательно, небольшие нагрузки на единицу длины режущей кромки;

большое число режущих кромок инструмента (6—12), одновременно участвующих в работе; малые припуски на обработку: при предварительном развертывании припуск на сторону равен 0,15—0,5 мм, при чистовом — 0,05—0,15 мм;

очень незначительная толщина срезаемого слоя, вследствие чего в процессе резания при развертывании велик радиус закругления режущей кромки и интенсивно происходит трение по задней поверхности;

наличие специальных устройств, обеспечивающих надежное направление инструмента и калибровку отверстия в процессе обработки, обеспечиваемые цилиндрической частью развертки; высокая жесткость корпуса инструмента.

Классифицируют развертки следующим образом: по виду привода — ручные и машинные; по форме обрабатываемого отверстия — цилиндрические, конические и ступенчатые; по способу изготовления и крепления зубьев — цельные, составные, напайные, со вставными ножами и механическим креплением пластинок; по конструкции хвостовой части — с коническим, цилиндрическим и квадратным хвостовиком.

При развертывании как обычных конструкционных материалов, так и титановых сплавов широко применяют развертки, оснащенные твердым сплавом ВК8; быстрорежущие стали применяют только для изготовления разверток малого диаметра (8 мм), где установка твердосплавной пластины затруднена.

Основные габаритные размеры разверток приведены в табл. 4.16.

Протягивание является высокопроизводительным и точным способом обработки резанием, обеспечивающим низкую шероховатость поверхности. Его применяют для окончательной обработки сквозных отверстий, пазов, наружных и внутренних поверхностей произвольного фигурного контура; при этом профиль обрабатываемой поверхности в поперечном сечении определяется профилем заточки зубьев протяжки, благодаря чему протягивание позволяет получать любые фасонные поверхности, например внутренние шлишевые. Протягивание обеспечивает параметр шероховатости поверхности $Ra \leq 0,16$ мкм и 7—9-й квалитет точности.

Отличительные особенности протягивания следующие:

заданный припуск последовательно срезается большим числом зубьев инструмента в виде отдельных слоев металла малой толщины и большой ширины; при этом точность обработки зависит от точности изготовления жесткого инструмента (свободного протягивания), что в значительной мере обуславливает малую шероховатость и высокую точность протягиваемого контура;

режущее лезвие инструмента снимает весьма малые толщины обычно $a = 0,01 \dots 0,05$ мм при низких скоростях резания. Скорость резания при работе на станках малой и средней мощности значений 15 — 18 м/мин и на станках большой мощности — 6 — 8 м/мин;

отсутствие в процессе резания подачи как самостоятельного кинематического движения станка. Подача, определяющая толщину слоя металла, срезаемого режущей кромкой каждо-

4.16. Основные типы разверток

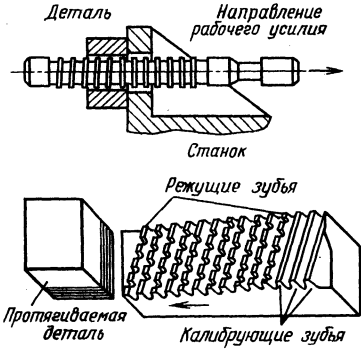
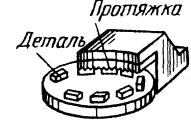
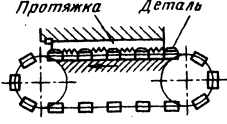
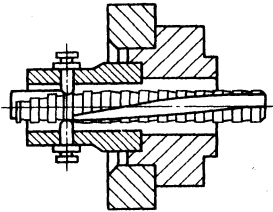
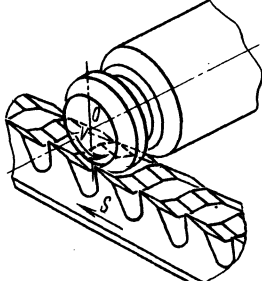
Размеры, мм

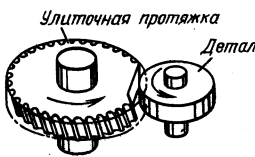
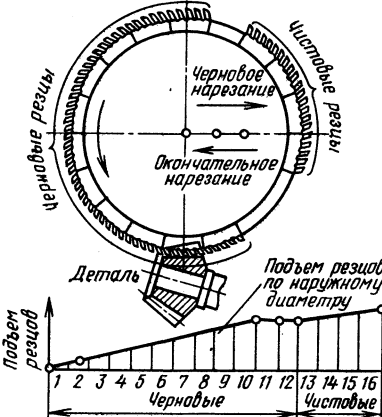
| Развертки | ГОСТ | D | L | l |
|--|------------|----------|-----------|---------|
| Машинные цельные с цилиндрическим хвостовиком | 1672 — 80 | 2 — 16 | 49 — 170 | 11 — 52 |
| Машинные, оснащенные пластинами из твердого сплава: | | | | |
| с коническим хвостовиком | | 10 — 32 | 140 — 240 | 16 — 18 |
| насадные, $d = 16 \dots 22$ | | 32 — 50 | 40 — 55 | 32 |
| Машинные цельные с коническим хвостовиком из твердого сплава | 16087 — 70 | 6,5 — 12 | 120 — 150 | 18 — 22 |
| Машинные цилиндрические хвостовые для обработки деталей из легких сплавов с хвостовиком: | | | | |
| цилиндрическим | 19267 — 73 | 6 — 9,5 | 90 — 100 | 25 — 30 |
| коническим | 19268 — 73 | 10 — 32 | 140 — 240 | 16 — 25 |
| Конусностью 1:30 с хвостовиком: | | | | |
| цилиндрическим | 11184 — 71 | 13 — 60 | 120 — 270 | — |
| коническим | 11182 — 71 | 13 — 100 | 160 — 460 | — |

го зуба, устанавливается путем превышения каждого последующего зуба над предыдущим. Таким образом, работа протяжки подобна обработке целым рядом строгальных резцов, смещенных относительно друг друга по вертикали

на определенную величину, равную толщине среза, приходящейся на каждый зуб; возможность осуществления за один ход комбинированной обработки. Это осуществляется совмещением в конструкции одного инструмен-

4.17. Кинематические схемы протягивания

| Схема | Эскиз | Области применения |
|---|---|--|
| <p>Возвратно-поступательное движение протяжки, заготовка неподвижна</p> |  | <p>Обработка отверстий любой формы. Протягивание наружных поверхностей любой формы</p> |
| <p>Вращательное движение протяжки или заготовки</p> |  | <p>Протягивание наружных поверхностей любой формы</p> |
| <p>Непрерывное движение заготовки (или секций протяжки) по замкнутому контуру</p> |  | <p>Протягивание наружных поверхностей любой формы</p> |
| <p>Винтовое движение протяжки</p> |  | <p>Протягивание винтовых поверхностей, например винтовых канавок</p> |
| <p>Поступательное движение протяжки и вращательное движение заготовки</p> |  | <p>Протягивание поверхностей тел вращения</p> |

| Схема | Эскиз | Области применения |
|--|---|--|
| Вращательное движение протяжки и вращательное движение заготовки |  | Протягивание поверхностей тел вращения |
| Вращательное движение протяжки и поступательное движение заготовки |  | Протягивание зубчатых колес |

та рабочих режущих кромок, выполняющих основную работу резания (черновую обработку), а также калибрующих и упрочняющих режущих кромок, обеспечивающих малую шероховатость и высокие физико-механические характеристики материала обработанной поверхности;

наличие специальных конструктивных элементов у инструмента, обеспечивающих центрирование и направление его в процессе работы.

Основные кинематические схемы протягивания приведены в табл. 4.17; наиболее распространенны схемы обработки протягиванием, когда главное движение резания — поступательное (первая схема).

Внутренние протяжки предназначены для обработки круглых, квадратных, многогранных и шлицевых отверстий, а также шпоночных и других фигурных пазов в отверстиях.

Наружные протяжки предназначены для обработки наружных поверхностей, пазов, уступов. Наружное протягивание применяют вместо фрезерования, строгания, шлифования. Протяжки для наружного протягивания являются специальным видом инструмента и не стандартизованы.

Фрезерование — способ обработки резанием, осуществляемый при вращательном движении многозубого инструмента — фрезы; поступательное движение подачи осуществляется от

носительным перемещением инструмента и заготовки. Фрезерование применяют для обработки плоскостей, пазов, фасонных поверхностей, тел вращения, а также изготовления резьбы, шлицев зубчатых колес и разрезки заготовок. Оно обеспечивает параметр шероховатости поверхности $Ra = 10 \dots 2,5$ мкм при полуцистовом и $Ra = 2,5 \dots 0,63$ мкм при чистовом фрезеровании, с точностью обработки 9—10-го квалитетов, а при скоростном и тонком фрезеровании — до 7-го квалитета. По производительности фрезерование значительно превосходит строгание, а также протягивание при снятии значительных припусков и обработке поверхностей, не требующих высокой точности и малой шероховатости.

Отличительными особенностями при фрезеровании (рис. 4.7, а) являются:

периодически повторяющийся во времени процесс резания с работой режущих кромок по циклу нагрузка — отдых; за полный оборот инструмента зуб фрезы находится в контакте с материалом заготовки очень малое время (сотые или тысячные доли секунды); на большей части оборота режущая кромка не работает; переменная нагрузка режущей кромки за один цикл резания вследствие изменения толщины срезаемого слоя; при этом у фрез с прямыми зубьями изменяется только толщина срезаемого слоя, у фрез с винтовыми зубьями —

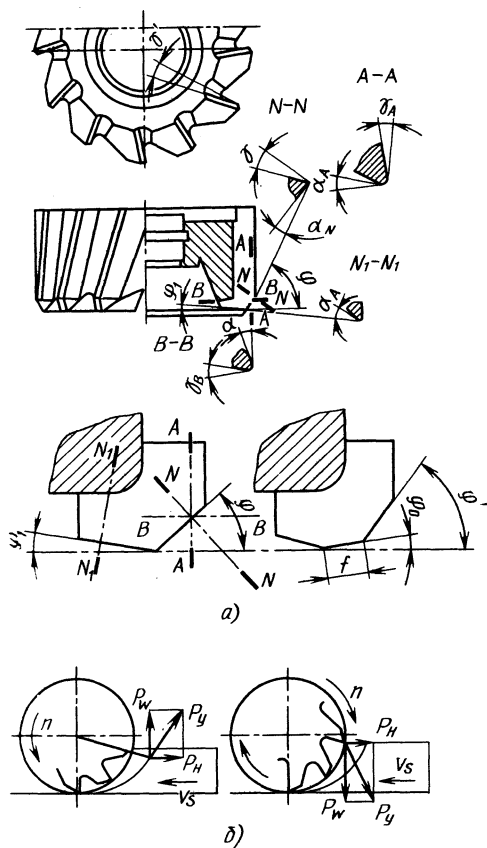


Рис. 4.7. Конструкция торцевой фрезы (а); схемы заботы при встречном (б) и попутном фрезеровании (в)

толщина срезаемого слоя и длина контакта режущей кромки с заготовкой;

ударная нагрузка на инструмент и станок вследствие периодически повторяющегося процесса врезания зуба в заготовку и выхода из нее. Поэтому фрезерование сопровождается интенсивными вынужденными колебаниями. Так как имеется радиус закругления r режущих кромок фрезы, врезание начинается не с нулевой толщины срезаемого слоя, а с некоторой толщины a , вследствие чего зуб определенное время скользит по некоторой дуге, не снимая стружки.

Фрезерование — это способ многолезвийной обработки, при котором в процессе резания участвуют одновременно несколько зубьев; чем больше число зубьев, тем меньше интенсивность колебаний на станке и процесс резания протекает спокойнее.

Схемы обработки при фрезеровании бывают двух видов:

1. Встречное фрезерование (рис. 4.7, а), т. е. резание направлено навстречу движению подачи; в этом случае работающие зубья фрезы при ее вращении направлены навстречу движению подачи. Зуб работает «из-под корки», что облегчает резание. Толщина срезаемого слоя изменяется от нуля до максимума. Это, с одной стороны, создает постепенное нарастание нагрузки на режущую кромку, но с другой, — вызывает при врезании скольжение зуба на определенном участке без резания, что приводит к интенсивному изнашиванию инструмента, налипанию стружки и наклепу; при этом последующий зуб обрабатывает сильно упрочненный слой. В зубе с налипшей стружкой при ударе на следующем обороте о заготовку происходит выкрашивание рабочей поверхности. Кроме того, резание сопровождается повышенными вибрациями, поскольку вертикальная составляющая окружной силы резания P стремится оторвать заготовку от стола, увеличивая при этом зазоры между столом и станиной.

2. Попутное фрезерование (рис. 4.7, б), когда направление движения работающих зубьев фрезы при ее вращении совпадает с направлением движения подачи. В начальный момент работы зуб фрезы сразу воспринимает максимальную нагрузку, так как начинает работать на наибольшей глубине. Однако при обработке заготовок, не имеющих на поверхности твердых и загрязненных корок, при фрезеровании сталей средней твердости, жаропрочных и коррозионно-стойких материалов работа по этой схеме приводит к повышению стойкости инструмента, точности обработки и уменьшению шероховатости, так как отсутствуют недостатки первой схемы — скольжение зуба на определенном участке без резания и пониженная виброустойчивость процесса резания. При использовании этой схемы происходит плавный выход режущих кромок из материала обрабатываемой заготовки.

Резьбонарезные инструменты нарезают резьбу. К ним относятся резьбовые резцы, гребенчатые фрезы, метчики, плашки и резьбонарезные головки. Резьбы также образуют накатыванием.

Резьбовые резцы применяют для нарезания наружной и внутренней резьб. Их подразделяют на стержневые (однорезцовые и гребенчатые), призматические (однорезцовые и гребенчатые) (рис. 4.8, а), круглые — (однорезцовые и гребенчатые) (рис. 4.8, б).

Резьбовыми гребенками (многолезвийными резцами) резьбы нарезают такими же методами, как и резцами. Типовые конструкции резьбовых гребенок приведены на рис. 4.8, а. У круглых гребенок необходимый задний угол обеспечивается смещением относительно центра вращения детали на величину $H_0 = R \sin \alpha$, где R — наи-

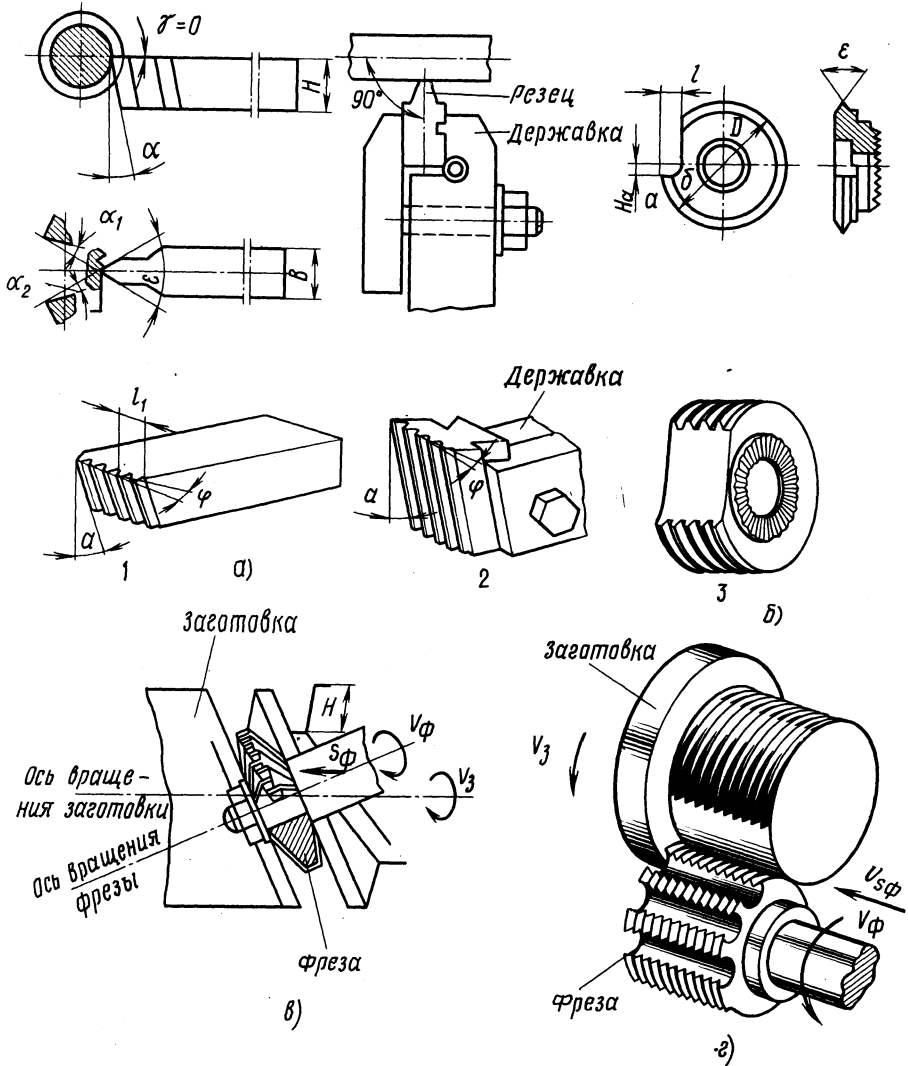


Рис. 4.8. Схемы нарезания резьбового профиля призматическим (а) и дисковым (б) резцом, обычными (в) и дисковыми (г) фрезами

больший радиус гребенки, мм. У тангенциальных гребенок он образуется наклоном корпуса гребенки на заданный задний угол.

Резьбонарезные головки представляют собой сборную конструкцию со вставными режущими элементами, автоматически раскрывающимися после рабочего хода и освобождающими обрабатываемую заготовку, это исключает необходимость вывинчивания заготовки из головки (ГОСТ 21760—76). Они обеспечивают нарезание резьбы среднего класса точности, наружных метрической и дюймовой резьбы с номинальным диаметром 4—60 мм и шагом до 4 мм. Тип головки и ее размер выбирают в соответствии с применяемым оборудованием. В зависи-

мости от обрабатываемого материала назначают геометрические параметры: передний угол γ , угол наклона передней поверхности к осью гребенки λ и превышение α вершины первого витка направляющей части гребенки над осью резьбы. Резьбонарезные головки применяют для нарезания цилиндрической резьбы дюймовой конической резьбы и трубной конической резьбы.

Плашки круглые изготавливают из легированных сталей 9ХС или ХВСГ. Круглыми плашками резьбу нарезают на токарных, револьверных станках, токарных автоматах.

Метчики применяют для нарезания правых левых резьб в сквозных и глухих отверстиях

Ручные метчики комплектные (из двух штук) черновые и чистовые с нешлифованным профилем для нарезания метрической резьбы изготовляют диаметром 4—27 мм по ОСТ 2 450—73, со шлифованным профилем — диаметром 1—16 мм — по ТУ 2-035-775 — 80.

Машинные метчики для нарезания метрической резьбы диаметром 0,25—0,9 мм изготовляют с цилиндрическим хвостовиком. Их применяют для нарезания резьбы в сквозных и глухих отверстиях в деталях приборов точной механики.

Гаечные метчики со шлифованным профилем резьбы изготовляют следующих степеней точности: $H1$, $H2$, $H3$. Их применяют для нарезания сквозных резьб и гаек с метрической резьбой по ГОСТ 9150—81 и дюймовой резьбой по ОСТ НКТП 1260 на гайкорезных автоматах и сверлильных станках.

Конические метчики применяют для нарезания конической дюймовой резьбы с углом профиля 60° (по ГОСТ 6111—52) и трубной конической резьбы (по ГОСТ 6211—81) на сверлильных и резьбонарезных станках, позволяющих регулировать передаваемый крутящий момент.

Резьбовые фрезы (рис. 4.8, в, г) предназначены для нарезания резьб на специальных резьбофрезерных станках. Различают два типа фрез: дисковые и гребенчатые (групповые); разновидностью последних являются насадные гребенчатые фрезы. Схема нарезания резьбы дисковой фрезой представлена на рис. 4.8, в. Основное движение резания, обеспечивающее необходимую скорость резания, осуществляет вращающаяся фреза. Главное движение резания D_1 и движение подачи D_2 связаны таким образом, что образуют заданный угол подъема резьбы; при этом за один оборот заготовки фреза перемещается в осевом направлении на шаг резьбы.

При образовании резьбы гребенчатой фрезой (рис. 4.8, г) за $1\frac{1}{4}$ оборота заготовки (четверть оборота необходима на доработку участка резьбы, образовавшегося при врезании инструмента на глубину резьбы) получается заданная на обработку поверхность. Гребенчатые фрезы применяют для нарезания резьб с мелким шагом на коротких заготовках. Этот метод резьбонарезания в несколько раз производительнее нарезания резцом.

Резьбофрезерование можно осуществлять как по направлению вращения фрезы, так и против него, выбор одного из этих методов определяется условиями резания при фрезеровании (рис. 4.8, б).

Зуборезный инструмент (ГОСТ 19265—73) в основном изготовляют из быстрорежущих сталей, а также из твердых сплавов вольфрамовой группы ВК6-М, ВК8.

Дисковые модульные фрезы применяют для чернового и чистового нарезания прямозубых цилиндрических колес, черногового нарезания зубьев косозубых колес, черногового, а иногда чистового нарезания прямозубых конических колес, зубчатых реек, шлицевых валов методом копирования. Фрезы изготовляют двух типов: черновые с нешлифованным профилем для черногового зубонарезания и чистовые со шлифованным профилем. Для черногового и чистового нарезания цилиндрических колес 9-й степени точности разработаны высокопроизводительные сборные острозаточенные дисковые фрезы.

Пальцевые модульные фрезы применяют для нарезания прямозубых, косозубых, цилиндрических и шевронных зубчатых колес крупного модуля ($m=10\text{--}50$ мм). Черновые пальцевые фрезы изготовляют с передним углом $5\text{--}10^\circ$ и канавками для дробления стружки. У чистовых пальцевых фрез передний угол равен нулю.

Зуборезные гребенки разделяют на прямозубые и косозубые; они могут работать методом обкатки и врезания с периодическим делением снимающего припуска. Прямозубые гребенки предназначены для черногового нарезания зубчатых колес средних и крупных модулей методом врезания. Косозубые гребенки целесообразно применять при обработке косозубых цилиндрических колес с ограниченным выходом инструмента, с большими углами наклона линии колеса, а также шевронных колес с узкой разделительной канавкой.

Червячные фрезы представляют собой одноили многозаходный червяк. Зубья фрезы заточены. Червячные фрезы применяют для нарезания цилиндрических колес с прямыми и косыми зубьями внешнего зацепления, червячных колес и шлицевых валов. Фрезы разделяют на черновые, чистовые и прецизионные. Твердосплавные червячные фрезы изготовляют сборными и цельными.

Долбяки зуборезные чистовые по ГОСТ 9323—79 изготовляют пяти типов и трех классов точности. Долбяки класса точности АА предназначены для нарезания колес 6-й степени точности, класса точности А — для нарезания колес 7-й степени точности и класса точности В — для нарезания колес 8-й степени точности. Тип 1 — дисковые прямозубые долбяки классов точности АА, А и В, тип 2 — дисковые косозубые долбяки классов точности А и В.

Дисковые шеверы по ГОСТ 8570—80 изготовляют двух типов и трех классов точности: при обработке зубчатых колес с числом зубьев более 40 — шеверы класса АА — для колес 5-й степени точности; класса А — для колес 6-й степени точности и класса В — для колес 7-й степени точности. Шеверы (ГОСТ 19267—73) изготовляют из быстрорежущей стали.

Абразивная обработка в зависимости от вида

инструмента и принятой кинематической схемы подразделяется на шлифование, хонингование, суперфиниширование, полирование и притирку. Процесс резания заключается в том, что зерна абразивного материала путем одновременного царапания и истирания удаляют с заготовки заданный слой материала. Абразивную обработку с преобладанием царапающего действия называют шлифованием, с преобладающим истирающим действием — полированием.

Абразивный инструмент состоит из твердых зерен абразивного материала неправильной формы с острыми кромками, соединенными между собой специальными связующими веществами; для получения зерен используют обычно абразивные материалы (электрокорунд нормальный Э и белый ЭБ, карбид кремния — карборунд черный КЧ или зеленый КЗ), а также искусственные алмазы и эльбор (кубический нитрид бора). Основными видами связующих материалов являются органические (вулканистая В и бакелитовая Б) и неорганические (керамическая К, магнезиальная М и силикатная С) связки. Для производства алмазных и эльборовых кругов используются металлические связки.

Шлифовальные круги общего применения выпускаются на керамической (К), бакелитовой (Б) и вулканитовой (В) связках.

Типы и основные размеры шлифовальных кругов общего применения приведены в табл. 4.18—4.20.

Шлифование является резанием с помощью абразивного инструмента — круга, обеспечивающего высокую (6—7-й квалитет) точность

и малую шероховатость обработанной поверхности ($Ra=1,25...0,08$ мкм). В ряде случаев шлифование применяют как метод предварительной обработки поверхностей при обдирке отливок, поковок, проката, а также при резании заготовок из прутка.

Кинематические схемы шлифования различают в зависимости от вида обрабатываемой поверхности (наружная или внутренняя) и ее формы — обработка тел вращения, плоских, резьбовых, зубчатых, шлицевых и сложных поверхностей. Наиболее распространенными видами шлифования являются: наружное круглое шлифование в центрах с продольным (рис. 4.9, а) и поперечным (рис. 4.9, б) движениями подачи, т. е. методом врезания; круглое внутреннее шлифование с вращением обрабатываемой заготовки и планетарным движением круга (рис. 4.9, в); плоское шлифование на станках с прямоугольным или круглым столом периферией круга (рис. 4.9, г), торцом круга (рис. 4.9, д); бесцентровое шлифование круглых наружных и внутренних поверхностей (рис. 4.9, е); фасонное шлифование (шлифование шлицев, резьб и зубьев колес и сложных поверхностей), а также шлифование абразивной лентой.

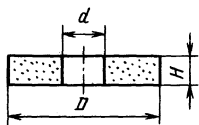
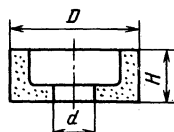
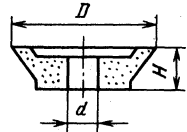
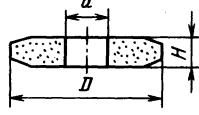
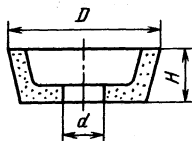
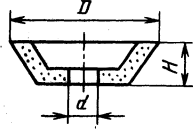
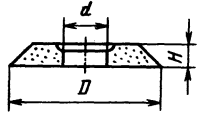
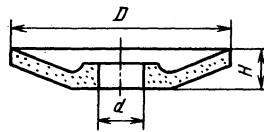
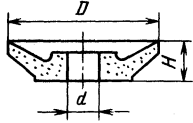
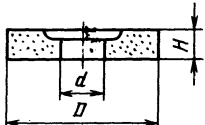
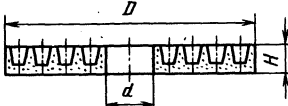
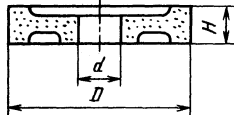
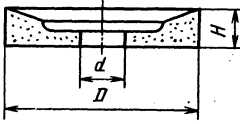
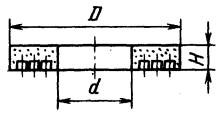
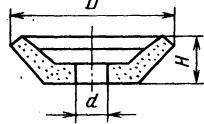
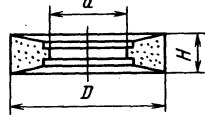
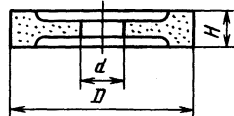
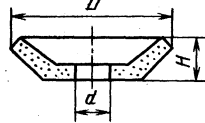
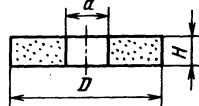
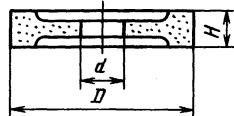
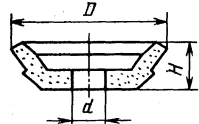
Для абразивной обработки отверстий применяют шлифовальные головки по ГОСТ 2447—82 следующих типов: АW — цилиндрические; DW — угловые; EW — конические; F—1W — сводчатые; KW — конические с закругленной вершиной; F-2W — шаровые; FW — шаровые с цилиндрической боковой поверхностью.

Хонингование и суперфиниширование явля-

4.18. Области применения абразивных инструментов различной зернистости

| Зернистость инструмента | | Область применения |
|-------------------------|-------------------|--|
| обычные абразивы | алмазные | |
| М40 — М5 | 40/28 — 5/3 | Доводка осеботочных деталей. Окончательная доводка деталей допустимой погрешностью 3—5 мкм и $Ra = 0,16...0,02$ мкм. Суперфиниширование, окончательное хонингование. Шлифование резьбы с мелким шагом |
| 8; 6 | 63/50 — 50/40 | Чистовое тонкое шлифование деталей из твердых сплавов, металлов, стекла и других неметаллических материалов. Доводка режущего инструмента. Резьбошлифование с мелким шагом резьбы. Предварительное хонингование |
| 25; 20; 16 | 200/160 — 125/100 | Чистовое шлифование деталей, заточка режущих инструментов, предварительное алмазное шлифование, профильное шлифование с $Ra = 1,25...0,16$ мкм. Шлифование хрупких материалов |
| 40; 32 | 315/250 — 250/200 | Предварительное и чистовое шлифование деталей с $Ra = 2,5...0,32$ мкм. Заточка режущих инструментов |
| 50; 63 | — | Предварительное круглое наружное, внутреннее, бесцентровое и плоское шлифование с $Ra = 2,5...0,63$ мкм. Отделка металлов и неметаллических материалов. Шлифование вязких материалов. Заточка крупных и средних резцов |

4.19. Типы шлифовальных кругов общего применения

| Тип и форма круга* | Тип и форма круга* | Тип и форма круга* |
|--|---|---|
| <p>ПП — с прямым профилем</p>  | <p>ЧП — чашечный цилиндрический</p>  | <p>1ТП — тарельчатые</p>  |
| <p>2П — с двусторонним коническим профилем</p>  | <p>ЧК — чашечный конический</p>  | <p>2ТП — тарельчатые</p>  |
| <p>3П — с коническим профилем</p>  | <p>1Т — тарельчатый</p>  | <p>4ТП — тарельчатые</p>  |
| <p>ПВ — с выточкой</p>  | <p>ПР — специальный</p>  | <p>ПВДС — с двусторонней выточкой и ступицей</p>  |
| <p>ПВК — с конической выточкой</p>  | <p>ПН — с запрессованными крепежными элементами</p>  | <p>ТП — тарельчатые</p>  |
| <p>ПВДК — с двусторонней конической выточкой</p>  | <p>ПВД — с двусторонней выточкой</p>  | <p>6ТП — тарельчатые</p>  |
| <p>К — кольцевой</p>  | <p>7ТП — тарельчатые</p>  | <p>7ТП — тарельчатые</p>  |

*Размеры кругов см. табл. 4.20.

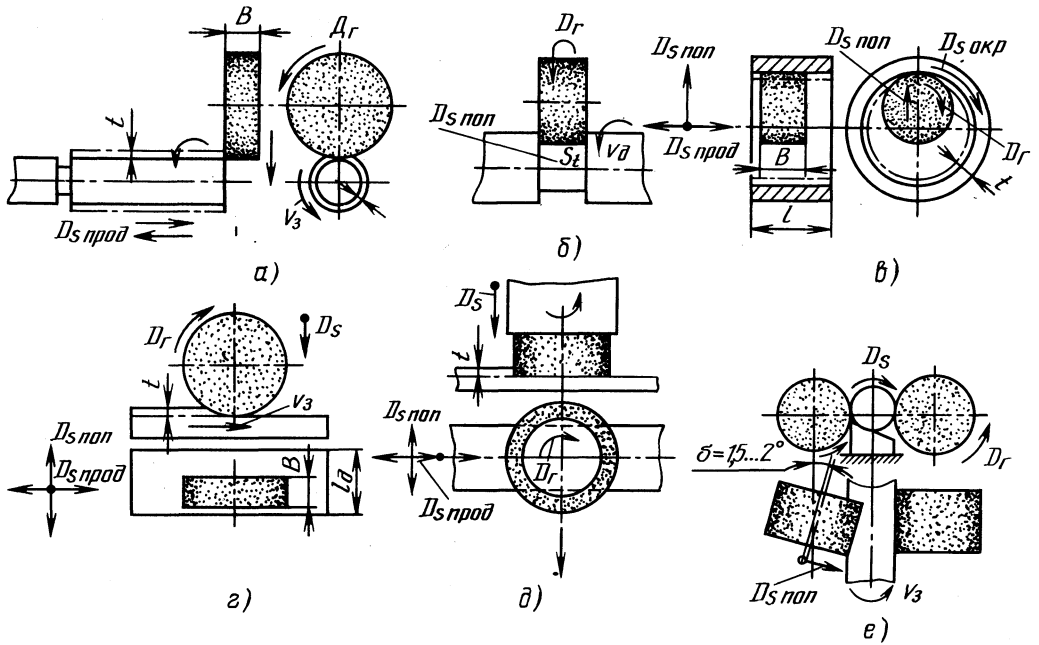


Рис. 4.9. Типовые схемы шлифования

ются процессами соответственно притирочного и отделочного шлифования; однако они отличаются от последнего пониженным динамическим и тепловым воздействием при резании. Абразивную обработку хонингованием применяют для обработки внутренних и, реже, наружных поверхностей до получения $Ra=0,16...0,02$ мкм и высокого качества. Помимо этого хонингование обеспечивает высокую точность формы поверхности (овальность и конусность не более

0,005 мм). Однако следует учитывать, что при хонинговании происходит копирование положения оси отверстия относительно полученного на предыдущих операциях.

Хонингование осуществляют брусками, свободно размещенными в хонинговальной головке так, чтобы они самоустанавливались по обрабатываемой поверхности. По способу подачи брусков головки делят на механические (обычно с пружинами) и гидравлические; в обоих

4.20. Основные размеры (мм) и характеристики шлифовальных кругов

| Тип круга | Диаметр | Высота | Отверстие | Шлифовальный материал | Зернистость |
|---------------------------------|---------------|-----------|-----------|------------------------|-------------------------------|
| Круги на керамической связке | | | | | |
| ПП | 3 — 25 | 1 — 40 | 1 — 68 | 2А, 4А, 9А | 40 — 10 50 — 6 50 — М28 |
| | 32 — 150 | 2,5 — 100 | 6 — 51 | 2А, 4А, 9А, 5С, 6С | |
| | 175 — 350 | 3,2 — 200 | 32 — 203 | 1А, 2А, 4А, 9А, 5С, 6С | |
| | 400 — 1060 | 6 — 200 | 127 — 305 | 1А, 2А, 4А, 9А, 5С, 6С | |
| 2П | 250 — 500 | 10 — 32 | 76 — 203 | 2А, 9А, 6С | 40 — М28 |
| 3П | 63 — 500 | 6 — 50 | 10 — 203 | 2А, 5А, 9А | 40 — 16 |
| ПВ | 10 — 600 | 13 — 80 | 3 — 127 | 1А, 2А, 4А, 9А, 6С | 50 — 6 |
| ПВК | 300 — 750 | 50 — 80 | 127 — 305 | 1А, 2А | 50 — 16 |
| ПВД | 100 — 900 | 25 — 250 | 32 — 305 | 1А, 2А, 9А | 50 — 16 |
| ЧЦ | 40 — 300 | 25 — 100 | 13 — 150 | 2А, 6С | 50 — 16 |
| ЧК | 50 — 300 | 25 — 150 | 13 — 150 | 2А, 4А, 6С | 50 — 16 |
| К | 450 — 500 | 100, 125 | 305, 400 | 1А | 50 — 16 |
| Т, 1Т | 80 — 350 | 8 — 40 | 13 — 127 | 2А, 4А, 6С | 40 — 16 |
| 1ТП, 2ТП, 4ТП, 5ТП, 6ТП, 7ТП | 5 40 — 260 | 11 — 32 | 6 — 32 | 2А | 40 — 16 |

| Тип круга | Диаметр | Высота | Отверстие | Шлифовальный материал | Зернистость |
|--|-----------|---------------|---------------|-----------------------|-------------|
| Круги на бакелитовой связке | | | | | |
| ПП | 125 — 350 | 6 — 50 | 32 — 127 | 1А, 5С, 6С | 50 — 16 |
| | 400 — 900 | 40 — 200 | 127 — 305 | 1А, 5С, 6С | 50 — 6 |
| ЭП | 100 — 300 | 6 — 13 | 20 — 127 | 1А | 50 — 16 |
| ПВ | 32 | 32 | 6, 10 | 6С | М28 |
| | 750 | 80 | 305 | 1А | 50 — 16 |
| ЧЦ | 50 — 250 | 32 — 100 | 13 — 127 | 1А | 50 — 16 |
| ЧК | 50 — 175 | 25 — 63 | 13 — 32 | 1А, 2А, 5С, 6С | 50 — 6 |
| Т | 80 — 150 | 8 — 16 | 13 — 32 | 6С | 12 — 6 |
| К | 200 — 500 | 100 — 125 | 160 — 400 | 1А, 5С | 50 — 6 |
| ПР | 500, 750 | 16 | 51, 203 | 1А, 5С | 50 — 6 |
| ПН | 500, 600 | 63, 80 | 305 | 1А, 5С | 50 — 6 |
| Отрезные | 100 — 400 | 2 — 4 | 20 — 32 | 1А, 5С | 50 — 16 |
| Отрезные с упрочняющими элементами для скоростей круга 60 и 50 м/с | 50 — 1200 | 2 — 12 | 10 — 100 | 1А, 5С | 125 — 40 |
| Отрезные с упрочняющими элементами для работы на ручных машинах | 180, 230 | 3 | 22 | 1А, 5С | 125 — 50 |
| Круги на бакелитовой связке для обдирочного шлифования | | | | | |
| ПП | 125 — 900 | 10 — 160 | 32 — 305 | 1А, 3А, 5С | 200 — 63 |
| ПП с упрочняющими элементами | 40 — 230 | 6 — 50 | 13 — 32 | 1А, 5С | 125 — 50 |
| ПВ | 40 — 200 | 13 — 32 | 20 — 100 | 1А, 5С | 125 — 50 |
| ЭП | 125 — 230 | 2 — 10 | 22 (20) | 1А, 5С | 63 — 50 |
| ЧЦ | 80, 125 | 40, 63 | 65, 100 | 1А, 5С | 125 — 50 |
| ЧК | 80, 125 | 32, 55 | 65, 88, 100 | 1А, 5С | 125 — 50 |
| К | 500, 600 | 100, 110, 150 | 380, 400, 480 | 1А | 125 — 63 |
| 2К | 600 | 150 | 480 | 1А | 125 — 63 |
| Круги на вулканитовой связке | | | | | |
| ПП | 20 — 200 | 5 — 100 | 6 — 76 | 1А | 40 — 8 |
| | 250 — 600 | 5 — 250 | 127 — 305 | 1А | 40 — 8 |
| ПВД | 300, 350 | 100 — 250 | 127 | 1А | 40 — 8 |
| Отрезные | 80 — 500 | 0,6 — 4 | 20, 32 | 1А | 50 — 8 |

случаях непосредственный разжим брусков осуществляется с помощью конического стержня. Базирование по конусу головки обеспечивает высокую точность формы отверстия. В процессе обработки хонинговальная головка шарнирно соединяется со стеблем и шпинделем станка и совершает два движения: вращательное и возвратно-поступательное.

Суперфиниш обеспечивает получение поверхностей с $Ra = 0,08 \dots 0,02$ мкм; при этом не изменяют размеров, формы и положения обрабаты-

ваемых поверхностей; поэтому требуемая точность обработки по этим показателям обеспечивается на предыдущих операциях. Отделочное шлифование применяют для обработки наружных и внутренних цилиндрических и конических поверхностей, а также плоскостей в целях получения особо низкого параметра шероховатости.

Отделочное шлифование осуществляют путем воздействия на поверхность обрабатываемой заготовки колеблющихся брусков малой зер-

ности; при этом заготовка совершает вращательное движение, суппорт с колеблющимися брусками — движение подачи.

Доводка обеспечивает высокую точность обработки как по размерам (до 0,1—0,5 мкм), так и по геометрической форме, а также исключительно низкий параметр шероховатости поверхности $Ra=0,16...0,01$ мкм. Доводка заключается в снятии тонких слоев материала мелкозернистым порошком в среде смазочного материала под воздействием относительного движения притира и заготовки. Доводка является разновидностью химико-механической обработки. Снятие материала происходит в результате механического разрушения выступающих микронеровностей в поверхностно-активных средах (пасты типа ГОИ) или в растворах солей (сернистая медь, азотнокислое серебро) с абразивной суспензией.

Полирование применяют для отделки поверхностей в целях придания им декоративного вида и повышения коррозионной стойкости, при этом точность обработки по сравнению с точностью обработки предыдущей операции не меняется.

Для полирования применяют мягкие абразивные материалы — венскую известь, крокус, оксид хрома, алюминий или кремний. Для обработки их наносят на упругие круги из дерева, кожи, войлока, фетра, тканей и ленты. Для полирования стальных деталей используют пасты ГОИ. Связующими материалами, входящими в полировальные пасты, являются стеариновая и олеиновая кислоты, парафин, техническое сало, воск, солидол и др. Помимо связывающих функций они также активизируют процесс.

При полировании применяют две кинематические схемы: 1) обработку периферией; 2) обработку торцом круга. Полирование торцом круга выполняют с помощью специальной полировальной головки с эластичной опорной поверхностью. В качестве инструмента применяют два вида сменных рабочих дисков: войлочные и абразивные. Войлочные диски вырубают из технического тонкошерстного войлока. Абразивные диски вырезают из абразивной водостойкой шкурки на бумажной основе. Диски крепят специальным клеем на облицованном резиновом торце опорного диска головки.

4.2. Выбор режимов обработки резанием

При назначении режимов обработки резанием на определенную операцию учитывают характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, тип и состояние оборудования, прежде всего его жесткость.

Элементы режима обработки резанием следующие:

глубина резания t : при черновой обработке назначают по возможности максимальную t , равную большей части припуска, при чистовой обработке — в зависимости от требуемых точности размеров и шероховатости обработанной поверхности;

подача S : при черновой обработке выбирают максимально возможную подачу, исходя из жесткости и прочности узлов станка и технологической оснастки, мощности привода станка, прочности режущей части инструмента и других ограничивающих факторов; при чистовой обработке — в зависимости от требуемой степени точности и шероховатости обработанной поверхности;

скорость резания v , которую рассчитывают по эмпирическим формулам, установленным для каждого вида обработки.

Точение. Глубина резания зависит от припуска на обработку; следует стремиться производить обработку за один рабочий ход или сокращать число рабочих ходов. Суммарный припуск распределяется следующим образом: 60 % на черновую обработку и 40 % — на чистовую или 45 % на черновую обработку, 35 % — на получистовую и 20 % на чистовую. При параметре шероховатости обработанной поверхности $Ra=3,2$ мкм включительно $t=0,5...2,0$ мм, при $Ra \geq 0,8$ мкм $t=0,1...0,4$ мм.

При черновом точении подача принимается максимально допустимой по мощности оборудования, жесткости и прочности режущей пластины и державки. Рекомендуемые подачи при черновом наружном точении в черновом растачивании приведены в табл. 4.21 и 4.22.

Подачи при чистовом точении выбирают в зависимости от требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности и радиуса при вершине резца (приведены в табл. 4.23, 4.24), типовые режимы резания приведены в табл. 4.25.

При наружном продольном и поперечном точении и растачивании скорость резания рассчитывают по эмпирической формуле $v =$

$$v = \frac{C_v}{T_m^x S^y} k_v, \text{ где } C_v \text{ — коэффициент, который}$$

определяют в зависимости от свойств обрабатываемого материала; T — период стойкости инструмента; x, y — показатели степени, определяющие влияние на силу резания соответственно глубины резания и подачи на допустимую скорость резания; k_v — произведение коэффициентов, учитывающих влияние прочности и вида заготовки k_{mv} , k_{zv} , угла в плане ϕ и материала инструмента k_{qv} и k_{nv} .

Существенное влияние на силу резания оказывают марки твердого сплава. Если принять, что для сплава ВК6 $k_{nv}=1$, то для сплава ВК2 $k_{nv}=1,2$, для ВК3 $k_{nv}=1,15$, для ВК8 $k_{nv}=0,83$.

4.21. Значения подачи при черновом наружном точении быстрорежущей стали резцами с пластинами из твердого сплава

| Диаметр заготовки, мм | Размер державки резца, мм | Обрабатываемый материал | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------|--|------------|------------|-------------|-----------|-----------------------|------------|-------------|-------------|--|
| | | Сталь конструкционная углеродистая, легированная и жаропрочная | | | | | Чугун и медные сплавы | | | | |
| | | S, мм/об, при t, мм | | | | | | | | | |
| До 20 | От 16 × 25 до 25 × 25 | До 3 | Св. 3 до 5 | Св. 5 до 8 | Св. 8 до 12 | До 3 | Св. 3 до 5 | Св. 5 до 8 | Св. 8 до 12 | Св. 8 до 12 | |
| Св. 20 до 40 | От 16 × 25 до 25 × 25 | 0,3 — 0,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| Св. 40 до 60 | От 16 × 25 до 25 × 40 | 0,4 — 0,5 | 0,3 — 0,4 | 0,3 — 0,7 | — | 0,4 — 0,5 | — | — | — | — | |
| Св. 60 до 100 | От 16 × 25 до 25 × 40 | 0,5 — 0,9 | 0,4 — 0,8 | 0,5 — 0,9 | — | 0,6 — 0,9 | 0,5 — 0,8 | 0,4 — 0,7 | — | — | |
| Св. 100 до 400 | От 16 × 25 до 25 × 40 | 0,6 — 1,2 | 0,5 — 1,1 | 0,6 — 1,0 | — | 0,8 — 1,4 | 0,7 — 1,2 | 0,6 — 1,0 | — | — | |
| | | 0,8 — 1,3 | 0,7 — 1,2 | 0,6 — 1,0 | — | 1,0 — 1,5 | 0,8 — 1,9 | 0,8 — 1,1 | 0,5 — 0,9 | 0,6 — 0,9 | |

Примечания: 1. Меньшие значения подачи соответствуют меньшим размерам державки резца и более прочным обрабатываемым материалам.

2. При обработке жаропрочных сталей и сплавов подачи свыше 1 м/об не применять.

3. При обработке прерывистых поверхностей и при работах с ударами табличные значения подачи следует умножить на коэффициент 0,75 — 0,85.

4. При обработке закаленных сталей табличные значения подачи следует умножить на коэффициент 0,8 для стали с HRC₄₄₋₅₆ и на 0,5 для стали с HRC₅₇₋₆₂.

4.22. Значения подачи при черновом растачивании на токарных, токарно-револьверных станках резцами из быстрорежущей стали из твердого сплава

| Диаметр круглого сечения резца или размера сечения оправки, мм | Вылет резца или оправки, мм | Обрабатываемый материал | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|--|-------------|------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|---|---|--|
| | | Сталь конструкционная углеродистая, легированная и жаропрочная | | | | | Чугун и медные сплавы | | | | |
| | | S, мм/об, при t, мм | | | | | | | | | |
| 10 | 50 | 2 | 3 | 5 | 2 | 3 | 5 | 2 | 3 | 5 | |
| 12 | 60 | 0,08 | — | — | 0,12 — 0,16 | — | — | — | — | — | |
| 16 | 80 | 0,1 — 0,2 | 0,08 | 0,1 | 0,12 — 0,20 | 0,12 — 0,18 | — | — | — | — | |
| 20 | 100 | 0,5 — 0,3 | 0,15 | 0,12 | 0,2 — 0,3 | 0,15 — 0,25 | 0,15 — 0,25 | 0,1 — 0,18 | — | — | |
| 25 | 125 | 0,25 — 0,5 | 0,15 — 0,25 | 0,12 | 0,3 — 0,4 | 0,25 — 0,35 | 0,25 — 0,35 | 0,12 — 0,25 | — | — | |
| 30 | 150 | 0,4 — 0,7 | 0,15 — 0,4 | 0,12 — 0,2 | 0,4 — 0,6 | 0,3 — 0,5 | 0,25 — 0,35 | 0,12 — 0,25 | — | — | |
| | 200 | | 0,2 — 0,5 | 0,12 — 0,3 | 0,5 — 0,8 | 0,4 — 0,6 | 0,25 — 0,45 | 0,12 — 0,25 | — | — | |
| | 150 | | 0,25 — 0,6 | 0,15 — 0,4 | — | 0,6 — 0,8 | 0,3 — 0,8 | 0,25 — 0,45 | — | — | |
| | 300 | | 0,6 — 1,0 | 0,5 — 0,7 | — | 0,7 — 1,2 | 0,5 — 0,9 | 0,25 — 0,45 | — | — | |
| 40 × 40 | | | 0,4 — 0,7 | 0,3 — 0,6 | — | 0,6 — 0,9 | 0,4 — 0,7 | 0,25 — 0,45 | — | — | |

Примечание. Большие значения подачи рекомендуются для меньшей глубины резания при обработке менее прочных материалов, меньшие — для большей глубины и более прочных материалов.

4.23. Значения коэффициента C_v и показателей степени в формулах скорости резания при обработке резцами

| Вид обработки | Материал режущей части резца | Подача S , мм/об | Коэффициент и показатели степени | | | |
|--|------------------------------|--------------------|----------------------------------|------|------|------|
| | | | C_v | x | y | m |
| Обработка конструкционной углеродистой стали, $\sigma_b = 750$ МПа | | | | | | |
| Наружное продольное точение проходными резцами | Т15К6* | До 0,3 | 420 | 0,15 | 0,20 | 0,20 |
| | | Св. 0,3 | 350 | | 0,35 | |
| | | До 0,7 | 345 | | 0,40 | |
| | | Св. 0,7 | 340 | | 0,45 | |
| Отрезание | Т5К10* Р18** | — | 47 | — | 0,80 | 0,20 |
| | | | 23,7 | | 0,66 | 0,25 |
| Фасонное точение | Р18** | — | 22,7 | 0,23 | 0,30 | 0,20 |
| Нарезание крепежной резьбы | Т15К6* | — | 244 | 0,23 | 0,30 | 0,20 |
| Обработка серого чугуна, 190 НВ | | | | | | |
| Наружное продольное точение проходными резцами | ВК6* | $\leq 0,40$ | 292 | 0,15 | 0,20 | 0,20 |
| | | > 40 | 243 | | 0,40 | |
| Отрезание | ВК6* | — | 68,5 | — | 0,40 | 0,20 |
| Нарезание крепежной резьбы | | | 83 | | 0,45 | — |

Обработка медных гетерогенных сплавов средней твердости, 100—140 НВ

| | | | | | | |
|--|------|-------------|-----|------|------|------|
| Наружное продольное точение проходными резцами | Р18* | $\leq 0,20$ | 270 | 0,12 | 0,25 | 0,23 |
| | | Св. 0,20 | 182 | | 0,30 | |

Обработка силумина и литейных алюминиевых сплавов, $\sigma_b = 100 \dots 200$ МПа, НВ ≤ 65 ; дуралюминия с $\sigma_b = 300 \dots 400$ МПа, НВ ≤ 100

| | | | | | | |
|--|------|-------------|-----|------|------|------|
| Наружное продольное точение проходными резцами | Р18* | $\leq 0,20$ | 485 | 0,12 | 0,25 | 0,28 |
| | | Св. 0,20 | 328 | | 0,50 | |

*Без охлаждения.

**С охлаждением.

4.24. Значения подачи при радиусе r при вершине инструмента

| Параметр шероховатости поверхности, мкм | | r , мм | | | | | |
|---|------|----------|------|-------|------|------|------|
| | | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2,0 | 2,4 |
| Ra | Rz | | | | | | |
| 0,63 | — | 0,07 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,17 |
| 1,25 | — | 0,10 | 0,13 | 0,165 | 0,19 | 0,21 | 0,23 |
| 2,50 | — | 0,144 | 0,20 | 0,246 | 0,29 | 0,32 | 0,35 |
| — | 20 | 0,25 | 0,33 | 0,42 | 0,49 | 0,55 | 0,60 |
| — | 40 | 0,35 | 0,51 | 0,63 | 0,72 | 0,80 | 0,87 |
| — | 80 | 0,47 | 0,66 | 0,81 | 0,94 | 1,04 | 1,14 |

Примечание. Подачи даны для обработки сталей с $\sigma_b = 700 \dots 900$ МПа и чугунов; для сталей с $\sigma_b = 500 \dots 700$ МПа значения подач следует умножить на коэффициент 0,45, для сталей с $\sigma_b = 900 \dots 1100$ МПа значения подач умножать на коэффициент $k = 1,25$.

4.25. Режимы резания при наружном продольном точении и отрезке деталей из закаленной стали резцами с пластинами из твердого сплава

| S, мм/об | Ширина ре- за, мм | v, м/мин, при твердости обрабатываемого материала HRC _с | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|--|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|
| | | 35 | 39 | 43 | 46 | 49 | 51 | 53 | 56 | 59 | 62 |
| Наружное продольное точение | | | | | | | | | | | |
| 0,2 | — | 157 | 135 | 116 | 107 | 83 | 76 | 66 | 48 | 32 | 26 |
| 0,3 | — | 140 | 118 | 100 | 92 | 70 | 66 | 54 | 39 | 25 | 20 |
| 0,4 | — | 125 | 104 | 88 | 78 | 60 | 66 | 45 | 33 | — | — |
| 0,5 | — | 116 | 95 | 79 | 71 | 53 | — | — | — | — | — |
| 0,6 | — | 108 | 88 | 73 | 64 | 48 | — | — | — | — | — |
| Отрезка | | | | | | | | | | | |
| 0,05 | 3 | 131 | 110 | 95 | 83 | 70 | 61 | 54 | 46 | 38 | 29 |
| 0,08 | 4 | 89 | 75 | 65 | 56 | 47 | 41 | 37 | 31 | 25 | 19 |
| 0,12 | 6 | 65 | 55 | 47 | 41 | 35 | 30 | 27 | 23 | 18 | 14 |
| 0,16 | 8 | 41 | 43 | 37 | 32 | 27 | 23 | — | — | — | — |
| 0,20 | 12 | 43 | 36 | 31 | 27 | 23 | 20 | — | — | — | — |

Примечание. В зависимости от глубины резания табличное значение скорости резания умножают на поправочный коэффициент: 1,15 при $t = 0,4...0,9$ мм; 1,0 при $t = 1...2$ мм и 0,91 при $t = 2...3$ мм.

Для сплавов группы ТК эти данные следующие: для Т5К10 $k_{nv} = 0,65$, для Т5К6 $k_{nv} = 1,0$, для Т30К4 $k_{nv} = 1,4$, для Т60К6 $k_{nv} = 1,91$.

Сила резания обычно раскладывается на три составляющие, направленные по осям координат станка: тангенциальную F_t , радиальную F_r и осевую F_a .

При наружном продольном точении, растачивании, отрезании и фасонном точении эти составляющие (Н) рассчитывают по формуле

$$F_t = 10C_p t^x S^y v^n$$

При отрезании, прорезании и фасонном точении t — длина лезвия отрезного и фасонного резца.

Постоянная C_p и показатели степени x , y , n выбирают для конкретных условий обработки (табл. 4.26).

4.26. Значения коэффициентов и показателей степеней

| Обрабатываемый материал | C_p | x | y | n |
|-------------------------|-------|------|------|-------|
| Сталь 45 | 320 | 0,96 | 0,71 | —0,12 |
| 12X18X9T | 330 | 0,87 | 0,8 | —0,12 |
| 20X13 | 340 | 0,89 | 0,77 | —0,12 |
| ХН77ТЮР | 280 | 0,75 | 0,6 | —0,05 |
| ВТ2 | 300 | 0,89 | 0,73 | —0,17 |

Сверление, рассверливание, зенкерование, развертывание определяются следующими режимами.

При сверлении $t = 0,5D$, при рассверливании $t = 0,5(D-d)$, где D — диаметр отверстия, d — диаметр заготовки.

При сверлении отверстий S (мм/об) равна перемещению инструмента или заготовки в направлении оси вращения за один оборот. При рассверливании отверстий подача, рекомендуемая для сверления, может быть увеличена до 2 раз.

Типовые режимы обработки даны в табл. 4.27 и 4.30.

Ниже приведены значения коэффициента k_{mv} в зависимости от механических характеристик обрабатываемой стали σ_b для резцов с пластинами твердого сплава:

| | | | |
|------------------|---------|---------|----------|
| σ_b , МПа | 400—490 | 500—590 | 600—690 |
| k_{mv} | 1,44 | 1,12 | 1,0 |
| σ_b , МПа | 700—790 | 800—890 | 900—1000 |
| k_{mv} | 0,87 | 0,76 | 0,65 |

Значение k_{zv} при обработке горячекатаного проката резцами с твердосплавными пластинами принято за единицу; при обработке холоднотянутого проката $k_{zv} = 1,1$, поковок с окалиной и наклепом $k_{zv} = 0,95$, без них — 0,95. При обработке отливок без корки $k_{zv} = 0,97$, с коркой $k_{zv} = 0,7$.

Поправочный коэффициент $k_{\varphi v}$ на угол в плане инструмента при точении твердосплавными резцами при обработке сталей при $\varphi = 45^\circ k_{\varphi v} = 1,0$. При меньших углах ($\varphi = 30^\circ$) $k_{\varphi v} = 1,13$, при больших ($\varphi = 60^\circ$) $k_{\varphi v} = 0,9$, при $\varphi = 75^\circ$ $k_{\varphi v} = 0,26$, при $\varphi = 90^\circ$ $k_{\varphi v} = 0,81$.

4.27. Значения подачи, мм/об, при сверлении стали, чугуна, медных и алюминиевых сплавов сверлами из быстрорежущей стали

| Диаметр сверла <i>D</i> , мм | Сталь с НВ | | | | Чугун, медные и алюминиевые сплавы с НВ | |
|---------------------------------|------------|----------------|----------------|-----------|---|-----------|
| | До 160 | Св. 160 до 240 | Св. 240 до 300 | Св. 300 | < 170 | > 170 |
| 2—4 | 0,09—0,13 | 0,08—0,10 | 0,06—0,07 | 0,04—0,06 | 0,12—0,18 | 0,09—0,12 |
| 4—6 | 0,13—0,19 | 0,10—0,15 | 0,07—0,11 | 0,06—0,09 | 0,18—0,27 | 0,12—0,18 |
| 6—8 | 0,19—0,26 | 0,15—0,20 | 0,11—0,14 | 0,09—0,12 | 0,27—0,36 | 0,18—0,24 |
| 8—10 | 0,26—0,32 | 0,20—0,25 | 0,14—0,17 | 0,12—0,15 | 0,36—0,45 | 0,24—0,31 |
| 10—12 | 0,32—0,36 | 0,25—0,28 | 0,17—0,20 | 0,15—0,17 | 0,45—0,55 | 0,31—0,35 |
| 12—16 | 0,36—0,43 | 0,28—0,33 | 0,20—0,23 | 0,17—0,20 | 0,55—0,66 | 0,35—0,41 |
| 16—20 | 0,43—0,49 | 0,33—0,38 | 0,23—0,27 | 0,20—0,23 | 0,66—0,76 | 0,41—0,47 |
| 20—25 | 0,49—0,58 | 0,38—0,43 | 0,27—0,32 | 0,23—0,26 | 0,76—0,89 | 0,47—0,54 |

Примечание. Приведенные значения подачи применяют при сверлении отверстий глубиной $l \leq 3D$ с точностью не выше 12-го качества при жесткой технологической системе. В противном случае вводят поправочные коэффициенты: на глубину отверстия — $k_{IS} = 0,9$ при $l \leq 5D$; $k_{IS} = 0,8$ при $l \leq 7D$; на инструментальный материал — $k_{IS} = 0,6$ для сверла с режущей частью из твердого сплава.

4.28. Значения коэффициентов C_v , q , y , t

| Обрабатываемый материал | Материал режущей части инструмента | Подача S , мм/об | C_v | q | y | t | Охлаждение |
|--|------------------------------------|-------------------------|--------------|---------------------|--------------|----------------------|------------|
| Сталь конструкционная, $\sigma_s = 750$ МПа | P6M5 | Не более 0,2 Св. 0,2 | 7,0 9,8 | 0,40 | 0,70 0,50 | 0,20 | Есть |
| Сталь жаропрочная 12X18H9T, НВ141 | | — | 3,5 17,1 | $\frac{0,50}{0,25}$ | 0,45 0,40 | $\frac{0,12}{0,125}$ | Нет |
| Чугун черный, 190 НВ | BK8 | — | 34,2 | 0,45 | 0,30 | 0,20 | — |
| Медные гетерогенные сплавы средней твердости (100—140 НВ) | | Не более 0,3 Св. 0,3 | 28,1 32,6 | 0,25 | 0,55 0,40 | 0,125 | Есть |
| Силумин и литейные алюминиевые сплавы, $\sigma_s = 100 \dots 200$ МПа, НВ ≤ 65 ; дуралюминий, НВ ≤ 100 | P6M5 | Не более 0,3 Св. 0,3 | 28,1 40,7 | 0,25 | 0,55 0,40 | 0,125 | |

4.29. Значения коэффициента C_v и показателей степени при рассверливании, зенкерование и развертывании конструкционной углеродистой стали с $\sigma_s = 750$ МПа

| Обработка | Материал режущей части инструмента | C_v | q | x | y | t |
|----------------|------------------------------------|-------|-----|------|------|------|
| Рассверливание | P6M5 | 16,2 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,2 |
| | BK8 | 10,8 | 0,6 | 0,2 | 0,3 | 0,25 |
| Зенкерование | P6M5 | 16,3 | 0,3 | 0,2 | 0,5 | 0,3 |
| | T15K6 | 18,0 | 0,6 | 0,15 | 0,3 | 0,25 |
| Развертывание | P6M5 | 10,5 | 0,3 | 0,2 | 0,65 | 0,4 |
| | T15K6 | 100,6 | 0,3 | 0,1 | 0,65 | |

4.30. Значения подачи, мм/об, при обработке отверстий зенкерами из быстрорежущей стали и твердого сплава

| Обрабатываемый материал | Диаметр зенкера D , мм | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | До 15 | Св. 15 до 20 | Св. 20 до 25 | Св. 25 до 30 | Св. 30 до 35 | Св. 35 до 40 | Св. 40 до 50 | Св. 50 до 60 |
| Сталь | 0,5—0,6 | 0,6—0,7 | 0,7—0,9 | 0,8—1,0 | 0,9—1,2 | 0,9—1,2 | 1,6—1,3 | 1,1—1,3 |
| Чугун с $HB \leq 200$ | 0,7—0,9 | 0,9—1,1 | 1,0—1,2 | 1,1—1,3 | 1,2—1,5 | 1,4—1,7 | 1,6—2,0 | 1,8—2,2 |
| и медные сплавы | | | | | | | | |
| Чугун с $HB > 200$ | 0,5—0,6 | 0,6—0,7 | 0,7—0,8 | 0,8—0,9 | 0,9—1,1 | 1,0—1,2 | 1,2—1,4 | 1,3—1,5 |

Примечание. Приведенные значения подачи применять для обработки отверстий с допуском не выше 12-го качества. Для достижения более высокой точности (9—11-й качества), а также при подготовке отверстий под последующую обработку разверткой или под нарезание резьбы метчиком вводить поправочный коэффициент на значения подачи $k_{os} = 0,7$.

Скорость резания, м/мин, при сверлении

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m S_y} k_v, \text{ при рассверливании}$$

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m l^x S_y} k_v$$

Значения коэффициентов C_s и показателей степени приведены в табл. 4.28—4.30, коэффициентов $k_v, k_{vT}, k_{ls}, k_{lv}$ в табл. 4.31—4.33. Режимы резания при сверлении приведены в табл. 4.34.

Мощность резания, кВт, определяют по фор-

муле $N = M_{кр} n / 9750$, где частота вращения инструмента или заготовки, мин^{-1} , $n = 1000 / (\pi D)$.

Фрезерование осуществляют лезвийным инструментом на следующих режимах.

Глубина резания t при цилиндрическом фрезеровании зависит от припуска, а также от жесткости и мощности станка.

Движение подачи определяется параметрами: S_z — подача на зуб фрезы, мм/зуб, характеризует величину нагрузки на каждый зуб фрезы в процессе резания; S_o, S_z, z — подача на оборот фрезы, мм/об, и $v_s = S_o n = S_z z$ — ско-

4.31. Значения периода стойкости T , мин, принятые при расчете режимов резания спиральными сверлами из быстрорежущей стали P18

| Обрабатываемый материал | Диаметр сверла D , мм, не более | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 70 |
| Сталь | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| Чугун | 15 | 20 | 40 | 60 | 70 | 80 | 100 | 110 | 120 | 140 | 150 | 170 |

4.32. Значения поправочного коэффициента скорости резания k_{T_v} в зависимости от принятых периодов стойкости при сверлении спиральными сверлами из быстрорежущей стали P18

| Обрабатываемый материал | Отношение принятого периода стойкости к нормативному | | | | | |
|-------------------------|--|------|-----|------|------|------|
| | 0,25 | 0,50 | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 6,0 |
| Сталь | 1,32 | 1,15 | 1,0 | 0,87 | 0,76 | 0,70 |
| Чугун | 1,20 | 1,09 | 1,0 | 0,91 | 0,84 | 0,79 |

4.33. Значения поправочных коэффициентов k_{l_s} и k_{l_v} в зависимости от глубины отверстия стали и чугуна спиральными сверлами из быстрорежущей стали P18

| Коэффициент | Отношение длины отверстия к его диаметру | | | | | |
|-------------|--|------|------|------|------|------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
| k_{l_v} | 1,0 | 0,85 | 0,80 | 0,70 | 0,60 | 0,5 |
| k_{l_s} | 1,0 | 0,95 | 0,9 | 0,85 | 0,80 | 0,70 |

4.34. Режимы резания при сверлении конструкционных углеродистых и легированных сталей сверлами, оснащенными твердым сплавом ВК8

| Диаметр отверстия, мм | S, мм/об | v, м/мин, при σ_s , МПа | | | |
|-----------------------|-----------|--------------------------------|-------|-------|-------|
| | | 550 | 650 | 750 | 850 |
| 10—16 | 0,12—0,22 | 61—81 | 56—69 | 49—61 | 44—54 |
| 16—23 | 0,16—0,28 | 67—79 | 58—68 | 51—60 | 46—54 |
| 23—30 | 0,22—0,35 | 65—77 | 56—66 | 49—68 | 44—52 |

рость движения подачи, мм/мин; от нее зависят основное технологическое время и производительность обработки.

Решающим фактором при выборе подачи является прочность режущей кромки; она характеризуется наибольшей подачей на зуб $S_{z\max}$. Значение подачи при обработке обычных конструкционных сталей находят исходя из максимальных толщин срезаемого слоя a : $a_{\max} \approx 0,30 \dots 0,35$ мм для фрез из быстрорежущей стали и $a_{\max} = 0,25$ мм для фрез, оснащенных твердым сплавом.

Значение $S_{z\max}$ зависит от допустимого износа по задней поверхности h_3 , а также от скорости резания v : чем меньше h_3 и v , тем больше наибольшая допустимая подача режущей кромки. $S_{z\max}$ также зависит от схемы расположения

заготовки относительно фрезы: при расположении заготовок, которому соответствует начало врезания зуба с наименьшей толщины срезаемого слоя, $S_{z\max}$ вдвое больше, чем при симметричном фрезеровании.

Скорость резания при фрезеровании выбирают исходя из допустимого износа фрез при принятой экономически целесообразной стойкости по формуле

$$v = \frac{C_v D^{2v}}{T^m t^{xv} S_y^{y_v} B^{z_v} z^{q_v}}$$

Значения коэффициента C_v и показателей степеней для торцового фрезерования коррозионно-стойкой стали Х18Н9Т ($\sigma_s = 141$ МПа) фрезами, оснащенными твердым сплавом ВК8, приведены в табл. 4.35, значения скорости резания — в табл. 4.36.

4.35. Значения коэффициентов $C_v, x_v, y_v, z_v, r_v, q_v$

| Фреза | C_v | m | x_v | y_v | z_v | r_v | q_v |
|------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Торцовая | 2940 | 0,8 | 0,31 | 0,32 | 0,2 | 0,26 | 0,1 |
| Концевая | 88 | 0,4 | 0,23 | 0,5 | 0,3 | 0,24 | 0,14 |
| Дисковая трехсторонняя | 103 | 0,31 | 0,43 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 |

4.36. Значения скорости резания v , м/мин, при фрезеровании конструкционных углеродистых, хромистых и хромоникелевых сталей торцовыми фрезами с пластинами из твердого сплава Т15К6

| Диаметр фрезы D , мм | Число зубьев z | Припуск t , мм, не более | S_z , мм/зуб, не более | | | | | |
|------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | 0,07 | 0,10 | 0,13 | 0,18 | 0,24 | 0,33 |
| 80 | 5 | 1,5 | 442 | 390 | 350 | 314 | 276 | 244 |
| | | 5,0 | 390 | 350 | 314 | 276 | 244 | 217 |
| 110 | 4 | 1,5 | 442 | 390 | 350 | 314 | 276 | 244 |
| | | 5,0 | 390 | 350 | 314 | 276 | 244 | 217 |
| 150 | 6 | 5 | 390 | 350 | 314 | 276 | 244 | 217 |
| | | 16 | 350 | 312 | 276 | 244 | 217 | 196 |
| 200 | 8 | 5 | 372 | 330 | 306 | 262 | 232 | 206 |
| | | 16 | 330 | 296 | 262 | 232 | 206 | 186 |
| 250 | 8 | 5 | 372 | 330 | 306 | 262 | 232 | 206 |
| | | 16 | 330 | 296 | 262 | 232 | 206 | 186 |
| 320 | 10 | 5 | 368 | 318 | 280 | 250 | 221 | 197 |
| | | 16 | 318 | 280 | 250 | 221 | 197 | 175 |
| 400 | 12 | 5 | 330 | 296 | 262 | 232 | 206 | 186 |
| | | 16 | 296 | 262 | 232 | 206 | 186 | 129 |

Значения периодов стойкости T (мин) торцовых фрез с пластинами из твердого сплава Т15К6 при фрезеровании стали, принятые при расчете режимов резания, в зависимости от диаметра обработки D следующие:

| | | | | |
|-----------|--------|---------|-----|-----|
| D , мм | 80—150 | 200—250 | 320 | 400 |
| T , мин | 180 | 240 | 300 | 420 |

Скорость резания зависит также от вида заготовки: если при обработке проката принять ее равной 1,0, то при обработке поковок она равна 0,9, при обработке отливок — 0,8.

Главная составляющая силы резания при фрезеровании — окружная сила (H)

$$F_t = \frac{10 C_p i^x S_z^y B^u z}{D^q n^w},$$

где z — число зубьев фрезы; n — частота вращения фрезы, мин^{-1} .

Значения C_p, x, y, u, q приведены в табл. 4.37.

Крутящий момент, Н·м, на шпинделе $M_{кр} = F_t D / (2 \cdot 100)$, где D — диаметр фрезы, мм.

Мощность резания, кВт, $N_e = F_t v / (1020 \cdot 60)$.

Резьбонарезание осуществляется по сложным кинетическим схемам [4]. При нарезании резьбы резцами различают продольное $D_{спр}$ и поперечное $D_{споп}$ движения подачи. Последнее определяет глубину резания t , равную высоте резьбового профиля, при нарезании резьбы за один рабочий ход или части высоты профиля, соответствующей числу рабочих ходов, необходимых для образования резьбы. Если шаг резьбы $P \leq 2,5$ мм, движение подачи $D_{сп}$ имеет ра-

диальное направление S_p , и образование резьбы происходит по профильной схеме (рис. 4.25, а). Если шаг резьбы $P > 2,5$ мм, черновые ходы выполняют по генераторной схеме с поперечным движением подачи, параллельной боковой стороне резьбового профиля, оставляя припуск l на чистовые рабочие ходы инструмента, выполняемые по профильной схеме резания (табл. 4.38).

Скорость резания, м/мин, при нарезании крепящей резьбы резцами с пластинами из твердого сплава $v = \frac{C_v i_x}{T^m S_y^y}$, при нарезании крепящей и трапецидальной резьбы резцами из

быстрорежущей стали $v = \frac{C_v}{T^m i^x S_y^y}$, где i_x — число рабочих ходов.

Скорость резания, м/мин, при нарезании метрической резьбы метчиками, круглыми плашками и резьбовыми головками $v = \frac{C_v}{T^m S_z^z S_y^y} k_v$.

Значения C_v, x, y, m даны в табл. 4.39.

Тангенциальная составляющая (H) силы резания при нарезании резьбы резцами

$$F_t = \frac{10 C_p F'}{i^n}$$

Крутящий момент (Н·м) при нарезании резьбы метчиками, резьбовыми головками

4.37. Значения коэффициента C_p и показателей степени при обработке конструкционной углеродистой стали с $\sigma_b = 750$ МПа

| Фрезы | Материал режущей части инструмента | C_p | x | y | u | q | w |
|-------------------------------|------------------------------------|-------|------|------|-----|------|------|
| Торцовые | Твердый сплав | 825 | 1,0 | 0,75 | 1,1 | 1,3 | 0,2 |
| | Быстрорежущая сталь | 825 | 0,95 | 0,8 | 1,1 | 1,1 | 0 |
| Цилиндрические | Твердый сплав | 101 | 0,88 | 0,75 | 1,0 | 0,87 | 0 |
| | Быстрорежущая сталь | 68,2 | 0,86 | 0,72 | 1,0 | 0,86 | 0 |
| Дисковые прорезные и отрезные | Твердый сплав | 12,5 | 0,85 | 0,75 | 1,0 | 0,73 | 0,13 |
| | Быстрорежущая сталь | 68,2 | 0,86 | 0,72 | 1,0 | 0,86 | 0 |

4.38. Значения подачи S_z на один зуб гребенчатой фрезы

| Обрабатываемый материал | Диаметр нарезаемой резьбы, мм | | | | | |
|---|-------------------------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|
| | До 30 | | | Св. 30 до 50 | | |
| | P , мм | | | | | |
| | До 1 | Св. 1 до 2 | Св. 2 до 3,5 | До 1 | Св. 1 до 2 | Св. 2 до 4 |
| Сталь с σ_b , МПа: менее 800 более 800 | 0,03—0,04 | 0,04—0,05 | 0,05—0,06 | 0,04—0,05 | 0,05—0,06 | 0,06—0,07 |
| | 0,02—0,03 | 0,02—0,03 | 0,03—0,04 | 0,03—0,04 | 0,03—0,04 | 0,04—0,05 |

4.39. Значения коэффициентов и показателей степени в формулах для определения скорости резания для резбовых инструментов при обработке конструкционной углеродистой стали с $\sigma_b = 750$ МПа

| Инструмент | Материал режущей части | Условия обработки | C_p | x | y | t | Среднее значение периода стойкости T , мин |
|---------------------------|------------------------|---------------------------------|-------|------|------|------|--|
| Крепежные резцы | T15K6 | — | 244,0 | 0,23 | 0,30 | 0,20 | 70 |
| | P6M5 | Черновые ходы: $P \leq 2$ мм | 14,8 | 0,70 | 0,30 | 0,11 | — |
| | | $P > 2$ мм | 30,0 | 0,60 | 0,25 | 0,08 | |
| | Чистовые ходы | 41,8 | 0,45 | 0,30 | 0,13 | — | |
| Трапецеидальный резец | P6M5 | Черновые ходы | 32,6 | 0,60 | 0,20 | 0,14 | 70 |
| | | Чистовые ходы | 47,8 | 0,50 | 0 | 0,18 | — |
| Метчики: машинные гаечные | P6M5 | — | 64,8 | — | 0,5 | 0,90 | 90 |
| | | — | 53,0 | | 0,5 | 0,90 | |
| Круглые плашки | 9XC У12А | — — | 2,7 | — | 1,2 | 0,50 | 90 |
| Резьбонарезные головки | P6M | — | 7,4 | — | 1,2 | 0,50 | 120 |
| Гребенчатые фрезы | P6M5 | — | 198 | — | 0,3 | 0,4 | 100 |

Примечание. Нарезание резьбы производится с применением СОЖ, рекомендованных для данного вида обработки.

4.40. Значения коэффициентов и показателей степени при нарезании резьбы в стали конструкционной углеродистой ($\sigma_b = 750$ МПа)

| Тип инструмента | C_p | C_m | y | q |
|-------------------------------------|-------|--------|-----|------------|
| Резцы | 148 | 1,0 | 1,7 | — |
| Метчики машинные гаечные | 1,0 | 0,0270 | 1,5 | 1,4 |
| | | 0,0041 | | 1,7 2,0 |
| Плашки круглые Резьбовые головки | 1,0 | 0,0450 | 1,5 | 1,1 |
| | | 0,0460 | | 1,1 |

$M_{кр} = 10C_m D^q F$, где P — шаг резьбы, мм; i — число рабочих ходов; D — номинальный диаметр резьбы, мм.

Коэффициент k_p учитывает качество обрабатываемого материала.

Значения C_p , C , y и q приведены в табл. 4.40.

Мощность, кВт, при нарезании резьбы: резцами $P = Fv/(1020 \cdot 60)$, при нарезании метчиками, плашками и резьбовыми головками $P = Mn/975$, где $n = 1000v/(\pi D)$.

Протягивание осуществляется при продольном движении многозубого инструмента. Элементами резания при протягивании являются

периметр обрабатываемой поверхности — наибольшая суммарная длина лезвий всех одновременно режущих зубьев (мм), подача на один зуб S_z (мм/зуб) и скорость резания v .

Периметр обрабатываемой поверхности составляет Bz_1/z_c . Здесь B — длина обрабатываемого контура заготовки; $z_1 = l/t$ — наибольшее число одновременно режущих зубьев, где l — длина обрабатываемой поверхности, мм; t — шаг режущих зубьев; z_c — число зубьев в секции протяжки при прогрессивной схеме резания. Вычисленное значение z_1 округляют до ближайшего целого числа.

4.41. Параметры режима резания при шлифовании

| Шлифование | Скорость круга v_k , м/с | Скорость заготовки v_3 , мм/мин | Толщина снимаемого слоя t , мм | $v_{спр}$ |
|--|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Круглое наружное шлифование | | | | |
| С продольным движением подачи на каждый ход: предварительное окончательное | 30—35 | 12—25 | 0,1—0,0025 | (0,3—0,7) В* |
| | 20—30 | 15—55 | 0,005—0,015 | (0,2—0,4) В |
| Круглое внутреннее шлифование | | | | |
| На станках общего назначения: предварительное окончательное | 30—35 | 20—40 | 0,005—0,02 0,0025—0,01 | (0,4—0,7) В (0,25—0,4) В |
| | | | | |
| Круглое бесцентровое шлифование | | | | |
| Предварительное при d , мм: не более 20 мм св. 20 мм | 30—35 | 20—120 | 0,02—0,5 0,05—0,2 | 0,5—3,8 м/мин |
| | | 40—120 | 0,0025—0,01 | |
| Окончательное | | | | 1,2—2,0 м/мин |
| Плоское шлифование периферией круга | | | | |
| На станках с круглым столом: предварительное окончательное | 30—35 | 20—60 | 0,005—0,015 | (0,3—0,6) В (0,2—0,25) В |
| | | 40—60 | 0,005—0,01 | |
| Плоское шлифование торцом круга | | | | |
| На станках с прямоугольным столом: предварительное окончательное | 25—30 | 4—12 | 0,015—0,04 | — — |
| | | 2—3 | 0,005—0,01 | |

*В — ширина круга, мм.

4.42. Значения коэффициента C_n и показателей степени r, x, y, q

| Шлифование | Обрабатываемый материал | Шлифовальный круг | | C_n | r | x | y | q |
|--|-------------------------|-------------------|----------------------|--------------|-------------|------------|------------|------------|
| | | Зернистость | Твердость | | | | | |
| Круглое наружное: с поперечным движением на двойной ход | СЗН | 50 — 40 | СМ1 — СМ2 | 1,3 | 0,75 | 0,85 | 0,7 | — |
| | | 50 — 40 | СМ2 СМ1 — С1 | 2,2 | 0,5 | 0,5 | 0,55 | — |
| Круглое внутреннее | СН СЗ | НО 50 — 40 | С1 СМ1 — С1 | 0,27 0,36 | 0,5 0,35 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| Круглое бесцентровое напроход | СН СЗ | 40 — 25 40 | С1 — СТ1 СМ1 — С1 | 0,1 0,28 | 0,85 0,6 | 0,6 0,6 | 0,7 0,5 | 0,5 0,5 |
| Плоское периферией круга на станках с круглым столом | СЗ | 50 — 40 | М3 — СМ1 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | — |

| Шлифование | Обрабатываемый материал | Шлифовальный круг | | C_n | r | x | y | q |
|--|-------------------------|-------------------|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|
| | | Зернистость | Твердость | | | | | |
| Плоское торцом круга на станках с прямоугольным столом | СН | 125 | М2 | 0,17 | 0,7 | 0,5 | — | — |
| | | 125 | С1 | 0,39 | | | | |
| | | 125 | СТ1 | 0,59 | | | | |
| | | 80 — 50 | М1 — СМ2 | 19 | 0,5 | — | — | |
| 50 | М3 | 1,31 | | | | | | |

Обозначения: СЗН — сталь закаленная и незакаленная; СЗ — сталь закаленная; СН — сталь незакаленная.

Шлифование осуществляется абразивным инструментом. Основными элементами резания при шлифовании являются: линейная скорость или скорость поступательного движения заготовки v_s , (м/мин), толщина снимаемого слоя t (мм), продольная подача $S_{пр}$. Она измеряется в направлении его оси в мм на один оборот заготовки при круглом шлифовании или в мм на каждый ход стола при плоском шлифовании периферией круга.

Режимы резания при различных видах шлифования конструкционных и инструментальных сталей приведены в табл. 4.41.

Эффективная мощность (кВт) при шлифовании периферией круга с продольной подачей $P = C_N v_s^3 t^3 S_{пр}^3 d^q$, при шлифовании торцом круга $P = C_N v_s^3 t^3 b'$, где C_N — коэффициент, зависящий от вида шлифования и диаметра шлифуемой поверхности; d — диаметр шлифования, мм; b' — ширина шлифуемой поверхности, мм, равная длине шлифуемого участка заготовки при круглом шлифовании и поперечному размеру поверхности заготовки при шлифовании торцом круга.

Значения параметров C_N , r , x , y , q приведены в табл. 4.42.

Список литературы

1. **Бойцов В. В.** Научные основы комплексной стандартизации технологической подготовки. М.: Машиностроение, 1982. 162 с.

2. **Волощенко А. П., Бруков Е. А.** Построение структуры технологической операции как основы автоматизации процесса обработки//Научные основы автоматизации производственных процессов в машиностроении. М.: Машиностроение, 1975. С. 58—59.

3. **Емельянов В. Н., Ермашин В. В.** Обработка тонких пластин одновременно комбинированным инструментом//Станки и инструмент. 1984. № 10. С. 29.

4. **Капустин Н. М.** Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 1976. 140 с.

5. **Обработка металлов резанием: Справочник технолога/А. А. Попов, В. В. Аникин, А. Т. Бойм и др.: Под общ. ред. А. А. Попова. М.: Машиностроение, 1988. 184 с.**

6. **Подураев В. Н.** Резание труднообрабатываемых материалов: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1974. 364 с.

7. **Проников А. С.** Расчет и конструирование металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1967. 370 с.

8. **Справочник технолога-машиностроителя/В. Б. Борисов, Б. И. Борнсов, В. В. Васильев и др. Т. 1: Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. 645 с.**

9. **Справочник технолога-машиностроителя/Ю. А. Абрамов, В. И. Андреев, Б. И. Горбунов и др. Т. 2: Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. 390 с.**

Этапы проектирования станков, автоматизация проектирования

5.1. Основные этапы проектирования и освоения новых станков

Основные этапы (стадии) проектирования и освоения новых станков, как и любых других машин, регламентированы ГОСТ 2.103—67. Создание всякого нового станка или технологической системы является чрезвычайно сложным процессом и включает в себя многие мероприятия — от составления технического задания на станок до запуска его в серию (рис. 5.1) [13]. Разделение проектирования на последовательные этапы является в известной мере условным, поскольку в процессе проектирования пересматривают и уточняют ранее принятые решения.

Характерными признаками проектирования станка как сложной системы являются *неопределенность* и *многовариантность*. Однако каждый из последующих этапов проектирования последовательно уменьшает неопределенность и число вариантов проектной задачи. Основными принципами, обеспечивающими решение задачи проектирования, являются *последовательность* и *итерационность*. Последовательность заключается в строгой очередности выполнения этапов проектирования станка, а итерационность — в корректировке проектных решений, полученных на предыдущих этапах проектирования, исходя из результатов, полученных на последующих этапах.

Отличительной особенностью проектирования современных станков и технологических систем является внедрение *модульно-агрегатного принципа конструирования*. Его применение особенно выгодно при создании гамм станков, в которых модели сходны по целевому назначению и конструкциям, но отличны по габаритам, определяемым размерами обрабатываемых деталей, или при разработке на основе базовых моделей модификаций с измененными отдельными характеристиками как станка в целом, так и его отдельных узлов и систем. Модульно-агрегатный принцип применяют и при проектировании различных по целевому назначению и конструкторскому оформлению станков, которые komponуют из общего набора

узлов (модулей), что дает возможность в значительной степени формализовать и автоматизировать проектирование.

Ниже рассмотрены основные этапы проектирования и изготовления новых станков или технологических систем.

Техническое задание обосновывает те новые качества, которыми должен обладать проектируемый станок. Оно устанавливает основное назначение проектируемого станка, обосновывает целесообразность его создания и регламентирует основные технические характеристики. Исходными данными для составления технического задания являются реализуемый станком технологический процесс, номенклатура предназначенных для изготовления деталей и тип производства.

Техническое задание устанавливает основное назначение проектируемого станка исходя из данных о совокупности изготавливаемых деталей (их конфигурации, требований к точности, материалам, твердости и т. д.) и типа производства (от единичного до массового).

Техническое задание обосновывает техническую и экономическую целесообразность проектирования нового станочного оборудования. Техническая целесообразность, как правило, вызвана появлением новых технологических процессов или новых материалов, или существенным повышением точности обработки (например, вызванным появлением нанотехнологии), для реализации чего и предназначается проектируемый станок. Экономическая целесообразность обычно обоснована существенным повышением производительности либо увеличением универсальности, либо пригодностью использования проектируемого станка в составе ГПС или АЛ. Во всех случаях техническое задание должно содержать тщательное экономическое обоснование предполагаемой эффективности проектируемого оборудования. Проектируемый станок должен иметь более высокие технико-экономические показатели, чем существующие станки, для чего выполняют анализ характеристик лучших станков данного типа и патентный анализ.

Техническое задание в итоге регламентирует

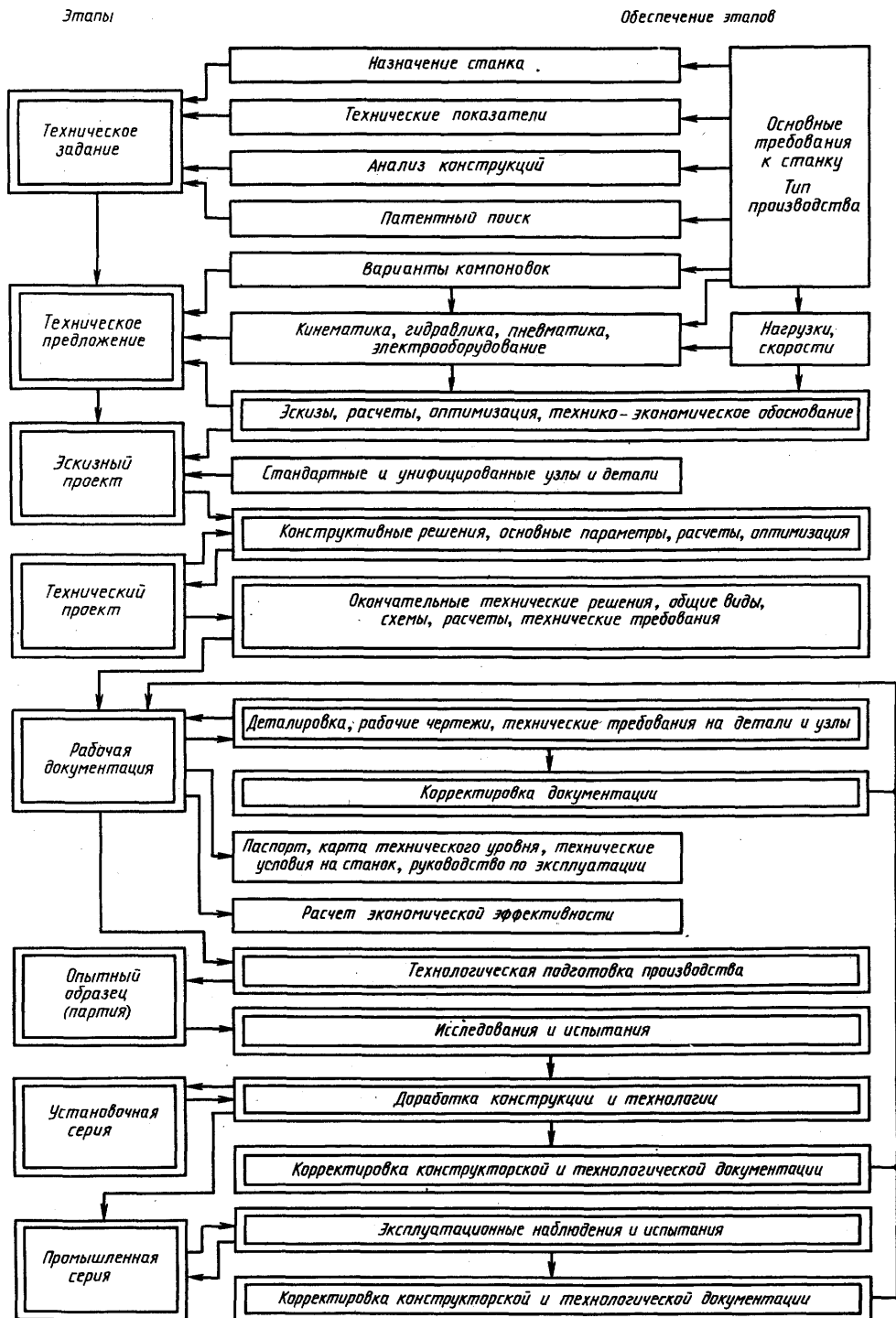


Рис. 5.1. Основные этапы проектирования и освоения новых станков

основные технические показатели станка: максимальные габаритные размеры заготовок, диапазоны нагрузок, точность обработки, производительность, универсальность, оснащение вспомогательными системами и т. п.

Техническое предложение уточняет и развивает техническое задание и состоит из совокупности конструкторских документов, необходимых для дальнейшего проектирования. Базируясь на исходных данных и предпроектной проработке технического предложения, обосновывают и уточняют технические характеристики: диапазоны нагрузок и скоростей привода главного движения, приводов подач и вспомогательных перемещений. Выбирают двигатели для всех движений и обосновывают их рациональную мощность. На этом этапе выбирают окончательный вариант компоновки как самого стана, так и всего комплекта станочного оборудования, пользуясь результатами синтеза и оптимизации вариантов компоновок. Разрабатывают принципиальные схемы станка: кинематическую, гидравлическую, пневматическую, электрическую и др. Определяют общие габаритные размеры. В итоге окончательно устанавливают технические характеристики и проводят технико-экономическое обоснование целесообразности проектирования нового станка. Техническое предложение дает полное представление о компоновке и возможностях станка.

Эскизный проект содержит предварительную конструкторскую проработку всех основных узлов и является развитием технического предложения. Он базируется на анализе различных вариантов возможных конструкторских решений, результатах расчетов, оптимизации важнейших параметров и характеристик станка.

Исходными данными для проектирования являются параметры режимов обработки (значения скоростей, припусков, подач), массы обрабатываемых деталей и требования к точности их изготовления при осуществлении заданных технологических процессов. Конструкцию и размеры перемещаемых узлов станка определяют также силы инерции (возникающие на ускоренных ходах) и силы трения (возникающие в направляющих и кинематических парах).

При конструировании станка, его узлов и систем следует максимально использовать стандартные и унифицированные детали, механизмы и элементы, что удешевляет проектируемый станок.

Каждое конструкторское решение должно быть обосновано результатами расчетов, рассмотрено с точки зрения технологичности изготовления и сборки, надежности, удобства эксплуатации, ремонтпригодности и т. д.

Технический проект включает окончательную конструкторскую проработку всех узловых чертежей, схем станка и его общих видов. На

этом этапе проводят все виды уточненных и поверочных расчетов, оптимизируют все необходимые параметры узлов и систем станка, окончательно определяют эффективность станка или станочной системы. Технический проект должен содержать все исходные данные, необходимые для разработки комплекта технической документации на проектируемый станок. Технический проект согласовывают и утверждают в установленном порядке.

Разработка рабочей документации — завершающий этап проектирования. Он включает разработку рабочих чертежей всех оригинальных деталей и формирование технических требований на их изготовление, составление технологической документации, корректировку (в случае необходимости) технического проекта, составление спецификаций оригинальных и покупных (комплектующих) деталей, составление паспорта станка, карты технического уровня, инструкции по эксплуатации и ряда других документов. Рабочая документация должна содержать все данные, необходимые для изготовления станка или станочной системы.

После завершения разработки комплекта рабочей документации осуществляются **технологическая подготовка производства** (см. рис. 5.1), а также последующие этапы изготовления и отладки спроектированного станка. В ряде случаев для сокращения сроков внедрения образцов новой техники технологическую подготовку производства начинают заранее — до завершения выпуска комплекта рабочей документации.

Опытный образец (или партию) изготавливают с целью проверки и испытания нового станка и внесения необходимых изменений в конструкторскую и технологическую документацию. На этом же этапе проводят окончательные расчеты экономической эффективности в результате применения нового станка.

Установочная серия в ряде случаев выпускается перед серийным производством станка для проверки работоспособности станка в производственных условиях и выявления слабых сторон конструкции в реальных условиях эксплуатации. По результатам оценки работы станков установочной серии вносят соответствующие корректировки в конструкторскую и технологическую документацию.

Серийное производство станков требует дополнительной коррекции конструкции, технологии его изготовления и сборки. Только в условиях длительной эксплуатации станок подвергается самым разнообразным режимам нагружения. От того, как налажена система сбора информации о качестве и надежности станков, эксплуатируемых в различных отраслях машиностроения, зависит правильность принятия решений при дальнейшем совершенствовании

конструкции выпускаемой модели, отвечающей требованиям современного производства и удовлетворяющей разнообразным запросам различных отраслей промышленности.

5.2. Автоматизированное проектирование станков

Повышение качества и производительности труда при проектировании станков и станочных систем связано с разработкой и внедрением систем автоматизированного проектирования, что позволяет с минимальными затратами машинного времени и людских ресурсов проектировать станки с требуемыми характеристиками работоспособности. Для автоматизации отдельных этапов процесса проектирования станка применяют базирующиеся на использовании вычислительной техники автоматизированные системы научных исследований (АСНИ), системы автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированные системы технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП).

АСНИ включают системы обеспечения поисковых работ, например в виде банков данных, и системы обеспечения научного эксперимента — автоматизированные испытательные установки. С помощью этих систем осуществляется этап формирования технического задания.

Этапы технического предложения, эскизного, технического и рабочего проектирования являются объектами САПР.

Далее используют АСТПП и АСУТП.

Интегрированные САПР (системы САД/САМ [29]) предназначены для автоматизации проектирования станка или его отдельных узлов, т. е. объединяют в качестве подсистем САПР, АСТПП и АСУТП. В первую очередь целесообразно автоматизировать проектирование узлов станков, разработка которых требует трудоемких математических расчетов и обязательной оптимизации основных параметров и характеристик конструкции, что и определяет в итоге основные характеристики их работоспособности: точность, надежность и производительность.

Автоматизированное проектирование должно быть непрерывным от начала разработки концепции до окончания детализации и оформления конструкторской документации, от первой проведенной линии до последней. Только тогда автоматизация конструкторских работ по настоящему эффективна.

Принципы и особенности автоматизированного проектирования станков, их систем и узлов основаны на применении принципов и методов проектирования сложных систем. Сложную систему определяют совокупности элементов

системы и связей между элементами, реализующих цель функционирования. Станок, как всякая сложная система, характеризуется большим числом элементов и связей. Основные принципы проектирования станков: иерархичность и декомпозиция при описании объекта проектирования; итерационность по этапам, уровням проектирования и уровням иерархии объекта проектирования; типизация и унификация проектных решений и средств проектирования.

Принцип иерархичности определяет представление объекта проектирования в виде совокупности иерархических уровней. Станочные системы и узлы целесообразно представлять в виде четырехуровневых иерархических систем. Для станочных систем это станочная система — агрегат — узел — деталь. Станочная система является элементом старшего уровня, детали станка — элементом младшего уровня. Для узлов это узел — подузел (составные части системы) — деталь — элементы детали.

Деление станочной системы на четыре уровня является приближенным, и могут быть предусмотрены дополнительные подуровни. Так, например, подуровнем станочной системы является уровень станочного модуля. Затем узлы станка могут быть разбиты на подузлы (механизмы), которые, в свою очередь, включают функционально обособленные устройства следующего подуровня.

Принцип декомпозиции (блочности) означает разбиение каждого уровня на ряд составных частей (блоков) с реализацией их раздельного (блочного) проектирования.

В качестве примера реализации иерархической системы можно привести станочный модуль — роботизированный технологический комплекс (РТК), состоящий из двух токарных станков 1 с ЧПУ, промышленного робота 2 и тактового стола 3 (рис. 5.2, а). Иерархическая структура РТК представлена на рис. 5.2, б в виде дерева системы. РТК является старшей системой (первый уровень) по отношению к элементам второго уровня (станки, промышленный робот, тактовый стол и вспомогательные устройства), с другой стороны, элементы второго уровня являются старшими системами для элементов третьего уровня (узлы) и т. д.

Нисходящее проектирование предполагает сначала решение задач высших иерархических уровней. *Восходящее проектирование*, наоборот, реализует процедуру перехода от низших к высшим иерархическим уровням. При компоновке, например, агрегатных станков из унифицированных узлов используют восходящее проектирование. В других случаях для получения проектных решений приходится повторять оба способа проектирования несколько раз (проводить несколько итераций).

Внутреннее проектирование решает зада

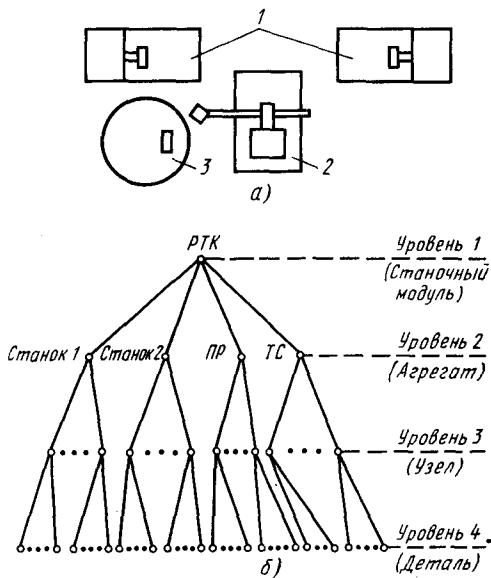


Рис. 5.2. Роботизированный технологический комплекс (а) и его иерархическая система (б)

проектирования элементов данного иерархического уровня. Задачи высших иерархических уровней, а также уровней проектирования относятся к внешнему проектированию. Так, разработка технического задания на элементы данного иерархического уровня относится к внутреннему проектированию, а разработка технического задания на систему высшего иерархического уровня — к задачам внешнего проектирования.

Типизация и унификация проектных решений и процедур приводят к упрощению и ускорению проектирования путем их многократного использования в различных проектах.

Основные особенности прикладных САПР станков, их систем и узлов состоят в следующем:

наличии достоверных математических моделей и машинных методов расчета узлов и элементов станков, основанных на оптимизации основных эксплуатационных характеристик и параметров конструкции;

наличии полной информации о возможных вариантах компоновки узлов и систем станков для обеспечения заданных технологических процессов, а также возможности корректировки и доработки конструкции с учетом специфичности требований, предъявляемых к технологическому процессу и соответственно к конструкции;

возможности прогнозирования на этапах проектирования выходных характеристик узлов и получения их оптимальных значений;

возможности выпуска полного комплекта

конструкторской документации автоматизированным способом.

Принципы построения САПР станков. САПР представляет собой организационно-техническую систему, включающую в себя комплекс средств автоматизированного проектирования, взаимосвязанный с подразделениями проектной организации и выполняющий автоматизированное проектирование. Основные принципы построения САПР и ее подсистем: системное единство, развитие, совместимость, стандартизация.

Принцип системного единства заключается в том, что при разработке и функционировании САПР связи между ее составляющими должны обеспечивать целостность системы.

Принцип развития состоит в том, что САПР должна быть развивающейся системой, т. е. она должна функционировать с учетом пополнения, совершенствования и обновления подсистем и составляющих. С этой целью программы автоматизированного проектирования строят по модульному принципу.

Принцип совместимости означает, что коды, языки, программы, информационные и технические характеристики связей между составными частями САПР должны обеспечивать совместное функционирование подсистем.

Принцип стандартизации предполагает проведение мероприятий по типизации и унификации подсистем и составляющих САПР, универсальных по отношению к проектируемым объектам.

Последовательность принятия и реализации решений при применении прикладных САПР станков и их узлов соответствует основным этапам проектирования и освоения новых станков (см. рис. 5.1). Однако она требует, во-первых, существенно более строгой формализации, чем при применении традиционных методов проектирования, во-вторых, наличия развитого методического, математического, программного, технического, информационного, лингвистического и организационного обеспечения. Помимо технических работ, направленных на формирование САПР, на каждом этапе необходимо проведение множества организационных работ, связанных с выполнением проектирования и документированием результатов технических работ [10].

При создании прикладных САПР станков и их узлов необходимо выполнить следующую типовую последовательность этапов принятия и реализации решений:

сформулировать целевое назначение проектируемого объекта (станка или его узла), определить его функции, укрупненный состав структурных элементов, основные характеристики работоспособности; разработать концепцию создания объекта;

собрать и проанализировать исходные данные

о проектируемом объекте и среде его существования, об объектах-аналогах;

исследовать и сформировать множество возможных путей решения;

сформировать исходные данные, требования и ограничения по созданию объекта (ограничение множества возможных объектов);

сформировать множество допустимых объектов и критерии их оценки;

оценить допустимые и выбрать рациональные объекты;

принять предварительные решения по реализации выбранного объекта;

принять окончательное решение по реализации объекта;

выполнить проект и рабочую документацию; скорректировать проект и рабочую документацию после изготовления опытного образца станка или узла;

оценить качество прикладной САПР после ввода системы в действие.

Создание прикладных САПР представляет собой упорядоченное во времени множество организационных и технических работ. Ниже перечислено содержание каждого этапа работ, которые необходимо выполнить для успешного функционирования САПР. Перечень работ сгруппирован по этапам проектирования и освоения систем.

1. *Предпроектные исследования* включают: оценку соответствия показателей деятельности проектной организации предъявляемым к ней требованиям; выявление необходимости совершенствования проектирования; формирование концепции САПР, видов обеспечения и общесистемных принципов создания САПР; сбор данных, выявление и описание существующей системы проектирования, ее диагностический анализ; оценку возможности создания САПР; формирование исходных данных, предложений, рекомендаций (путей решения) по созданию САПР, состава подсистем и обеспечений на уровне системы в целом; сбор и анализ данных об обеспечениях проектирования, о составе, квалификации и функциях специалистов по подсистемам; сбор и анализ данных о методах, модулях, алгоритмах, используемой информации и программах проектирования; формирование исходных данных, предложений, рекомендаций по разработке компонентов САПР; организацию работ на стадии предпроектных исследований, включая организацию службы САПР; изложение, оформление и утверждение научно-технического отчета.

2. *Разработка технического задания* состоит из следующих этапов: формирования исходных данных, требований и ограничений к объекту и процессу проектирования, к САПР в целом и видам обеспечения; формирования структуры процесса создания САПР на уровне стадий и

работ; выявления состава документации, разрабатываемой на стадиях; технико-экономического обоснования создания САПР; разработки требований к порядку испытаний и вводу в действие САПР и ее подсистем; организации работ на стадии технического задания; изложения, оформления и утверждения технического задания.

3. *Техническое предложение* включает: анализ и разработку структуры объекта и процесса автоматизированного проектирования на уровне проектных процедур; выявление допустимых вариантов структуры САПР на уровне подсистем, выбор рационального варианта, его технико-экономическое обоснование; выбор и обоснование рациональных вариантов структуры обеспечений САПР в целом; разработку, оформление и утверждение технических заданий на создание подсистем САПР; организацию работ на стадии технического предложения; изложение, оформление и утверждение технического предложения.

4. *Эскизный проект* выполняется в следующей последовательности: принятие основных решений по взаимодействию САПР с другими системами; выбор рационального варианта структуры подсистем и состав видов обеспечений подсистем; принятие основных решений по структуре видов обеспечений подсистем; разработка схем функционирования подсистем на уровне компонентов; формирование исходных данных и требований к разработке алгоритмов, языков проектирования, компонентов технического и информационного обеспечения; разработка математических моделей; принятие основных решений по компонентам лингвистического и технического обеспечений; организация работ на стадии эскизного проекта; изложение, оформление и утверждение эскизного проекта.

5. *Технический проект* состоит из следующих процедур: принятие окончательных решений по новому процессу проектирования, по структуре всех видов обеспечения САПР в целом; принятие окончательных решений по структуре подсистем САПР; разработка мероприятий по подготовке организации-пользователя к вводу в действие САПР; разработка технических заданий (требований) к разработке программ реализации процедур проектирования, к созданию компонентов методического и организационного обеспечения; принятие окончательных решений по разработке компонентов технического и организационного обеспечения; разработка алгоритмов и языков проектирования; организация работ на стадии технического проекта; изложение, оформление и утверждение документов на стадии технического проекта.

6. *Рабочая документация* отражает: детализацию взаимодействия САПР с другими системами, уточнение схемы функционирования и

структуры САПР (при необходимости); разработку (адаптацию) системы управления базой данных (СУБД) и общесистемного программного обеспечения; разработку мероприятий по подготовке организации-пользователя к вводу в действие САПР; разработку программ и программных документов; разработку документов технического, методического и организационного обеспечения; организацию работ на стадии рабочего проекта; изложение, оформление и утверждение документов на стадии рабочего проекта.

7. *Изготовление, отладка и испытания* включают: монтаж, наладку и испытания комплекса средств автоматизации проектирования для системы в целом; монтаж, наладку и испытания комплекса средств автоматизации проектирования подсистем; подготовку организации-пользователя к вводу в действие САПР; изготовление и отладку компонентов технического, программного и информационного обеспечения на машинных носителях; организацию работ на этой стадии; оформление и утверждение акта сдачи компонентов и комплекса средств автоматизации проектирования в целом.

8. *Ввод в действие* состоит из следующих этапов: опытного функционирования и приемочных испытаний САПР; опытного функционирования и приемочных испытаний подсистем САПР; проверки качества разработки компонентов; корректировки (при необходимости) и выпуска комплекта документов, входящих в состав САПР; организации работ на стадии ввода в действие; определения фактических технико-экономических показателей системы; оформления и утверждения протокола опытного функционирования САПР и акта приемки САПР.

Особенности автоматизированного проектирования станков на ранних стадиях заключаются в формировании исходных данных для проектирования, в разработке концепции проектирования, в применении модульного принципа проектирования и унификаций.

Анализ опыта проектирования с помощью систем САД/САМ, на МСПО «Красный пролетарий», где активно применяют такую технику при создании новых моделей станков, а также опыта ведущих европейских станкостроительных фирм показывает, что применение таких систем в наибольшей степени увеличивает производительность и эффективность конструкторского труда, во-первых, при концептуальном проектировании семейств станков, во-вторых, на ранних стадиях проектирования, для которых характерна наибольшая многовариантность конструкций.

Ключевые особенности автоматизированного проектирования на ранних стадиях состоят в формировании исходных данных для проекти-

рования, разработке концепции проектирования, применении модульного принципа проектирования и унификаций.

Исходные данные для проектирования практически невозможно собрать и обработать без применения вычислительной техники. Основой для исходных данных служат: во-первых, сравнительный анализ характеристик и параметров большого числа станков, подобных проектируемому; во-вторых, данные конъюнктуры рынка; в-третьих, оценка реальных возможностей предприятия — изготовителя станков и рынка комплектующих изделий. Для всего этого необходимо иметь специальные и постоянно расширяющиеся *базы данных* (в том числе информационные и патентные), представляемые в виде многомерных таблиц с характеристиками станков и численными данными, графической информации (например, с вариантами уже известных компоновок), а также системы микрофишей, на которых приведены общие виды подобных станков, выпускаемых различными фирмами, с информацией об особенностях их конструкций.

Конъюнктура рынка изучается и учитывается всеми ведущими станкостроительными фирмами (см. подразд. 17.5). Конечный результат работы по сбору исходной информации представляется в виде периодического отчета, в котором определяются перспективные для сбыта направления в разработке новых конструкций. Расставляются приоритеты проектирования путем простановки соответствующих коэффициентов (обычно весовых) на параметры и характеристики станков. Учитывается, сколько станков какой конструкции продано, каков резерв по рынку, оценены потенциальные возможности на будущее и т. д.

Основными показателями, которые в определенном отношении гарантируют сбыт, являются цена и характеристики работоспособности. Весьма емкий и удобный термин, объединяющий эти показатели и получивший международное применение, взят из немецкого языка — *Preisleistung* (*Preis* — цена, *Leistung* — имеет три значения: работоспособность, мощность, производительность). Работа по определению *Preisleistung* ведется всеми ведущими фирмами непрерывно в отношении как имеющейся на рынке продукции, так и продукции, которая должна выпускаться. Существующий порядок оценки новых отечественных конструкций станков по картам технического уровня, как правило, не дает желаемого результата.

Концепцию проектирования начинают разрабатывать после того, как сформулированы исходные данные и определены основные приоритеты проектирования. Разработкой концепции занимается, как правило, небольшая по численности (три-четыре человека) группа конструкторов.

торов высшей квалификации. Работа группы базируется на использовании вычислительной техники и накопленных банков данных с конструкциями станков и их узлов, агрегатов и систем. Это позволит по завершении данного этапа проектирования определить компоновку станка и объемы разработок, используя готовые узлы, блоки узлов, элементы и т. д.

Группа осуществляет поиск новых конструкций с учетом результатов проводимой структурной и параметрической оптимизации, самых последних достижений в области станкостроения, информации и применения новых материалов и комплектующих. Производительность таких групп весьма высока и может достигать 150 моделей станков в год на фирмах, активно применяющих технику CAD/CAM.

Модульный принцип проектирования (см. гл. 11) базируется на активном использовании возможностей вычислительной техники и используется тогда, когда уже имеется довольно четкое представление о семействе проектируемых станков. Тогда его применение наиболее эффективно. Возможно проектирование и одного станка, если имеются предшествующие наработки и он органически входит в ранее спроектированное семейство станков.

Только в случае разработки семейства станков и использования при этом ограниченного числа готовых узлов последние становятся модулями. Это является следствием принятого технического решения, ибо в принципе проектировать можно так, что узлы одного назначения не будут даже отдаленно похожи друг на друга.

Современное техническое обеспечение САПР позволяет легко получить модифицированные (например, зеркальные) изображения узлов (технологические модули) с минимальными затратами труда и времени. Несколько сложнее получают конструкционные модули, так как при их проектировании необходимо одновременно выполнять требования, заключающиеся в соблюдении размерных рядов и максимально возможной унификации.

При разработке концепции необходимо учитывать все возможные налагаемые на конструкцию ограничения (функциональные, технологические, эксплуатационные, эргономические и др.). Кроме того, должен быть решен вопрос о критерии целесообразности окончания модульного принципа конструирования для проектируемого семейства станков.

После определения модулей и принятия технических решений по узлам, агрегатам и системам проектируемого семейства станков (техника CAD/CAM позволяет проанализировать все эти вопросы очень глубоко, вплоть до коммуникаций) конструкторские разработки на уровне концепций поступают в группы, занимающиеся станками различного целевого назначения (ли-

бо станками принципиально различных компоновок) и конкретными узлами и системами станков. Группы следуют единой концепции, пользуясь общими для всех файлами и базами данных.

Унификация связана с применением в семействе проектируемых станков унифицированных сборочных единиц (узлов, подузлов, агрегатов), деталей (оригинальных и стандартных), комплектующих. Как показывает опыт автоматизированного проектирования, применение типовых унифицированных деталей нецелесообразно. Значительно выгоднее иметь большое число макросов и большие заделы в банках данных по модификациям и унифицированным узлам, что позволяет избегать излишней детализации конструкторских разработок и способствует ускорению и повышению качества проектирования. Информацию об унифицированных деталях, узлах и системах следует хранить на микрофишах или в графической части CAD/CAM систематизированно, по группам.

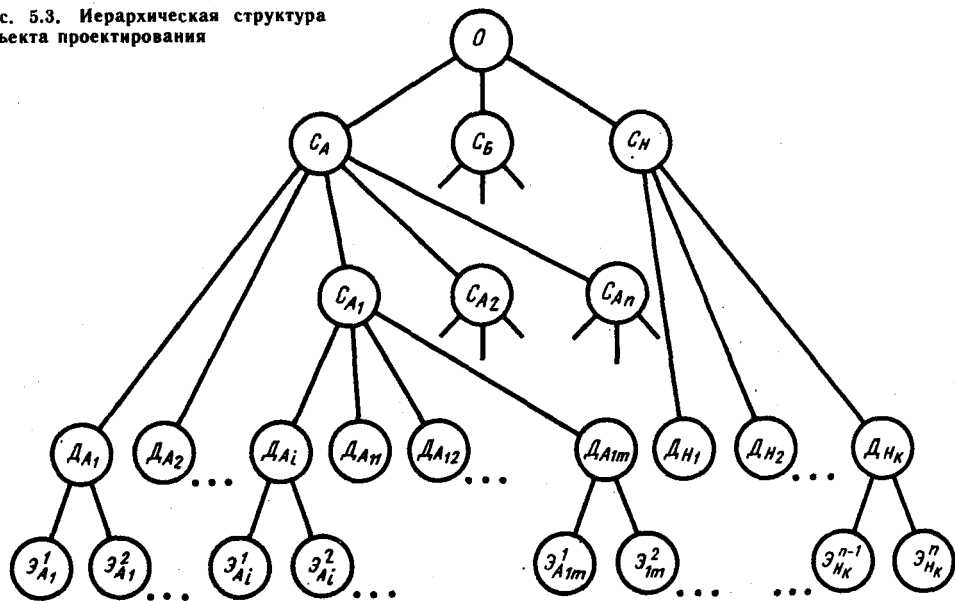
Эффективность автоматизированного концептуального проектирования заключается в простом переходе к детализовке (проектный чертеж может непосредственно поступать к детализовщику низкой квалификации), в отсутствие необходимости в сборочных чертежах, в чрезвычайно легком проведении корректировок (при исключении возможного большого количества ошибок), в резком сокращении объема рутинной конструкторской работы, в облегчении перехода к технологической САПР, в автоматизации заказа комплектующих. Необходимо наличие обезличенной системы обозначения деталей и комплектующих, специальных форм конструкторской документации и т. п.

Структура прикладных САПР станков. Составными структурными частями САПР являются самостоятельные подсистемы, обладающие всеми свойствами систем, а структурными частями подсистем — компоненты по видам обеспечения. Под структурой понимают состав частей САПР и связи между ними. От того, насколько рационально выбрана структура, зависят качество функционирования и возможность получения объектов проектирования с требуемыми характеристиками.

По назначению подсистемы САПР делятся на *проектирующие* и *обслуживающие*. К проектирующим относятся подсистемы, выполняющие проектные процедуры и операции для проектирования деталей, узлов, агрегатов и систем. К обслуживающим относят подсистемы, предназначенные для поддержания работоспособности проектирующих подсистем, например подсистемы ввода и вывода графической информации, подсистему документирования, подсистему информационного поиска.

В зависимости от отношения к объекту про-

Рис. 5.3. Иерархическая структура объекта проектирования



ектирования различают объектно-ориентированные (объектные) и объектно-независимые (инвариантные) проектирующие подсистемы. В объектных подсистемах выполняются процедуры и операции, непосредственно связанные с конкретным объектом (узлом или станком), в инвариантных подсистемах — унифицированные процедуры и операции, применяемые ко многим объектам проектирования.

Подсистемы состоят из компонентов САПР, которые выполняют функции обеспечения подсистем:

методическое обеспечение — документы, в которых отражены состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования;

математическое обеспечение — совокупность математических методов, алгоритмов и моделей;

программное обеспечение — совокупность программ, представленных в требуемой форме вместе с необходимой документацией;

техническое обеспечение — совокупность взаимодействующих технических средств для ввода, вывода, хранения, переработки, передачи данных, организации диалога человека с ЭВМ, изготовления проектной документации;

информационное обеспечение — совокупность сведений и документов, содержащих описание стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, типовых элементов конструкции, комплектов из изделий, материалов и другие данные;

лингвистическое обеспечение — совокупность языков, терминов, понятий;

организационное обеспечение — совокупность документов, регламентирующих организационную структуру подразделений и их взаимодействие с комплексом средств автоматизированного проектирования.

Одним из важнейших комплексов работ при создании конкретных прикладных САПР является определение структуры системы на уровне подсистем и структуры подсистем на уровне компонентов по видам обеспечения.

Структуры САПР на уровне подсистем. Основными факторами, определяющими состав проектирующих подсистем, являются объект проектирования, структура подразделений проектной организации, состав технической документации на проектируемый станок и виды обеспечений.

В общем случае всякий объект проектирования можно представить в виде иерархической структуры, включающей четыре уровня декомпозиции: объект в целом, сборочные единицы, детали и элементарный уровень. Иерархическую структуру объекта проектирования изображают в виде дерева (рис. 5.3), вершиной которого является объект O в целом, а ниже лежащим уровням соответствуют части объекта проектирования — сборочные единицы $C_A, C_B, \dots, C_N, A_1, C_{A_2}$, детали $D_{A_1}, D_{A_2}, \dots, D_{A_i}, D_{A_{i+1}}, D_{A_{i+2}}, D_{A_{i+3}}, \dots, D_{A_{1m}}, D_{N_1}, D_{N_2}$ и элементы деталей и элементарные линии $\mathcal{E}_{A_1}^1, \mathcal{E}_{A_1}^2, \dots, \mathcal{E}_{N_k}^{n-1}, \mathcal{E}_{N_k}^n$. Число ступеней для сборочных единиц не ограничивается.

Каждая представленная на рисунке часть

объекта проектирования характеризуется своим процессом проектирования, состоящим из проектных процедур, а последние состоят из проектных операций. Таким образом, связанный с иерархией частей объекта процесс проектирования представляет еще более сложную структуру, развиваемую в других измерениях.

Структуру САПР, кроме объекта и процесса проектирования, определяет также структура проектной организации, в которой создается САПР. Непосредственно на выбор состава подсистем САПР влияет структура производственных подразделений на уровне отделов, секторов, бригад. Исходными данными для формирования структуры проектирующих подразделений является сформированный процесс автоматизированного проектирования. Как правило, стремятся сохранить имеющуюся структуру подразделений, если отсутствуют какие-либо причины ее коренной перестройки. Основная задача формирования структуры проектирующих подразделений — распределить все проектные процедуры по подразделениям, определить функциональную структуру подразделений и требуемую квалификацию работников. Если в результате опытного функционирования САПР какие-нибудь проектные процедуры не могут быть поручены существующим подразделениям, то принимается решение о создании новых подразделений.

Технической документацией, в которой представляются конечные результаты разработки проекта, обеспечивается адекватное воспроизведение объекта проектирования на производстве. Состав, содержание и форма технических документов даны в государственных стандартах, ЕСКД, ЕСТД и других документах, которые распространяются на все виды документации: на бумажных или машинных носителях, алфавитно-цифровую, графическую. Каждая подсистема должна выдавать техническую документацию.

Каждая подсистема должна обладать всеми свойствами системы в целом и должна иметь возможность самостоятельного ввода в действие и функционирования. Для этого она должна иметь компоненты всех видов обеспечений.

Необходимость учета всех названных выше факторов предопределяет итерационный характер формирования структуры САПР на уровне проектирующих подсистем.

В общем случае следует рекомендовать следующий порядок выполнения этой работы:

проводят декомпозицию объекта проектирования на составные части, в частности на сборочные единицы и детали для объектов типа изделия в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5.3;

для проектируемого станка в целом и для каждой сборочной единицы определяют состав

проектных процедур в соответствии с типовым процессом проектирования или на основе существующих проектных процедур аналогичного класса объектов;

за каждым самостоятельным подразделением закрепляют узлы и системы проектируемого станка, а также состав соответствующих им проектных процедур, реализуемых в этих подразделениях;

проверяют, имеют ли (или будут ли иметь в результате создания САПР) выделенные самостоятельные подразделения все виды обеспечения для реализации закрепленных за ними проектных процедур;

на основе подразделений, которые имеют все виды обеспечения для выполнения проектных процедур, реализующих проектируемый станок в целом или его узлы и системы, организуют проектирующие подсистемы САПР. Оставшиеся проектные процедуры реализуют в рамках проектно-методического или проектно-технического комплексов, которые включают в сформированные подсистемы САПР, учитывая, что конкретно реализует подсистема и включаемые в нее комплексы;

изменяют (преобразуют) структуру проектных подразделений.

Структура САПР на уровне проектирующих подсистем можно считать сформированной, если проектируемый станок вместе с проектными процедурами, обеспечивающими их автоматизированное проектирование, охвачен подсистемами, включающими определенные подразделения (группы) пользователей и имеющими все виды обеспечений.

После формирования структуры САПР на уровне подсистем определяют с учетом имеющегося ресурса времени сроки создания первоочередных подсистем и последующих очередей САПР.

Для рационального размещения и обмена информацией между проектирующими подсистемами целесообразно информацию, используемую при автоматизированном проектировании несколькими подсистемами, объединять в единую обслуживающую подсистему — банк данных, включающий базы данных и систему управления базами данных. Общие требования к автоматизированному банку данных регламентированы ГОСТ 23501.101—87.

Программное обеспечение, управляющее проектированием во всех подсистемах, целесообразно объединять в единую мониторинговую подсистему. Общие положения по мониторинговой системе САПР, состав, функции и требования к ее созданию приведены в ГОСТ 23501.101—87.

В составе обслуживающих подсистем следует выделить подсистему (или несколько подсистем) автоматизированного изготовления, учета, хранения и изменения технической документа-

ции, получаемой в условиях функционирования САПР.

Предпочтительна двухуровневая структура технических средств САПР, которая включает на верхнем уровне центральный вычислительный комплекс (ЦВК) и на нижнем уровне — комплексы и компоненты технического обеспечения — персональные компьютеры, автоматизированные рабочие места (АРМ), отдельные терминалы (дисплеи, аналого-цифровые преобразовательные устройства (АЦПУ), графопостроители и т. п.), подключенные к центральному вычислительному комплексу (ЦВК).

ЦВК обслуживает пользователей всех или нескольких подсистем, поэтому его целесообразно выделить в отдельную обслуживающую подсистему САПР. ЦВК следует создавать с учетом требований, установленных в ГОСТ 23501.201—85.

Из других обслуживающих подсистем можно рекомендовать включать в состав САПР подсистемы геометрического моделирования, машинной графики, обработки результатов испытаний и др.

Выделение как можно большего числа обслуживающих подсистем дает возможность освободить пользователя от операций, не связанных непосредственно с формированием модели станка или его узлов, и обеспечивает максимальный сервис при выполнении автоматизированного проектирования.

Структуры подсистем САПР на уровне компонентов определяются процессом автоматизированного проектирования, состоящим из проектных процедур и операций, а также структурой подразделения-пользователя проектирующей подсистемы.

Проектирующая подсистема формируется для выполнения одной или нескольких проектных процедур, реализация которых приводит к получению объекта проектирования в целом или его составных частей — сборочных единиц, а каждая проектная процедура состоит из набора проектных операций.

Отдельные пользователи проектирующей подсистемы САПР выполняют проектные операции, используя определенные технические средства, прикладные и общесистемные программы, различные языки проектирования, методику автоматизированного проектирования и информацию, необходимую для выполнения данной операции. Для того чтобы рационально распределить между пользователями информационные, программные и другие ресурсы, необходимо при формировании структуры проектирующей подсистемы на уровне компонентов учитывать состав пользователей и степень их участия в выполнении определенных проектных процедур.

Формирование структуры проектирующих подсистем проводят в следующем порядке:

проектные процедуры, реализуемые рассматриваемой подсистемой, разбивают на проектные операции на основе анализа существующих процессов проектирования аналогичного класса объектов;

для каждой конкретной операции, входящей в проектную процедуру, определяют состав пользователей подсистемы, которые выполняют данную операцию;

формируют состав компонентов по видам обеспечения, необходимых для выполнения проектных процедур и операций, реализуемых в подсистеме.

Для каждой проектной процедуры и операции определяют необходимый состав компонентов математического обеспечения (методы, модели и алгоритмы). Компоненты математического обеспечения содержат исходные для определения состава компонентов программного обеспечения и, в частности, прикладных программ проектирования.

При формировании структуры подсистем необходимо определить компоненты информационного обеспечения, содержащие условно-постоянную информацию, используемую для выполнения проектных процедур и операций, информацию о технических, метрологических, эксплуатационных и других характеристиках объектов, о процессе проектирования (характеристиках стандартных проектных процедур и операций, типовых проектных решениях), действующих нормативах, о справочных данных и т. п. Полученную информацию анализируют с целью возможности ее объединения в базы данных или отдельные наборы данных.

Обмен информацией между подсистемами осуществляется посредством мультиплексных каналов связи, селекторных каналов связи, машинных носителей информации, нормативно-технических документов.

Компоненты технического обеспечения определяют с учетом того, чтобы каждый пользователь был обеспечен техническими средствами для выполнения предписанных ему процедур (операций) проектирования. При этом определяют необходимое число терминальных устройств, подключенных к ЦВК, требуемую мощность и количество ЭВМ на различных уровнях САПР, требуемый объем запоминающей устройств и т. д. В процессе формирования структуры технических средств учитывают имеющиеся в организации комплексы технических (вычислительных) средств. Определяют также компоненты методического, лингвистического и организационного обеспечения: методики проектирования объекта и его частей на выбранных технических средствах, языки проектирования, структуру подразделения — пользователя проектирующей подсистемы.

На основе анализа сформированных компо-

ентов по видам обеспечения определяют состав пользователей (конструкторов, технологов), обслуживающего персонала САПР и перераспределяют функции отдельных пользователей.

Структуру проектирующей подсистемы на уровне компонентов можно считать сформированной, когда определен состав компонентов математического, информационного, технического, программного, методического, лингвистического и организационного видов обеспечения, необходимых для выполнения всех проектных процедур и операций, реализуемых в подсистеме.

Основная проектная процедура. Проектирование включает эвристические (творческие) и алгоритмические (рутинные) операции. Алгоритмические операции реализуют на ЭВМ. Это деление достаточно условно, так как изучение механизма творческой деятельности конструктора уже в настоящее время позволяет алгоритмизировать операции, ранее относившиеся к эвристическим.

Основным признаком, определяющим долю творческой деятельности в процессе проектирования, является неопределенность проекта. На начальных этапах проектирования, когда неопределенность проектных параметров максимальная, объем эвристических операций максимален. По мере уточнения проектных решений увеличивается доля алгоритмических операций.

На каждом этапе проектирования используют те или иные методы проектирования. Конструктор многократно выполняет последовательность действий: синтез — анализ — принятие решения, которую называют основной проектной процедурой (рис. 5.4).

Синтез — это разработка вариантов конструкции и выбор согласно значениям целевой функции одного или нескольких наиболее предпочтительных вариантов.

Анализ выполняют для окончательной оценки конкурирующих вариантов, так как необходимо обеспечить значения показателей качества, непосредственно заложенных в техническом задании, в силу того, что целевая функция лишь комплексно оценивает качество вариантов.

В процессе *принятия решения* по результатам анализа производят окончательный выбор проектного варианта. Последнюю операцию обычно выполняет проектировщик, а процедуры анализа и синтеза автоматизируют с помощью ЭВМ.

Различают структурный и параметрический анализ и синтез. Сначала производят выбор структуры конструктивного варианта, а затем — выбор его параметров. Наиболее трудноформализуемы процедуры структурного синтеза и анализа.



Рис. 5.4. Основная проектная процедура

Математическое моделирование в САПР станков. Основу основ любой САПР при проектировании металлорежущих станков и станочных систем составляют математические модели узлов и систем станков и происходящих в них процессов. От полноты и адекватности математических моделей зависит достоверность прогнозирования выходных характеристик и параметров узлов и систем, а также возможность их оптимизации.

Модель анализа объекта проектирования включает уравнения функционирования объекта проектирования:

$$G = Y(P, X), \quad (5.1)$$

где Y — вектор выходных параметров или сигналов; P — внешние и внутренние воздействия; $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ — вектор структурных или параметрических переменных объекта проектирования.

По выходным параметрам объекта проектирования вычисляют его вектор качества G , который сравнивают с заданным (техническими требованиями) уровнем G_0 . Знак и значение составляющих вектора $\Delta G = G_0 - G$ определяют уровень качества объекта проектирования.

Синтез объекта проектирования предполагает многошаговую, итерационную процедуру (рис. 5.5). На i -м шаге вычисляется целевая функция объекта проектирования (критерий эффективности) F_i , которая сравнивается с ее предыдущим значением F_{i-1} . Если значение целевой функции остается неизменным, то принимаются значения структурных или параметрических переменных, полученных на i -м шаге, иначе процедура повторяется для $(i+1)$ -го шага. Схема алгоритма включает в себя блок генерирования вариантов (варьирование структуры или параметров) объекта проектирования и блок проверки ограничений на переменные.

Каждой проектной процедуре в зависимости от этапа, вида проектных работ и модели функционирования соответствуют различные математические модели (рис. 5.6). Так, одновариантный анализ включает статические и динамические модели. При многовариантном анализе используются те и другие модели, но с учетом неустойчивости или неопределенности их в

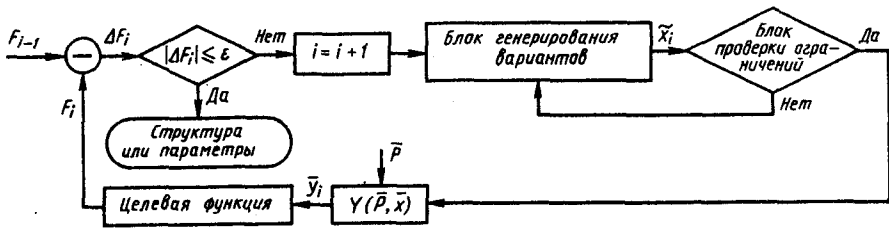


Рис. 5.5. Алгоритм синтеза объекта проектирования

процессе функционирования объекта проектирования. Если эта нестабильность подчиняется вероятностным законам, то используются статистические (стохастические) модели качества. При невозможности (или если нет необходимости) характеризовать изменение параметров в поле допуска используются модели чувствительности. Функция чувствительности J_i^G определяется как частная производная критерия

$$J_i^G = \partial G / \partial x_i. \quad (5.2)$$

Здесь функции чувствительности составляют производные первого порядка. Функция чувствительности n -го порядка ($n_1 + n_2 + \dots + n_g = n$)

$$J_{i_1, i_2, \dots, i_g}^G = \frac{\partial^n G}{\partial x_{i_1}^{n_1} \partial x_{i_2}^{n_2} \dots \partial x_{i_g}^{n_g}}. \quad (5.3)$$

Параметрический синтез используется для формирования технических требований к элементам объекта проектирования и расчета параметров этих элементов. По отношению к задаче формирования технических требований исходным является требование ко всему объекту проектирования. К процедуре параметрического синтеза можно отнести и задачу определения допусков на параметры элементов [25]. Структурный синтез в зависимости от уровня проектирования делится на функциональный и конструкторский. Функциональное проектирование использует модели концептуального и схе-

мотехнического синтеза. Конструкторское проектирование включает модели компоновочного и геометрического синтеза.

Процедура синтеза состоит из задач структурной и параметрической оптимизации объекта проектирования. Для процедуры принятия решения (рис. 5.5) наиболее характерным является использование так называемых неформализованных критериев. В этих условиях для сравнения вариантов применяют эвристические модели, получаемые, например, на базе нечетких (расплывчатых) множеств.

Оптимизация при проектировании. Проектируемый станок должен иметь требуемые выходные характеристики. В самых простых случаях оптимальное значение нужной характеристики удается вычислить с помощью элементарных формул, содержащихся в справочной литературе. Однако такой метод определения оптимальных характеристик, применяемый проектировщиком, далеко не всегда обеспечивает получение оптимальных решений при проектировании таких сложных систем, как станок.

К современным станкам и их узлам конъюнктура рынка предъявляет два основных требования: они должны обеспечивать высокую точность, гарантирующую качество обрабатываемых на станке изделий, а также быстроходность, определяющую производительность и возможность обработки материалов. Эти требования противоречат друг другу: увеличение быстроходности неминуемо приводит к снижению

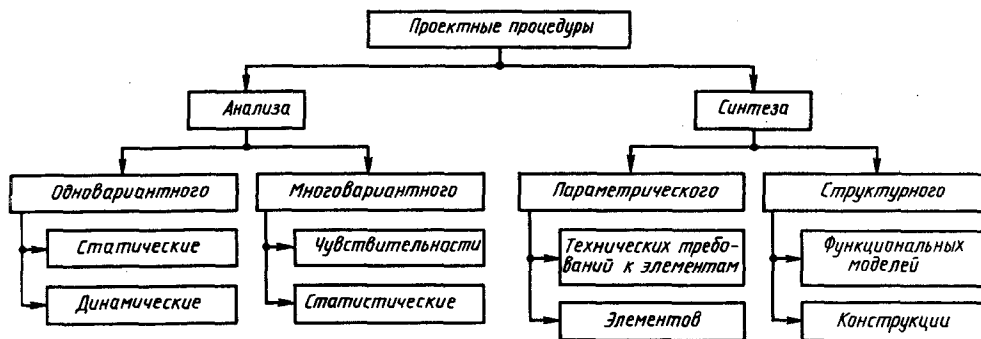


Рис. 5.6. Математические модели проектных процедур

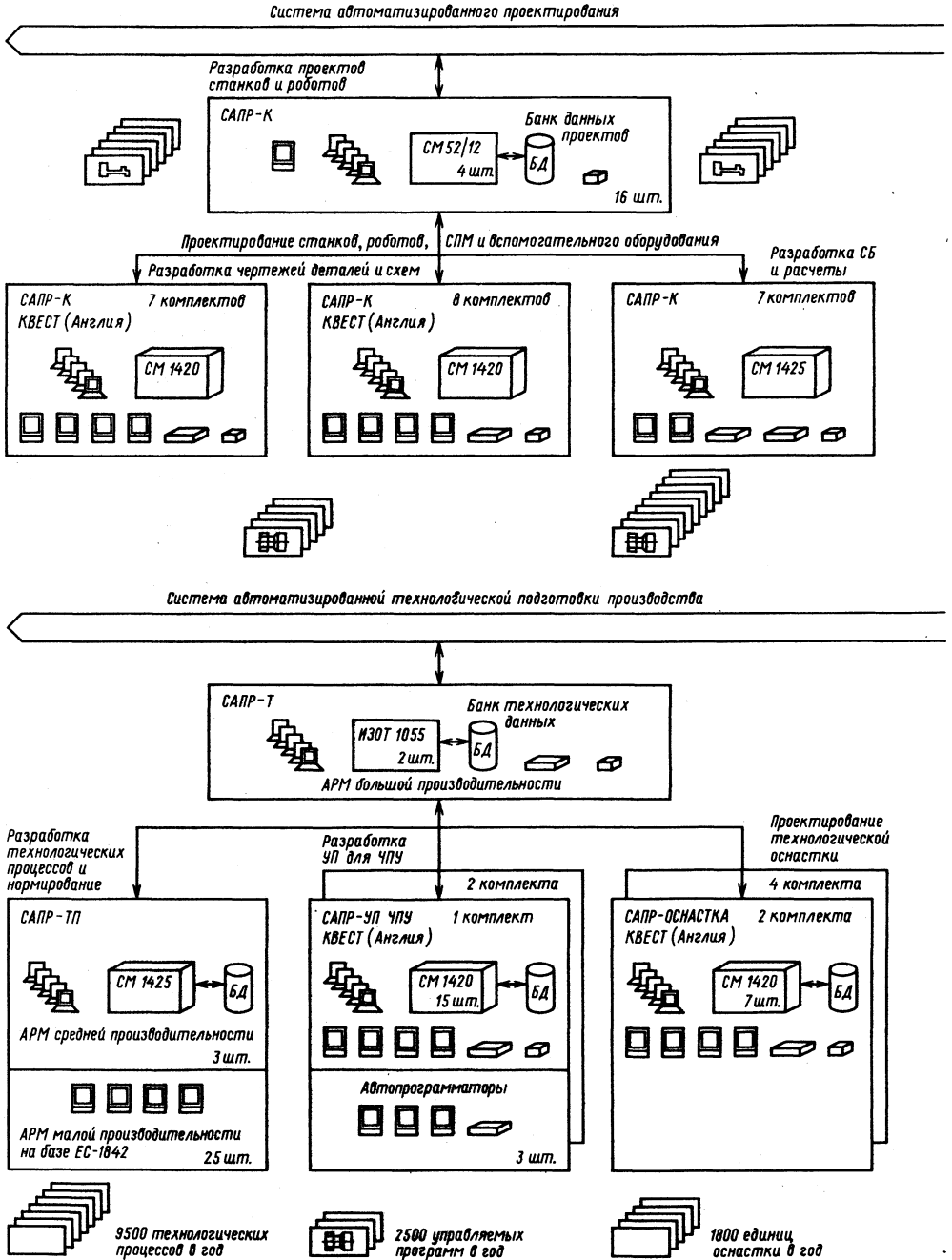
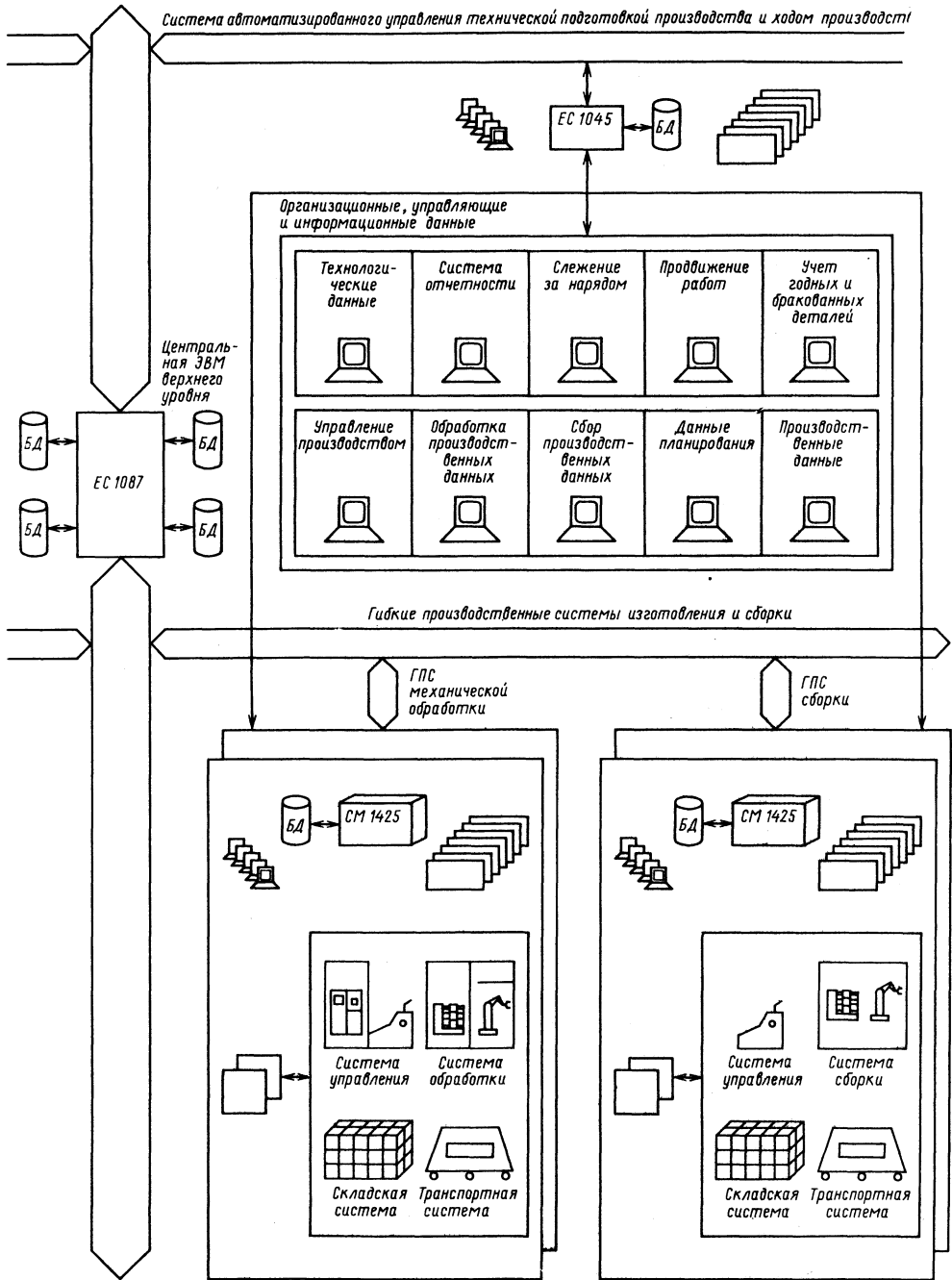


Рис. 5.7. Интегрированная система автоматизированного проектирования и производства станкостроительного завода

Система автоматизированного управления технической подготовкой производства и ходом производства



точности. Применение методов оптимального проектирования позволяет на стадиях эскизного и технического проектов найти решение, наилучшее с точки зрения обеспечения совокупности требуемых характеристик станка. При этом процедура поиска оптимальных параметров узлов, соответствующих их оптимальной точности и быстроходности, становится неотъемлемой частью процесса проектирования.

В зависимости от типа производства проектируемый станок может иметь различное целевое назначение. Для массового и крупносерийного производства главное — обработка определенного множества заготовок с минимальными затратами на основе принятой технологии, и точность в этом случае является критериальным ограничением. При серийном производстве, особенно мелкосерийном и единичном, главным является, как правило, обеспечение высокой выходной точности обработки, что существенно расширяет универсальность и технологические возможности станка, а быстроходность при этом принимают в качестве критериального ограничения.

Технические средства САПР. Для функционирования САПР необходимы следующие технические средства:

подготовки исходных данных в САПР, т. е. средства, обеспечивающие кодирование информации, описание ее на входном языке;

ввода данных, обеспечивающие ввод закодированной информации в ЭВМ;

программной обработки данных;

вывода информации;

отображения и документирования информации, обеспечивающие получение твердых копий результатов решения задач САПР;

передачи данных, обеспечивающие связь различных групп технических средств при их распределенном расположении в различных подразделениях;

архива проектных решений, обеспечивающего хранение, контроль, восстановление и размножение данных о проектных решениях.

В современных САПР применяют различные конфигурации перечисленных технических средств: от технических средств, реализующих одну какую-либо функцию или этап обработки информации, до технических средств, реализующих совокупность каких-либо этапов обработки. Кроме функционального объединения различных этапов преобразования в одном техническом средстве, созданы специальные комплексы технических средств САПР, обеспечивающие реализацию всех этапов преобразования информации — от кодирования до получения выходных документов.

Особое место занимают технические средст-

ва САПР, обеспечивающие хранение и использование проектных решений. По мере возрастания числа проектных решений, полученных с помощью САПР, возникает необходимость накопления этих решений для использования в качестве аналогов при решении новых проектных задач, для анализа результатов проектирования и совершенствования методов проектирования, для периодического контроля проектных решений. Функцию ведения архива выполняют технические средства, способные записывать информацию на машинные носители (микрофильмы, микрофиши, магнитные ленты, магнитные диски) и считывать ее с них, а также различные устройства поиска и размножения документов на микрофишах и микрофильмах [10].

Предлагается следующий типовой состав технических средств прикладных САПР:

для проектирования узлов: комплекс АРМ 1.04/СМ, ИЗОТ 1016С (2 шт.), ПЭВМ ЕС-1840 и ДВК-3М2;

для проектирования станков, их систем и узлов: комплекс типа VAX и совместимые с ним персональные компьютеры типа QUEST и IBM PC/AT.

В качестве примера интегрированной системы автоматизированного проектирования и производства в условиях станкостроительного завода на рис. 5.7 показана система, предназначенная для автоматизированного решения разного рода задач проектирования, технологической подготовки производства, управления подготовкой и ходом производства.

Информационное обеспечение САПР включает самые разнообразные сведения справочного характера: описание типовых проектных решений, типовых элементов, комплектующих изделий, материалов и других справочных данных, информацию об эксплуатационных режимах и действующих на узлы станка факторах, описания стандартных проектных процедур, а также файлы и блоки данных на магнитных носителях с записью перечисленных и других документов.

Основной формой реализации компонентов информационного обеспечения САПР является база данных, которая представляет собой совокупность всех информационных массивов. База данных совместно с управляющим ею программным обеспечением (системой управления базой данных СУБД) образует банк данных. Система управляет включением, хранением и выдачей информации по запросу пользователей или в соответствии с командами прикладных программ.

Целесообразно применять *локальные* базы данных (для задач, комплексов задач и подсистем с примерным объемом данных 2—10 Мбайт), *распределенные* (с объемом

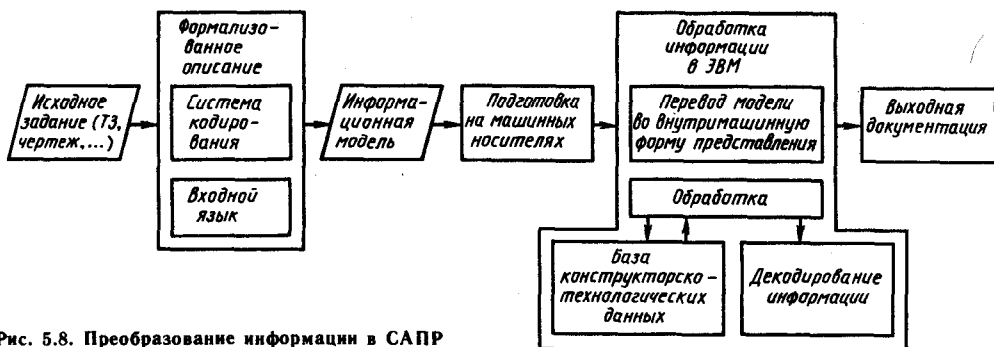


Рис. 5.8. Преобразование информации в САПР

данных 100 Мбайт—2 Гбайт) и централизованные (для всей САПР, с объемом данных до 10 Гбайт). Хранение баз данных предусматривается на магнитной ленте и магнитных дисках.

Локальные базы данных содержат информацию об отдельных узлах (типичные и унифицированные образы узлов и их элементов, готовые проекты, применяемость, технические требования), системах (типичные и унифицированные блоки схем, элементы схем, графические образы, применяемость, спецификации), деталях (типичные и унифицированные образы, типичные элементы поверхностей, технические требования), наладках (типичные и унифицированные образы инструмента, заготовок, деталей, зажимных приспособлений), упаковке (типичные и унифицированные образы тары, способы транспортирования, размещения и крепления) и т. д. Кроме того, локальные базы данных содержат информацию о конструкторской, текстовой, планово-экономической и другой документации.

Локальные базы данных можно расширять. Каждая из перечисленных локальных баз далее детализируется.

Распределенные базы данных содержат информацию о проектных решениях станков в целом, об оригинальных, унифицированных и типовых сборочных единицах, о деталях.

В современных САПР обрабатываемая информация претерпевает ряд преобразований, связанных как с простым переводом из одной формы в другую, так и с непосредственной ее обработкой. Такие преобразования вызваны, во-первых, удобством работы пользователя и технических средств обработки информации в различных формах представления информации. Если пользователю удобнее работать в естественной форме представления информации, то технические средства обрабатывают цифровые формы представления информации. Во-вторых, преобразования связаны с систематизацией изложения и точностью обработки информации в САПР.

Преобразование информации в САПР показано на рис. 5.8. Данный состав этапов преобразования информации является максимальным, и на практике отдельные этапы могут отсутствовать или быть объединены.

Программно-методическое обеспечение включает программные средства, операционную систему и прикладные программы. Программные средства должны обеспечивать диалоговый режим работы пользователей, защиту массивов данных и программ от несанкционированного доступа, автоматизированное диагностирование компонентов и системы в целом. Программное обеспечение САПР состоит из операционной системы и системы прикладных программ.

Операционная система предназначена для организации управления ввода-вывода и управления базой данных, подготовки и отладки программ, а также других вспомогательных операций. Операционная система является составной частью аппаратных средств САПР.

Прикладные программы являются частью специального программного обеспечения и наряду с инструкциями по их использованию и алгоритмическими языками отражают специфику прикладных САПР и решаемых с их помощью задач. Совокупность прикладных программ определяет возможности САПР. Разработка пакетов прикладных программ — самый трудоемкий и дорогостоящий этап создания каждой прикладной САПР.

К программному обеспечению САПР предъявляются специфические требования, выполнение которых дает возможность эффективно пользоваться системой:

целесообразно использовать операционные системы ОС ЕС (не ниже 7.0), ОС РАФОС, ОС РВ, MS DOS;

следует применять языки программирования высокого уровня: Фортран IV, PL, Паскаль, Турбо-Паскаль и т. п.;

режим функционирования — диалоговый; используемые общесистемные программные средства: система обеспечения диалогового

режима — типа TSO; системы управления базами данных реляционные — типа АДАБАС; трансляторы языков программирования — Фортран, Паскаль, PL, PROLOG; системы автоматизированного проектирования типа AUTOCAD, AN-WIL, DRAGON; система формирования текстовой документации — типа WORDGRAFT; система обеспечения работы сети ЭВМ — типа ETHERNET, PC NET.

Для автоматизации проектных процедур, выполнения задач и функций прикладных САПР станков, их узлов и систем необходимо создать пакеты прикладных программ, которые для перечисленных ниже объектов проектирования выполняют следующие функции:

для главного привода — синтез кинематической структуры, проверочный силовой расчет коробки скоростей, динамический расчет привода с различными вариантами электродвигателей, уточненный динамический расчет привода;

для приводов подач и вспомогательных перемещений — расчет вариантов конструкции приводов, сравнение вариантов, выбор обоснованного технического решения, просмотр автоматизированной базы данных электродвигателей;

для шпиндельного узла — проектирование и расчет вариантов конструкции шпиндельного узла, оптимизацию параметров опор и шпинделя, принятие обоснованного технического решения, прогнозирование выходных характеристик узла, получение графического отображения, составление конструкторской документации;

для несущих систем станков — синтез компоновок, расчеты деформаций в пространственных упругих системах при воздействии силовых и тепловых нагрузок;

для направляющих станков — расчет средних и наибольших значений давлений на направляющих, прогнозирование ресурса и формы изношенной поверхности;

для электро- и гидрооборудования — просмотр автоматизированной базы данных типовых элементов схем, расчеты элементов, получение графического отображения схем, составление графической и текстовой документации;

для деталей типа тел вращения, корпусных и плоских деталей — создание образов из типовых элементов поверхностей, типовых и унифицированных деталей;

для наладок — расчет режимов обработки, выбор инструмента, просмотр базы данных типовых элементов, проектирование наладки, составление документации;

для упаковки — силовые расчеты элементов упаковки, типовые элементы, составление графической и текстовой документации;

для текстовой конструкторской документации — сбор информации, формирование заглавных и титульных листов, разделов, таблиц, страниц, строк, осуществление переносов, формирование и выдачу документации и т. д.;

для информационно-поискового программно-го обеспечения — сбор и формирование аналогов по заданным параметрам;

для программного обеспечения подготовки технологических процессов — разработку технологических процессов, формирование документации;

для планово-экономических задач — формирование плана работ на год по бюро, бригадам, исполнителям, расчет экономической эффективности, формирование документов;

для управления выполнением работ ОГК — учет выполняемых работ, контроль исполнения.

Содержание каждого из перечисленных выше пакетов прикладных программ разрабатывают с большой степенью детализации.

Ниже в качестве примера рассмотрена одна из наиболее трудоемких проектных процедур «Разработка комплекта конструкторской документации (КД)», предназначенная для получения на основе разработанных процедур комплекта КД в составе чертежей сборочных единиц, деталей, сопутствующих документов и текстовой КД. Разработка и выпуск комплекта КД на проектируемый узел станка обеспечивает набор подпрограмм: формирование главных видов (подпрограмма обеспечивает получение на чертеже изображения главных видов); размещение стандартных и типовых элементов (позволяет ввести в структуру узла необходимые стандартные и типовые элементы (винты, болты, шайбы, гайки, шпильки, кольца, проставки и т. п.)); формирование видов (обеспечивает формирование на чертеже изображения слева, справа, сверху, снизу); формирование резервов (обеспечивает формирование на чертеже изображения простых, сложных, местных разрезов, а также вынесенных сечений); компоновка чертежа (позволяет выполнить размещение изображений видов и разрезов на чертеже); формирование спецификаций (позволяет сформировать спецификацию изделия в целом или его составных частей); простановка позиций на сборочных чертежах; постановка размеров и параметров на чертежах; формирование технических требований; выбор материалов; выбор допусков и посадок; выбор шероховатости поверхностей; выбор покрытий; выбор разъемных соединений; выбор неразъемных соединений; формирование ведомости спецификаций; формирование ведомости покупных изделий; формирование ведомости ссылочных документов; формирование ведомости держателей подшипников; формирование ве-

домости запасных частей; формирование ведомости эксплуатационных документов; формирование ведомости согласования применения покупных изделий; формирование карты технического уровня; формирование извещения об изменении; формирование технических условий; формирование технического описания и инструкции по эксплуатации; формирование паспорта; генерация изображения в диалоговом режиме.

Методическое обеспечение прикладных САПР станков включает:

руководящие технические материалы для расчетов главного привода, приводов подач и вспомогательных перемещений, шпиндельного узла, несущих систем, направляющих, других узлов станка, электро-, гидро- и пневмооборудования, систем смазывания и т. д.;

руководящие технические материалы по методам расчета и прогнозирования характеристик станка и его узлов (по методу конечных элементов для расчета деформаций элементов несущей системы станка, по методу сил в матричной формулировке для расчета шпиндельных узлов), по приближенным методам расчета тепловых смещений формообразующих узлов для оценки вариантов их конструкций, по методу статистического моделирования для прогнозирования тепловых смещений узлов и их износа и т. д.);

руководящие технические материалы по проектированию различных моделей и модификаций станков;

инструкции пользователю по расчетам главного привода, приводов подач и вспомогательных перемещений, шпиндельного узла, несущих систем, направляющих, других узлов, электро-, гидро- и пневмооборудования, систем смазывания и т. д.;

инструкции по методам расчета и прогнозирования характеристик станка и его узлов; инструкции по проектированию различных моделей и модификаций станков;

инструкции по проектированию деталей узлов станков (типа тел. вращения, корпусных и плоских);

инструкции по проектированию систем СОЖ, наладки, упаковки, конструкторской текстовой документации, по разработке текстовой документации, по информационно-поисковому программному обеспечению, по решению планово-экономических задач, по управлению выполнением работ;

инструкции по созданию, корректировке и выводу информации из баз данных;

инструкции по кодированию входной, графической информации;

инструкции по вводу исходной информации для проектирования;

инструкции по работе с программой ввода;

инструкции по выводу информации из массивов данных;

инструкции по получению графической и текстовой документации.

Организационное обеспечение САПР включает:

нормативы на проектно-конструкторские и технологические работы, выполняемые с использованием средств автоматизированного проектирования;

методику планирования, контроля и учета выполнения проектно-конструкторских и технологических работ в условиях функционирования САПР;

типовые положения о порядке создания САПР на заводе, о подразделении разработки, внедрения и обслуживания САПР и взаимодействии его с подразделениями-пользователями;

типовую структуру и штатные расписания подразделения САПР завода и квалификационные требования к его персоналу;

приказ по заводу «О создании и развитии САПР на предприятии» в соответствии с приказами вышестоящей организации;

приказ по заводу о подготовке и переподготовке кадров в области создания и использования САПР;

разработку единого годового плана работ по созданию и заимствованию программных средств САПР и определения СУБД.

Выполнение проектно-конструкторских и технологических работ предусматривает нормирование проектных и расчетных работ, чертежных работ узлов, деталей, наладок, составления текстовой документации, составления технологических процессов, технологической оснастки, разработок УПА для ЧПУ.

Методика планирования, контроля и учета выполнения работ регламентирует: планирование, контроль и учет выполнения заданий на автоматизированное проектирование; планирование и учет фактического времени загрузки ЭВМ, АРМ и ПК; планирование и учет выпуска текстовых и графических документов, программ для станков с ЧПУ; плановый расчет стоимости работ и учет фактических затрат на их выполнение. Методику реализуют в составе задач компоненты «Управление выполнением работ».

Положение о порядке создания САПР, подразделений разработки, внедрения и обслуживания определяет: ответственного за проведение работ по созданию САПР; основные функции и задачи подразделений разработки, внедрения и обслуживания; задачи служб завода по созданию подразделений САПР.

Структура и штатные расписания подразделений предусматривают включение необходимых специалистов для разработки, функ-

ционирования САПР, постановки системных и прикладных задач, сопровождения программно- и информационного обеспечения.

Документация в прикладных САПР. Документирование результатов организационных и технических работ является важнейшим условием высококачественного и быстрого создания, освоения, функционирования и развития САПР. Правила и типовые решения при документировании в САПР регламентированы нормативно-техническими документами о видах и комплектах документов на систему в целом, о документировании компонентов методического, информационного (МР 116—84), организационного обеспечения и комплексов средств.

В процессе создания САПР разрабатывают документацию, которую в зависимости от назначения разделяют на три вида: относящуюся к процессу создания САПР, входящую в состав САПР и эксплуатационную.

Документы, относящиеся к процессу создания САПР, используют для организации ведения процесса, поэтапного контроля результатов работ для изготовления, отладки и испытания компонентов и комплекса средств автоматизации проектирования, а также для ввода в действие САПР и ее подсистем. Эти документы хранятся у разработчиков и постоянно ими используются при развитии системы.

Документы, входящие в состав САПР, являются компонентами подсистем. Без этих документов система не может функционировать. Их применяют пользователи и обслуживающий персонал.

Эксплуатационные документы содержат правила обслуживания комплексов средств и компонентов при функционировании системы. Эти документы ориентированы на персонал, обслуживающий и поддерживающий в рабочем состоянии комплекс средств автоматизации проектирования в проектной организации.

Для выбора состава и формирования содержания документов использован методический прием, основанный на получении пространства результатов выполняемых в процессе создания САПР работ. Типовую модель процесса создания САПР на уровне работ заменяют множеством поэтапных результатов выполнения этих работ. Затем определяют состав и наименование документов по стадиям. При определении наименований документов анализируют документы других автоматизированных систем, а также ЕСПД и ЕСКД. Этим обеспечивают преемственность наименования документов. Типовой состав документов, необходимых для успешного выполнения работ на каждой стадии проектирования с помощью прикладных САПР, регламентирован действующей нормативно-технической документацией.

Технико-экономические показатели САПР

характеризуют их работоспособность, качество, надежность, экономичность. Для оценки прикладных САПР целесообразно применять перечисленные ниже показатели.

Функциональные показатели характеризуют качество системы с позиции объекта проектирования: назначение САПР (характер проектируемого объекта); комплексность автоматизации проектирования (какие этапы проектных работ автоматизированы); уровень автоматизации (доля автоматически выполняемых проектных процедур); номенклатуры задач (поименный перечень автоматизированных задач); качество проектного решения (насколько получаемое проектное решение удовлетворяет требованиям потребителя); уровень апробации (опытная или промышленная эксплуатация).

Технические показатели характеризуют внутреннюю организацию САПР, обеспечивающую возможность развития и совершенствования: уровень унификации компонентов САПР (доля унифицированных и стандартных компонентов в общем количестве компонентов САПР); модульность построения (эффективность разбиения системы на элементарные структурные единицы); открытость (возможность дополнения системы новыми компонентами); гибкость (возможность изменения структурного построения при сохранении состава компонентов); производительность (число проектных решений в единицу времени).

Показатели качества программной реализации характеризуют технические средства автоматизации САПР: объем оперативной памяти; объем внешней памяти; время реализации решения системой; программное выявление ошибок (автоматизация процесса выявления ошибок функционирования).

Эксплуатационные показатели характеризуют качество САПР с позиции пользователей, удобство системы в эксплуатации: время освоения САПР; способы взаимосвязи пользователя с системой (диалоговый или пакетный режим); удобство корректирования результатов проектирования; трудоемкость сопровождения САПР.

Показатели надежности характеризуют сохранение работоспособности системы в течение периода ее эксплуатации. Основными показателями являются вероятность получения корректного решения (при соблюдении всех заранее оговоренных ограничений) за установленный период времени (желательно иметь не ниже 0,99) и коэффициент технического использования.

Недостатки, которые характерны в наибольшей степени для прикладных САПР, заключаются в относительно большом времени реализации решения (особенно при выполнении

работ по графическому отображению образов, полученных в результате проектирования), в полном или частичном отсутствии возможности диалога с ЭВМ, в отсутствии четкого разграничения этапов проектирования (техническое предложение, сборочный чертеж, подборка, детализация, элементы деталей). Они значительно увеличивают время проектирования, особенно при возврате к началу проекта в случае получения отрицательного ответа.

Экономические показатели характеризуют экономическую эффективность применяемой САПР. Основным критерием эффективности системы является автоматизированный сквозной процесс проектирования, технологической подготовки производства, управления и изготовления новой модели станка, что значительно снижает трудоемкость этих работ. Факторы, обуславливающие экономическую эффективность системы, проявляются в разных сферах.

В процессе проектирования и подготовки производства к выпуску новых моделей станков применение САПР позволяет следующее: обеспечивать рост производительности труда конструкторов и технологов; повышать творческое начало в работе специалистов благодаря автоматизации нетворческой части работы; автоматизировать выполнение чертежно-графических работ и формирование текстовой документации; автоматизировать процессы поиска, обработки и выдачи информации; повышать качество проектирования изделий, выпускаемой документации, технологических процессов их изготовления; оптимизировать проектные и технологические решения на основе применения математических методов; унифицировать и стандартизировать методы проектирования; увеличивать коэффициенты унификации и стандартизации проектируемых станков; интегрировать процессы проектирования и изготовления новой продукции; сокращать сроки проектирования и подготовки производства.

Благодаря применению САПР в процессе изготовления новых моделей станков становится возможным сократить сроки их изготовления, уменьшить затраты на изготовление, автоматизировать подготовку и контроль управляющих программ для оборудования с ЧПУ, сэкономить производственные ресурсы при изготовлении новых моделей (живой труд, сырье и материалы, топливо, энергию, капитальные вложения и производственные фонды).

В процессе эксплуатации новых моделей станков сокращается период их освоения благодаря наличию полного комплекта и повышенного качества эксплуатационной документации, обеспечивается технологичность, высокие эксплуатационные качества и надежность новых моделей, сокращаются затраты на их эксплуатацию.

Расчет основных показателей экономической эффективности прикладных САПР станков проводят в соответствии с действующей «Отраслевой методикой расчета эффективности САПР».

Годовой экономический эффект \mathcal{E}_r (тыс. руб.), достигаемый в результате создания и использования САПР, определяют по формуле

$$\mathcal{E}_r = \Delta C + \mathcal{E}_x + \mathcal{E}_y - (\Delta K + K_{e2})E_n, \quad (5.4)$$

где ΔC — снижение себестоимости проектирования в расчетном году, тыс. руб. (за расчетный год принимается первый год, следующий за годом ввода САПР в эксплуатацию — первый год промышленной эксплуатации); \mathcal{E}_x — годовая экономия вследствие повышения технического уровня и качества новой продукции, тыс. руб.; \mathcal{E}_y — прирост годового экономического эффекта за счет сокращения сроков проектирования и подготовки производства новой продукции, тыс. руб.; ΔK — капитальные затраты на средства вычислительной техники, необходимые для эксплуатации САПР в расчетном году, тыс. руб.; K_{e2} — предпроизводственные затраты на создание, разработку и внедрение САПР, тыс. руб.; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений 0,15.

Снижение себестоимости проектирования в расчетном году ΔC определяют по формуле $\Delta C = (C_1 - C_2)A$, где C_1, C_2 — себестоимость разработки одного проекта соответственно неавтоматизированным способом и с помощью САПР, тыс. руб.; A — число разрабатываемых проектов с использованием САПР в расчетном году.

Себестоимость C_1 разработки одного проекта неавтоматизированным способом состоит из следующих составляющих:

фонда заработной платы всех лиц, участвующих в решении задачи, за время выполнения всего комплекса процедур, связанного с данной задачей;

отчислений на социальное страхование — 14 % фонда заработной платы.

Себестоимость C_2 разработки проекта с помощью САПР включает:

фонд заработной платы всех лиц, участвующих в автоматизированном решении задачи за время выполнения всего комплекса процедур, связанного с данной задачей;

отчисления на социальное страхование — 14 % фонда заработной платы;

затраты на эксплуатацию вычислительной техники за время выполнения всего комплекса процедур, связанного с данной задачей.

Расчетный коэффициент экономической эффективности САПР определяется по формуле

$$E_p = \Delta C + \mathcal{E}_x + \mathcal{E}_y / (\Delta K + K_{e2}). \quad (5.5)$$

Значение E_p по данной САПР сопоставляют с нормативным коэффициентом эффективности мероприятий по вычислительной технике, равным для станкостроительной промышленности 0,42. Создаваемая САПР считается эффективной, если $E_p > 0,42$.

Срок окупаемости затрат на САПР определяют по формуле $T_{ок} = 1/E_p$. Срок окупаемости затрат на САПР не должен превышать 2,4 года.

5.3. Математическое моделирование станочных узлов и систем

Математические модели станочных узлов. Математическая модель станочного узла — это совокупность математических объектов (чисел, переменных, матриц, множеств, пространств и т. д.), находящихся в некоторой связи (уравнения, неравенства, преобразования и т. п.) и описывающих процессы функционирования и структуру станочного узла.

В процессе разработки математических моделей нужно учитывать следующие основные требования: адекватность, универсальность, эффективность.

Адекватность означает описание процесса функционирования объекта проектирования с достаточной точностью и обеспечение соответствия выбранных параметров математической модели проектной задачи, правильность выбора варьируемых параметров и ограничений на них, а также функций качества.

Универсальность обеспечивает возможность многократного использования математической модели для анализа или синтеза некоторой группы объектов проектирования.

Эффективность математической модели требует выбора методов варьирования ее параметров, а также других составляющих математической модели, которые позволяют получить проектное решение при минимальной сложности модели.

Адекватность, универсальность и эффективность являются противоречивыми требованиями. Так, например, чем точнее и универсальнее модель, тем она сложнее. Предпочтение тем или иным требованиям при решении задачи компромисса между ними в основном зависит от особенностей конкретной проектной задачи и средств для ее выполнения.

Моделируемый станочный узел определяет тип физических процессов, которые необходимо исследовать, и соответствующие этим процессам математические модели. Так, при анализе узлов несущей системы станка используются механические модели: тепловые, вибрационные и изнашивания. Модели анализа системы ЧПУ станка могут быть электрическими

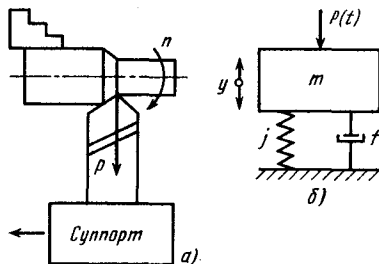


Рис. 5.9. Суппорт токарного станка (а) и его одно-массовая динамическая модель (б)

или электронными. В свою очередь, как электрические, так и механические модели станочных узлов могут быть разделены по скорости протекания физических процессов: модели процессов малой, средней и большой скорости [13].

Цель анализа станочного узла определяет тип критериев и соответствующие модели: точности и производительности, надежности и эргономики.

Адекватность уравнений математической модели станочного узла его физической модели в большой степени определяется типом переменных, операциями над ними и характером изменения коэффициентов при этих переменных. Математические модели в зависимости от типов переменных: дискретные и непрерывные, детерминированные и стохастические. Тип операций определяет модели: алгебраические и логические, разностные и дифференциально-разностные, дифференциальные и интегральные, с сосредоточенными параметрами и с распределенными параметрами (обыкновенные дифференциальные уравнения и дифференциальные уравнения в частных производных). В зависимости от коэффициентов уравнений различают: линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные модели.

В качестве примера математической модели станочного узла рассмотрим динамическую модель суппорта токарного станка (рис. 5.9, а). Ее можно представить в виде одномассовой динамической модели (рис. 5.9, б). Уравнение деформирования суппорта по оси y имеет вид

$$m (d^2y/dt^2) + j (dy/dt) + jy = P(t), \quad (5.6)$$

где m — масса суппорта; j — коэффициент демпфирования; j — жесткость суппорта; $P(t)$ — сила резания.

Если рассматривать станок в целом, получаем многомассовую динамическую модель [16], которая описывается векторным уравнением $M\ddot{z} + F\dot{z} + Jz = P$, где M — матрица масс; z — вектор перемещений; F — матрица демпфирования; J — матрица жесткости; P — вектор нагрузок.

В уравнении (5.6) сила резания $P(t)$ может быть непрерывной или дискретной функцией времени (непрерывная или дискретная модель). Кроме того, она может включать случайную составляющую (стохастическая модель). Коэффициенты j и f либо постоянные, либо зависят от y (линейная или нелинейная модель); $f = \text{const}$ или зависит от времени (стационарная и нестационарная модель). При отсутствии производных от деформации уравнение (5.6) из дифференциального преобразуется в алгебраическое.

Модели с распределенными параметрами (уравнения в частных производных) обычно используют при расчете тепловых деформаций станочных конструкций (шпиндельные узлы, корпусные детали).

Математическое обеспечение автоматизированных расчетов. При автоматизации инженерных расчетов станочных узлов используют численные методы аппроксимации специальных функций, интерполяции табличных функций, дифференцирования и интегрирования, решения алгебраических и трансцендентных уравнений и т. д.

Методы аппроксимации включают методы задания специальных и стандартных функций, а также методы задания табличных функций.

Специальные и стандартные функции представляют в ЦВМ путем их разложения в ряд Тейлора. Функция $f(x)$ в окрестности точки x_1 может быть представлена следующим образом:

$$f(x) = f(x_1) + \frac{x - x_1}{1!} f'(x_1) + \frac{(x - x_1)^2}{2!} \times \\ \times f''(x_1) + \dots + \frac{(x - x_1)^n}{n!} f^{(n)}(x_1) + \\ + \dots = f(x_1) + \sum_{i=1}^m \frac{(x - x_1)^i}{i!} f^{(i)}(x_1). \quad (5.7)$$

Например, для экспоненциальной функции, которая используется при учете запаздывания в передаточной функции процесса резания, при $x_1 = 0$ получаем следующий степенной ряд:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} \dots$$

Прямая реализация этого ряда невозможна, так как при возведении в степень больших и малых значений аргумента могут быть получены числа, не реализуемые в ЭВМ. Программы в таких случаях строят с помощью последовательного наращивания суммы ряда.

Алгоритм вычисления экспоненциальной функции для заданного x построен по этому принципу (рис. 5.10). В программе вычисляют-

ся последовательно каждый член ряда T_{i+1} через его предыдущее значение T_i по рекуррентному соотношению $T_{i+1} = T_i x / D_i$ (где $i = 0, 1, \dots, n$; $T_0 = 1$; $D_0 = 1$; $D_{i+1} = D_i + 1$). К значению EXP (текущее значение экспоненциальной функции), полученному на предыдущем шаге, каждый раз добавляется значение следующего члена ряда. Вычисление прекращается, как только последующий член ряда станет меньше заданного ϵ .

Иногда при вычислениях используются непрерывные функции, заданные в виде таблиц, например полученных в результате экспериментальных исследований станков и станочных систем, в которых значениям аргумента $x = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_n)$ соответствуют значения функции $f(x)$: $f(x_0), f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$.

Интерполяция табличных функций. Для того чтобы в ходе выполнения программы могли вычисляться значения функции в точках, промежуточных по отношению к точкам (x_0, x_1, \dots, x_n) , производится интерполяция табличной функции.

Линейно-кусочная интерполяция. Наиболее простой является линейно-кусочная интерполяция, когда на участках между узлами интерполяции (x_0, x_1, \dots, x_n) функция заменяется линейными отрезками. Для вычисления $f(x_c)$ — значения функции в точке $x_c (x_i \leq x_c \leq x_{i+1})$ используется следующая рекуррентная формула:

$$f(x_c) = f(x_i) + \frac{[f(x_{i+1}) - f(x_i)](x_c - x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (5.8)$$

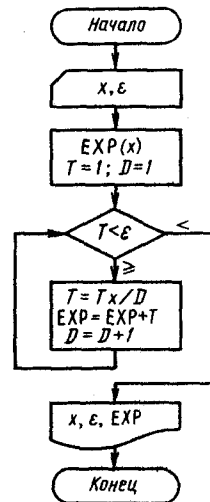


Рис. 5.10. Схема алгоритма для вычисления значений экспоненциальной функции

Алгоритм линейно-кусочной интерполяции включает процедуру перебора и сравнения значений табличных аргументов и значения x_c . Как только табличное значение аргумента становится большим x_c , это означает, что найден соответствующий отрезок интерполяции, на котором лежит x_c .

Более точной является параболическая интерполяция, при которой табличная функция заменяется многочленом $\varphi(x)$. Степень интерполяционного многочлена не выше n , где n — число узлов интерполяции. Значения интерполяционного многочлена $\varphi(x)$ в узлах интерполяции совпадают с табличными значениями функции $f(x)$.

Интерполяционный многочлен Ньютона. Используют различные виды интерполяционных многочленов: Лагранжа, Гаусса, Эрмита, Стирлинга и др. Наиболее удобен для реализации на ЭВМ интерполяционный многочлен Ньютона:

$$\varphi(x) = f(x_0) + \sum_{k=1}^n (x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{k-1}) y(x_0, x_1, \dots, x_k), \quad (5.9)$$

где $y(x_0, x_1, \dots, x_k)$ — разделенные разности.

Формулы для вычисления разделенных разностей следующие:

$$y(x_i, x_k) = \frac{f(x_i) - f(x_k)}{x_i - x_k};$$

$$y(x_i, x_j, x_k) = \frac{y(x_i, x_j) - y(x_j, x_k)}{x_i - x_k};$$

$$\dots$$

$$y(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n}) = \frac{y(x_i, \dots, x_{i+n-1}) - y(x_{i+1}, \dots, x_{i+n})}{x_i - x_{i+n}} \dots$$

Численное дифференцирование применяют в том случае, когда функция задана таблично или когда выражение для производной имеет сложный вид (например, при оптимизации станочных узлов градиентными методами).

С помощью интерполяционного многочлена Ньютона (5.9) задача численного дифференцирования сводится к вычислению разделенных разностей (введем обозначение $\xi_i = x - x_i$):

$$f_k^{(k)} = k! [y(x_0, x_1, \dots, x_k) + \left(\sum_{i=0}^k \xi_i \right) y(x_0, x_1, \dots, x_{k+1}) + \left(\sum_{i=k+1}^{\infty} \xi_i \xi_j \right) y(x_0, x_1, \dots, x_{k+2}) + \dots]$$

Используя лишь несколько первых членов, получим приближенное выражение для каждой производной $f_k^{(k)}$.

Методы решения линейных и нелинейных алгебраических уравнений. При расчете точности металлорежущих станков широко используют системы линейных и нелинейных алгебраических уравнений [3, 16].

Методы решения линейных систем уравнения делят на прямые и итерационные. Прямые методы позволяют за конечное число операций получить точное решение. Итерационные методы предполагают получение решения с заданной точностью за несколько циклов. Итерационные методы эффективно использовать для систем большого порядка с разреженными матрицами.

Метод Гаусса. Одним из прямых методов является метод исключения Гаусса, который достаточно просто реализуется на ЭВМ. Метод заключается в приведении матрицы системы уравнений к треугольному виду. Затем система уравнений решается в обратной последовательности. Приведение к треугольному виду осуществляют с помощью эквивалентных преобразований, сложением строк матрицы, умноженных на соответствующие коэффициенты.

Точность вычисления неизвестных переменных методов Гаусса увеличивается выбором главного элемента (т. е. наибольшего в таблице) и перестановкой его на главную диагональ (за счет перестановок строк).

Ниже рассмотрены численные методы решения алгебраических и трансцендентных уравнений. Алгебраическое, или трансцендентное, уравнение имеет вид

$$f(x) = 0, \quad (5.10)$$

где $f(x)$ — непрерывная функция.

В результате решения определяют корни этого уравнения. Как правило, в конструкторских задачах имеют смысл только действительные корни, т. е. точки, где функция $f(x)$ пересекает ось абсцисс. Задача поиска корней уравнения (5.10) включает несколько этапов. Сначала определяют число корней и отрезки, где они расположены. Затем находят приближенные значения корней и производят их уточнение. Число действительных корней можно определить с помощью теоремы Штурма. Обычно строят график функции $f(x)$, с помощью которого можно найти области расположения корней. Исходя из конструктивных ограничений, почти всегда удается существенно сузить область поиска корней. Приближенные значения корней уточняют с помощью итерационных методов. Наиболее эффективными из них, с учетом реализации на ЭВМ, являются методы дихотомии, простой итерации и метод Ньютона (рис. 5.11). Для использования этих методов

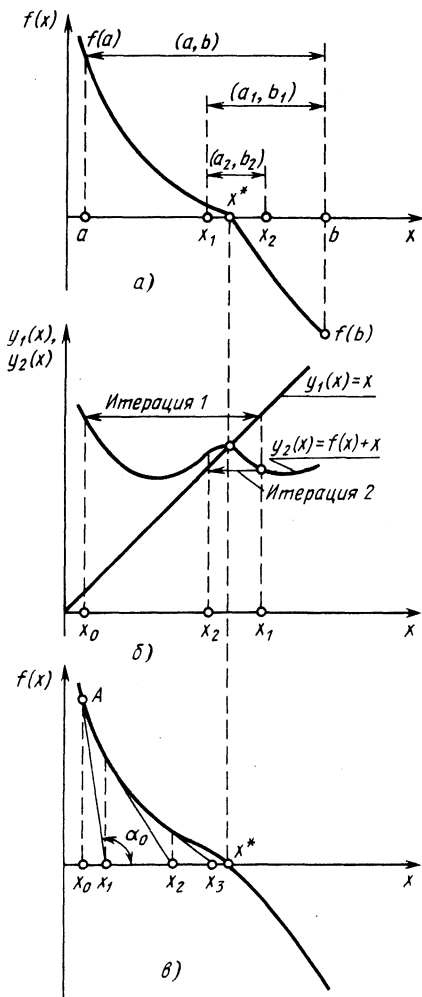


Рис. 5.11. Геометрическое представление методов дихотомии (а), простой итерации (б) и Ньютона (в)

необходимо знать интервал (a, b) , на котором находится интересующий нас корень.

Метод дихотомии, или половинного деления (рис. 5.11, а), обеспечивает поиск значения корня x^* с помощью последовательного деления пополам интервала неопределенности [интервал (a_i, b_i) , содержащий корень]. После этого полуинтервал, не содержащий корень, исключают, а оставшийся полуинтервал снова делят пополам, и так до тех пор, пока длина последнего полуинтервала не будет меньше погрешности вычисления корня. Критерием выбора полуинтервала является перемена знака функции $f(x)$ на его концах.

Метод половинного деления не применим для систем алгебраических уравнений, имеет наименьшую скорость сходимости к точному

решению. С другой стороны, он абсолютно устойчив и прост в реализации на ЭВМ.

Метод простой итерации. На основе метода простой итерации (рис. 5.11, б) ищут решение уравнения (5.10) в виде координаты точки пересечения линейной функции $y_1(x)=x$ и вспомогательной функции $y_2(x)=f(x)+x$.

В данном случае $y_2(x)$ получают добавлением x к левой и правой частям уравнения (5.10): $x+f(x)=x$ или $y_2(x)=y_1(x)$.

Итерацию строят на основе нулевого приближения (на рис. 5.11, б $x_0=a$). Тогда

$$x_1=y_2(x_0);$$

$$x_2=y_2(x_1);$$

$$\dots$$

$$x_n=y_2(x_{n-1}).$$

Таким образом получают в результате первой итерации значение x_1 , подставив его в функцию $y_2(x)$, в результате второй итерации получают приближенное значение корня в виде x_2 и т. д. На рис. 5.11, б видно, как после очередной итерации уточняют значение корня по отношению к его точному значению x^* .

Метод алгоритмически устойчив, если на отрезке (x_0, x_1) , $|y_2'(x)| < 1$. Чем меньше $y_2'(x)$, тем быстрее итерации сходятся к x^* . Метод простой итерации можно использовать и для системы алгебраических уравнений. Основным недостатком метода является необходимость выбора вида функции $y_2(x)$ из условия сходимости метода. В данном примере функция $y_2(x)$ формируется за счет добавления к исходному уравнению линейной функции.

Метод Ньютона, или метод касательных, использует следующую итерационную формулу:

$$x_n = x_{n-1} - f(x_{n-1})/f'(x_{n-1}). \quad (5.11)$$

Например, для первой итерации при $x_0=a$

$$x_1 = x_0 - f(x_0)/f'(x_0).$$

Геометрическую интерпретацию для первой итерации можно получить, пользуясь рис. 5.11, в. Для треугольника Ax_0x_1 величина x_1-x_0 равна высоте треугольника $f(x_0)$, деленной на $\operatorname{tg}\alpha_0$. Тогда $x_1 = x_0 - f(x_0)/\operatorname{tg}\alpha_0$, где $\operatorname{tg}\alpha_0 = f'(x_0) < 0$.

Сходимость по методу Ньютона при $f(x_0) \times f''(x_0) > 0$, $f'(x_0) \neq 0$, иначе она наблюдается лишь в некоторой малой окрестности корня. При реализации на ЭВМ часто используют модифицированный метод Ньютона, при котором производная в знаменателе вычисляется всего один раз, тогда формула (5.11) примет вид

$$x_n = x_{n-1} - f(x_{n-1})/f'(x_0).$$

Метод Ньютона, так же как и метод простой итерации, применяют для решения системы алгебраических уравнений. Примером использования методов решения алгебраических уравне-

ний может служить определение реакций опор при расчете многопролетных балок с учетом нелинейной жесткости опор [13].

Моделирование динамических процессов в станках. Целью анализа (моделирования) процессов динамики станочных узлов является оценка их устойчивости и качества. Для оценки параметров устойчивости и качества по временным характеристикам решают уравнения, описывающие процессы динамики узлов. Для иллюстрации алгоритмов численных методов решения дифференциальных уравнений используем обыкновенное дифференциальное уравнение первой степени в форме Коши:

$$y' = f(t, y), \quad (5.12)$$

где t — время.

Решение уравнения (5.12) раскладывается на n -м отрезке интегрирования (t_n, t_{n+1}) в ряд Тейлора по степеням h (шаг интегрирования, $h = t_{n+1} - t_n$):

$$y_{n+1} = y_n + hy_n' + \frac{1}{2!} h^2 y_n'' + \frac{1}{3!} h^3 y_n''' + \frac{1}{4!} h^4 y_n^{IV} + \dots, \quad (5.13)$$

где $y_{n+1} = y(t_n + h)$; $y_n = y(t_n)$; $y_n^k = y^{(k)}(t_n)$.

Метод Эйлера. Если в разложении используется только первая производная, то получаем алгоритм расчета интегральной кривой по методу Эйлера: $y_{n+1} = y_n + hy_n'$.

Суть этого метода заключается в том, что интервал интегрирования дифференциального уравнения разбивают на k равных участков. На каждом таком участке интегральную кривую (решение) заменяют отрезком, параллельным касательной, которая построена в начале участка интегрирования (рис. 5.12, а), где через $y(t)$ обозначено точное решение дифференциального уравнения.

Так как тангенс угла наклона соответствующей касательной равен производной, то на n -м участке $y'(t_n) = \operatorname{tg} \alpha_n = f(t_n, y_n)$.

Рассмотрим преобразования уравнения (5.6) для решения методом Эйлера. Приведем его

к канонической форме (форме Коши) с помощью новой переменной

$$z = \frac{dy}{dt} :$$

$$\frac{dy}{dt} = z;$$

$$\frac{dz}{dt} = [(1/m)P(t)] - (f/m)z - (j/m)y = f(P(t), z, y).$$

Перейдем в данной системе уравнений от дифференциалов к приращениям, тогда получим на n -м шаге выражения для приращений по переменным, через их значения на предыдущем шаге ($\Delta t = h$):

$$\Delta y_n = h z_{n-1};$$

$$\Delta z_n = h f(P(t_{n-1}), z_{n-1}, y_{n-1}).$$

Длина отрезка интегральной кривой на n -м шаге рассчитывается с учетом значений переменных в конце предыдущего шага интегрирования: $y(t_{n+1}) = y_{n+1} = y_n + \Delta y_n$; $z(t_{n+1}) = z_{n+1} = z_n + \Delta z_n$.

Модифицированный и исправленный методы Эйлера. Формула (5.13), в которой, кроме первой, используется вторая производная y_n'' , имеет следующий вид: $y_{n+1} = y_n + h[\beta f(x_n, y_n) + \alpha f(x_n + \gamma h, y_n + \delta h)]$, где $\beta, \alpha, \gamma, \delta$ — коэффициенты.

Из условия максимальной точности воспроизведения решения можно получить следующие соотношения: $\alpha + \beta = 1$; $\gamma \alpha = 1/2$; $\alpha \delta = (1/2)f(t_n, y_n)$.

Задаваясь значением одного из параметров, например α , получим несколько формул численного интегрирования. Так, при $\alpha = 1$ и $f_n = f(t_n, y_n)$

$$y_{n+1} = y_n + (h/2)[f(t_n + (1/2)h, y_n + (1/2)hf(t_n, y_n))]. \quad (5.14)$$

При $\alpha = 1/2$

$$y_{n+1} = y_n + (h/2)[f(t_n, y_n) + f(t_n + h, y_n + hf_n)]. \quad (5.15)$$

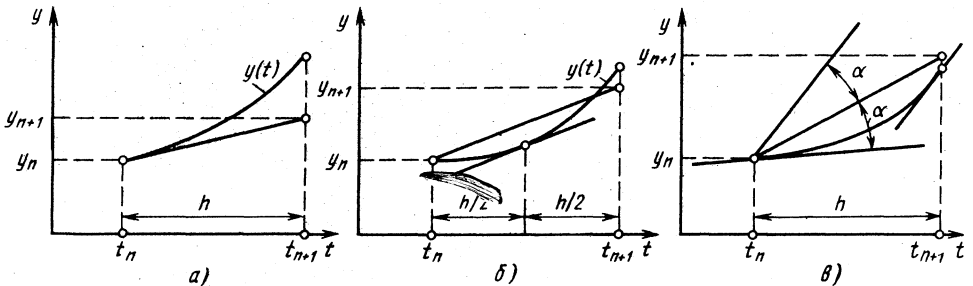


Рис. 5.12. Геометрическое представление формул интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений

Метод интегрирования дифференциальных уравнений по формуле (5.14) называют модифицированным методом Эйлера, метод, использующий формулу (5.15), — исправленным методом Эйлера. Процедура модифицированного метода Эйлера (рис. 5.12, б) строится на основе вычисления касательной и интегральной кривой в средней точке отрезка интегрирования. Значение y_{n+1} получается на конце отрезка прямой, параллельной этой касательной и проведенной через точку с координатами t_n, y_n . Тангенс угла наклона касательной равняется производной в точке с координатами $[t_n + (1/2)h, y_n + (1/2)hf_n]$. Для исправленного метода Эйлера (рис. 5.12, в) точка y_{n+1} лежит на биссектрисе угла, образованного касательными к интегральной кривой в начале и конце отрезка интегрирования.

Методы Рунге — Кутты. Группа методов, формулы численного интегрирования для которых формируются на основе уравнения (5.13), получила название методов Рунге — Кутты. Максимальная степень производной k , используемая в формуле интегрирования, определяет и погрешность решения дифференциального уравнения, которая является некоторой малой величиной от h^k . Таким образом число k называют порядком точности соответствующего метода Рунге — Кутты. Метод Эйлера является методом Рунге — Кутты первого порядка точности, модифицированный и исправленный методы Эйлера являются методами Рунге — Кутты второго порядка точности. Применяют методы Рунге — Кутты и более высокого порядка точности. Из них наиболее широкое распространение получил метод четвертого порядка точности [формула интегрирования включает четыре члена уравнения (5.13)]: $y_{n+1} = y_n + (h/6)(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)$, где $K_1 = f(t_n, y_n)$; $K_2 = f(t_n + h/2, y_n + (h/2)K_1)$; $K_3 = f(t_n + h/2, y_n + (h/2)K_2)$; $K_4 = f(t_n + h, y_n + hK_3)$.

В методах Рунге — Кутты не используется информация о предыдущих точках, что является их недостатком. Группа методов, в которых каждая последующая точка вычисляется на основе данных по крайней мере о двух предыдущих точках, получила название методов прогноза и коррекции [3].

Модели расчета температурных деформаций и тепловых полей станочных деталей и узлов (см. гл. 7) описываются уравнениями в частных производных. Например, уравнение теплопроводности для распределения температуры T по длине шпинделя имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - m^2 T = \alpha \frac{\partial T}{\partial t};$$

$$T(x, 0) = \varphi(t); \quad (5.16)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \psi(t); \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = \theta(t).$$

Здесь x — текущая координата; $\varphi(t)$, $\psi(t)$ и $\theta(t)$ — заданные функции времени, $m^2 = 4\alpha/(\lambda d)$, где α — коэффициент теплоотдачи; λ — теплопроводность; d — диаметр теплового цилиндра шпинделя; l — длина шпинделя.

Решение дифференциальных уравнений в частных производных проводится разностными методами и методом конечных элементов. Наиболее широко используемым разностным методом является метод сеток.

Метод сеток расчета температурного поля шпинделя по уравнению (5.16) заключается в построении сетки с шагом h по оси шпинделя x и с шагом Δ по времени t (рис. 5.13, а). Частная производная для (i, k) -го узла сетки, записанная через центральную разность второго порядка,

$$\frac{\partial^2 T_{i,k}}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{h^2}.$$

Производная температуры по времени заменяется конечной разностью первого порядка:

$$\frac{\partial T_{i,k}}{\partial t} = \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta}. \quad (5.17)$$

Таким образом, уравнение (5.16) заменяется разностным уравнением

$$\frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{h^2} - \alpha \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta} = m^2 T_{i,k}.$$

Обозначим $\gamma_1 = \Delta/(\alpha h^2)$, $\gamma_2 = 2\Delta - \alpha h^2/\Delta + h^2 m^2$. Тогда

$$T_{i,k+1} = \gamma_1(T_{i+1,k}) + T_{i-1,k} - \gamma_2 T_{i,k}. \quad (5.18)$$

Для уравнения (5.16), заданного в форме Коши, т. е. только с начальным условием $T(x, 0) = \varphi(x)$ при $t > 0$, $x > 0$, получим $T_{i,0} = \varphi(ih) = \varphi_i$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$.

Структурная схема процесса решения по уравнению (5.18) с начальными условиями $\varphi(x)$ показана на рис. 5.13, б. На схеме принято, что $\gamma = \gamma_1 \gamma_2$ и обозначены шаги (1, 2, 3, ..., 7) решения уравнения (5.16) с начальными условиями $T(x, 0)$. В скобках указаны результаты решения на каждом (i, k) -м шаге: $\langle T_{i,k} \rangle$. При обходе сетки последовательно находится температура в точках, симметричных точках с известной температурой относительно главной диагонали пространства сетки. Так,

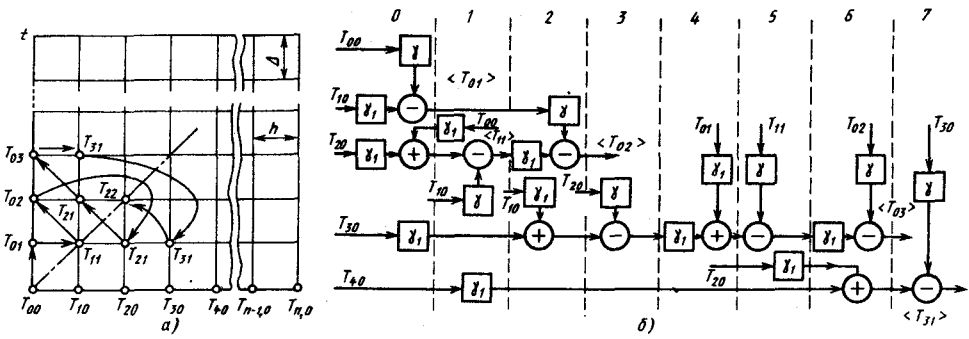


Рис. 5.13. Сетка узлов (а) и структурная схема (б) решения уравнения теплопроводности

первый шаг делают в узел с температурой T_{01} , симметричный узлу T_{10} с известной температурой. Далее определяют температуру узла по диагонали T_{11} . Затем находят температуру узла, симметричного узлу с температурой T_{20} , и т. д.

Задача будет решена, как только будут найдены температуры во всех узлах сетки. По направлениям, параллельным осям ординат, можно определить закон изменения температур во времени (с шагом Δ) в дискретных точках по оси шпинделя. В направлениях, параллельных осям абсцисс, получим температуры в дискретных точках по оси шпинделя (с шагом h) при постоянном времени.

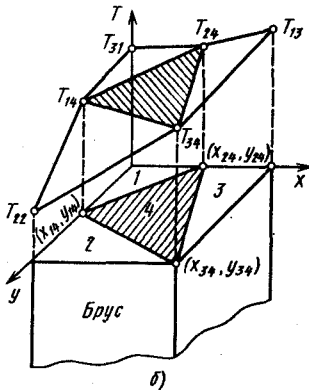
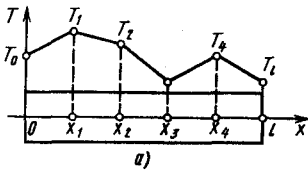


Рис. 5.14. Аппроксимация температурного поля бруса конечными элементами: а — отрезками прямых; б — треугольными элементами

Метод конечных элементов (МКЭ) основан на аппроксимации непрерывного решения кусочно-непрерывными функциями. Эти функции представляют собой полиномы, описывающие решение на некотором элементе, который называется конечным. В зависимости от вида полинома для заданного координатного пространства различают симплекс-, комплекс- и мультиплекс-элементы. Симплекс-элемент описывается линейной комбинацией переменных, обозначающих координатные оси. Число узлов в конечных элементах, которые описываются этими полиномами, равно размерности пространства плюс единица.

Полиномы комплекс-элементов содержат члены, являющиеся нелинейными зависимостями от переменных, и число узлов в этих элементах для одного и того же координатного пространства больше, чем в симплекс-элементах. Полиномы мультиплекс-элементов содержат также нелинейные зависимости. Кроме того, границы этих элементов параллельны координатным осям. Примерами мультиплекс-элементов являются прямоугольник для двумерного координатного пространства и параллелепипед для трехмерного пространства.

Построим для тепловой модели бруса полиномы симплекс-элементов. Так, для одномерной модели бруса, как наиболее общего элемента корпусных деталей станков (рис. 5.14, а), получим полином, описывающий отрезок прямой (линейно-кусочная аппроксимация): $T_i = \alpha_{1i} + \alpha_{2i}x$.

На каждом i -м участке бруса температура T_i будет меняться по линейному закону. Для двумерной тепловой модели бруса (рис. 5.14, б) аппроксимация выполняется с помощью треугольных элементов, которые также описываются полиномом первой степени $T_i = \alpha_{1i} + \alpha_{2i}x + \alpha_{3i}y$.

Аппроксимирующий многочлен трехмерной модели предполагает разбиение рассчитываемого

мого трехмерного объекта на тетраэдри: $T_i = \alpha_{1i} + \alpha_{2i}x + \alpha_{3i}y + \alpha_{4i}z$.

Коэффициенты α_{1i} , α_{2i} , α_{3i} , α_{4i} находятся по значениям температуры в каждом узле и по значениям координат узлов. Например, для задачи расчета температурного поля сечения бруса (температура по высоте бруса не меняется) коэффициенты двухмерной тепловой модели (рис. 5.14, б) находятся из системы трех уравнений:

$$\begin{aligned} T_{14} &= \alpha_1 + \alpha_2 x_{14} + \alpha_3 y_{14}; \\ T_{24} &= \alpha_1 + \alpha_2 x_{24} + \alpha_3 y_{24}; \\ T_{34} &= \alpha_1 + \alpha_2 x_{34} + \alpha_3 y_{34}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Решение системы уравнений (5.19) следующее:

$$\alpha_1 = (1/A_0)(T_{14}x_{24} - T_{24}x_{24})y_{34} - (T_{14}x_{34} - T_{24}x_{14})y_{24} + (T_{24}x_{34} - T_{34}x_{24})y_{34};$$

$$\alpha_2 = (1/A_0)(T_{24}y_{34} - T_{34}y_{24} - T_{14}y_{34} + y_{14}T_{34} + T_{14}y_{24} - T_{24}y_{14});$$

$$\alpha_3 = (1/A_0)(x_{24}T_{34} - x_{34}T_{24} - x_{14}T_{34} + x_{34}T_{14} + x_{14}T_{24} - x_{24}T_{14});$$

$$A_0 = x_{24}y_{34} - y_{24}x_{34} - x_{14}y_{34} + y_{14}x_{34} + x_{14}y_{24} - y_{14}x_{24}.$$

Составим алгоритм расчета температурного поля шпинделя по стационарной, одномерной модели (рис. 5.14, а). В этом случае уравнение теплопроводности шпинделя (5.16) примет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - m^2 T = \theta_0;$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \psi_0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = \theta_0; \quad (5.20)$$

$$\psi_0 = q_1/(F_1 \lambda); \quad \theta_0 = q_2/(F_1 \lambda).$$

Решение уравнения (5.20) сводится к решению системы уравнений относительно T_i , определяющих необходимые условия экстремума некоторого функционала $\Phi(h_i = x_i - x_{i-1})$:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T_0} = \left(\frac{m^2 h_1}{3} + \frac{1}{h_1} \right) (T_0 - T_1) - \psi_0 = 0;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T_1} = \left(\frac{m^2 h_1}{3} + \frac{1}{h_1} \right) (T_1 - T_0) +$$

$$+ \left(\frac{m^2 h_2}{3} + \frac{1}{h_2} \right) (T_1 - T_2) = 0;$$

$$\dots$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T_i} = \left(\frac{m^2 h_i}{3} + \frac{1}{h_i} \right) (T_i - T_{i-1}) +$$

$$+ \left(\frac{m^2 h_{i+1}}{3} + \frac{1}{h_{i+1}} \right) (T_i - T_{i+1}) = 0;$$

$$\dots$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T_{n-1}} = \left(\frac{m^2 h_{n-1}}{3} + \frac{1}{h_{n-1}} \right) (T_{n-1} - T_{n-2}) +$$

$$+ \left(\frac{m^2 h_n}{3} + \frac{1}{h_n} \right) (T_{n-1} - T_i) = 0;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T_i} = \left(\frac{m^2 h_n}{3} + \frac{1}{h_n} \right) (T_i - T_{n-1}) - \theta_0 = 0.$$

Статистическое моделирование. При моделировании процессов, параметры которых меняются случайно, используют метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Вероятностными характеристиками описывается большое число задач расчета надежности, производительности и точности станков, а также станочных систем [13].

Как и анализ чувствительности [3], статистические испытания входят в процедуру многовариантного анализа (см. рис. 5.6). Планирование и обработку результатов статистического моделирования выполняют с помощью тех же методов математической статистики, что и в случае физического эксперимента. Так, число шагов n , необходимых для расчета с помощью метода статистических испытаний заданной характеристики с вероятностью P и точностью Δ , определяют по формуле $n = \lg(1-P)/\lg(1-\Delta)$.

Суть метода статистических испытаний заключается в задании параметров аналитических моделей в соответствии с их вероятностными законами распределения. В результате таких испытаний получают статистические характеристики выходного параметра математической модели. Таким образом, естественная вероятностная природа параметров физического объекта заменяется искусственным (программным) представлением случайных параметров машинной модели.

Схема метода статистических испытаний включает: генератор случайных чисел x_R , распределенных по равномерному закону, формулу пересчета последовательности чисел x_R в последовательность чисел $x_F = F(x_R)$, характеризующихся законом распределения моделируемого параметра физического объекта и математическую модель объекта проектирования.

В качестве генератора x_R можно использовать таблицу случайных чисел или датчик случайных чисел, который представляет собой программу, реализующую соответствующий алгоритм вычисления x_R . Такие программы вырабатывают псевдослучайные числа. Например, датчиком случайных чисел x_i может служить следующий алгоритм:

$$x'_i = kx_{i-1};$$

$$x_i = x'_i - \text{int}x'_i; \quad i = 1, \dots, n.$$

Здесь $k=8M \pm 3$, где M — целое число; $\text{int}x'_i$ — целая часть числа x'_i ; x_0 — должно быть задано нечетным, его выбирают из таблицы случайных чисел x_{R_1} .

Случайное число x_R , которое вычисляется по рассмотренному выражению, находится в диапазоне 0...1. Если нужно перейти к случайной величине x , равномерно распределенной на отрезке (a, b) , необходимо использовать следующую формулу: $x = a + (b - a)x_R$.

Случайная величина x_N будет распределена по нормальному закону, если ($n \geq 6$):

$$x_N = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}}$$

где x_i — число, распределенное по равномерному закону. Случайная величина x_N получается нормированной: $x_N \sim N(0, 1)$, поэтому вычислять $x \sim N(\mu, \sigma)$ необходимо по формуле $x = \mu + \sigma x_N$.

Для случайной величины x_e , распределенной по экспоненциальному закону, формула $F(x_R)$ имеет вид $x_e = (-1/\lambda) \ln x_R$, где λ — интенсивность потока (для задач надежности станочного оборудования λ — интенсивность отказов).

Закон распределения Пуассона определяет вероятность того, что случайная величина x_p принимает значение n :

$$P_n = P(x_p = n) = \frac{a^n}{n!} e^{-a}; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Реализация случайных чисел x_p осуществляется в двух вариантах. Наиболее распространен вариант, использующий предельную теорему Пуассона. В этом случае сначала выбирают значение $n (P_n \leq 0, 1, \dots, 0, 2)$: $n = a/P_n$. Затем случайную величину x_R сравнивают с P_n . Если $x_R < P_n$, то значение x_p увеличивают на единицу. При $x_R \geq P_n$ x_p остается неизменной. После проведения испытаний полученное значение x_p используется в качестве числа, распределенного по закону Пуассона.

При имитационном моделировании станочных систем с учетом надежности инструмента используется распределение Вейбулла [8]:

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \frac{x^m}{\left[\frac{x_0}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \right]^m} \right\},$$

где $\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$ — гамма-функция; x_0 — математическое ожидание параметра x . Формула

для вычисления случайной величины x_p , распределенной по закону Вейбулла, имеет вид

$$x_p = \frac{x_0}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} m \sqrt{-\ln x_R}$$

Методами математического моделирования решаются задачи анализа качества и эффективности при автоматизированном проектировании станков и станочных систем. Это прежде всего задачи соответствия характеристик синтезированных вариантов конструкции заданным техническим требованиям. В некоторых случаях на основе моделирования на ЭВМ удается найти допустимые варианты станочных конструкций без использования процедуры синтеза. В основном с помощью моделирования станочных конструкций ограничивается область вариантов и намечаются пути совершенствования качества конструкций, например с использованием методов анализа чувствительности. В ряде случаев методы моделирования на ЭВМ являются единственно возможными методами выбора параметров и структуры станочных конструкций из-за отсутствия соответствующих методов их синтеза.

5.4. Структурный синтез станочных конструкций

Синтез станочных конструкций включает параметрический и структурный синтез (см. рис. 5.6). При структурном синтезе определяют принципиальную (функциональную) схему станочного узла и производят выбор его конструктивных элементов. Затем решают задачи параметрического синтеза: назначают технические требования к отдельному станочному узлу и определяют его параметры.

В некоторых случаях для обеспечения большей эффективности проектирования удается реализовать процедуру структурно-параметрического синтеза конструкции. Процедура структурно-параметрического синтеза может быть использована и при решении задачи двухуровневой оптимизации станочных узлов, когда их параметры и структуру определяют в составе компоновки станка, т. е. с учетом обеспечения качества станка в целом при оптимальном соотношении качества отдельных узлов.

При синтезе шпиндельных узлов структурными переменными являются схема шпиндельного узла (двух- или трехопорный шпиндель), тип опор (качения, гидростатические, аэростатические или гидродинамические), число подшипников в каждой опоре, тип привода (разгруженный или неразгруженный, ременный или зубчатый), его расположение (между опо-

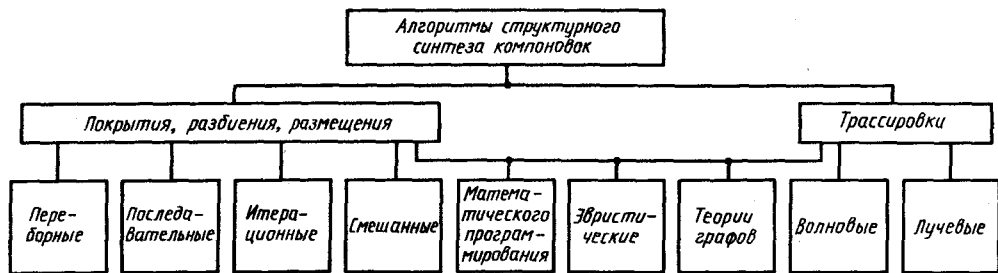


Рис. 5.15. Классификация алгоритмов структурного синтеза конструкций

рами или на консоли). Параметрические переменные шпиндельного узла следующие: диаметры шпинделя и отверстия в шпинделе, жесткости опор, межопорное расстояние, координата установки приводного элемента (зубчатого колеса).

Структурные переменные корпусных деталей следующие: параметры формы, тип и число ребер, перегородок и других элементов, повышающих жесткость конструкции. К параметрическим переменным корпусных деталей относятся параметры сечения детали (толщина, ширина, высота), параметры ребер (толщина и высота), толщина перегородок.

Остальные механические узлы и детали станков имеют структурные и параметрические переменные, которые определяются их конструктивной схемой. Критерии оптимизации те же, что и в модели анализа, т. е. критерии точности, производительности, надежности, эффективности и эргономики.

Наиболее ответственной процедурой при разработке конструкций является процедура структурного синтеза при внутреннем проектировании. Результат этой процедуры — разработка или выбор конструктивных элементов узла, их размещение и стыковка.

Задачи внешнего синтеза следует решать одинаково для верхних уровней иерархии объекта проектирования и для функционального проектирования. Задачи поиска новых технических решений не имеют пока эффективных алгоритмов, но с развитием машинного интеллекта эта проблема будет менее острой. Таким образом, в дальнейшем будем рассматривать алгоритмы для задач покрытия, разбиения, размещения и трассировки как основные алгоритмы структурного синтеза конструкций. Классификация этих алгоритмов приведена на рис. 5.15.

Алгоритмы математического программирования, теории графов и эвристические используются для всех задач структурного синтеза компоновок. Алгоритмы, разработанные на базе методов математического программирования, применяют для задач небольшой размер-

ности (число элементов $n = 15 \dots 20$), в противном случае их реализация требует больших затрат машинного времени. Наиболее часто используется метод ветвей и границ. В работе [26] этим методом решена задача размещения технологического оборудования гибкой производственной системы (ГПС). Модель построена с помощью теории графов. Составляют матрицу расстояний и матрицу интенсивностей передачи заготовок между различными единицами оборудования. В качестве целевой функции был принят минимум суммарной длины путей, пройденный заготовкой в процессе обработки.

Иногда используют метод динамического программирования. На рис. 5.16[3] показана сетевая модель вариантов гидросистемы копировально-фрезерного станка. Гидросистема включает насосную установку $HУ$, гидрораспределитель Z_1 для переключения с режима копирования на гидрораспределитель Z_2 ручного управления, копировальный золотник $KЗ$, силовые цилиндры для перемещения стола по координатам x и y ($СЦ_1$, $СЦ_2$). На ребрах модели указаны длины трубопроводов, соединяющих элементы гидросистемы. Число кружков на каждом уровне определяет число вариантов размещения соответствующего элемента гидросистемы. Стрелками на модели показан кратчайший путь, соответствующий оптимальной компоновке гидросистемы. В результате решения задачи трассировки станочной гидросистемы методом динамического программирования была найдена оптимальная длина трубопроводов — 5,9 м (максимальная длина 7,6 м).

В работе [15] описан метод выбора оптимальной последовательности размещения инструментов в магазинах многоцелевых станков. Метод базируется на теории графов и сводится к задаче представления Эйлера графа в виде системы контуров. При удалении некоторого числа дуг граф не будет иметь контуров. Полученный в виде цепи граф и определяет последовательность расположения инструментов, которые задают в виде вершин этой цепи, с помощью сортировки находят цепь с оптимальным размещением инструмента в магазине.

Другими алгоритмами задач покрытия, разбиения и размещения являются комбинаторные алгоритмы (переборные, последовательные, итерационные и смешанные). Типичной задачей, которая решается *переборным алгоритмом*, является задача подбора сменных колес двухпарной гитары кинематической цепи металло-режущего станка. Необходимо обеспечить заданное передаточное отношение i гитары с точностью Δi :

$$i_0 - \Delta i \leq i \leq i_0 + \Delta i.$$

Алгоритм содержит четыре вложенных цикла по числу зубьев колес z_1, z_2, z_3, z_4 , составляющих гитару

$$\left(i = \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} \right), \text{ с учетом комплекта сменных колес. Как только передаточное отношение удовлетворит заданному условию по точности, перебор заканчивают.}$$

В большинстве случаев, если имеется оптимальный вариант конструкции, требуется полный перебор, а число рассматриваемых вариантов может оказаться экспоненциальной функцией размерности задач (n — число элементов) $L = \gamma e^n$, где γ — коэффициент пропорциональности. Поэтому для решения задач покрытия, разбиения и размещения используют приближенные алгоритмы (последовательные, основанные на последовательном наращивании синтезируемой структуры, итерационные, относящиеся к алгоритмам частного перебора, и смешанные). В случае использования *последовательных алгоритмов* на каждом этапе выполнения алгоритма в очередной узел конструкции добавляют один из элементов функциональной схемы. От первого узла конструкции с помощью алгоритма осуществляется переход ко второму узлу и т. д. Главным достоинством последовательных алгоритмов являются их малая трудоемкость и простота реализации. Кроме того, они позволяют легко учесть ограничения. Основной недостаток последовательных алгоритмов — локальный пошаговый характер оптимизации.

Итерационные алгоритмы аналогичны градиентным алгоритмам параметрической оптимизации в том смысле, что на каждой итерации происходит движение к экстремуму целевой функции. Приращения варьируемых переменных в данном случае соответствуют перестановки элементов (парные или групповые) между узлами. Итерационные алгоритмы обеспечивают получение решений, улучшающих характеристики базового варианта. Основной недостаток этих алгоритмов — большие затраты машинного времени.

Смешанные (параллельно-последовательные) алгоритмы являются более сложными алгоритмами, чем последовательные и итерационные.

В этих алгоритмах сначала выделяется начальное множество элементов. Далее эти элементы распределяют по узлам. Как и последовательные алгоритмы, их используют для формирования базового варианта конструкции. Если качественные показатели базового варианта не удовлетворяют поставленным требованиям, то базовый вариант оптимизируют с помощью итерационных алгоритмов.

В задачах трассировки из алгоритмов теории графов наиболее широко применяют *алгоритм Прима* (построение кратчайшего остовного графа) [11]. Так, например, задача построения раскатки многошпиндельной коробки агрегатного станка может быть сведена к задаче трассировки [25], и для ее решения может быть использован алгоритм Прима.

К задаче трассировки можно свести и задачу оптимизации переналадок ГПС. В работе [1] предложен эвристический алгоритм, минимизирующий суммарное время переналадок. Из каждой строки матрицы переналадок выбирают минимальное значение времени переналадки, соответствующее переходу от обработки деталей одной группы к обработке деталей другой группы. Последующий поиск минимального времени переналадки выполняют в строке матрицы, номер которой совпадает с номером столбца выбранного ранее значения времени переналадки. В этой строке не рассматривают запрещенные варианты (столбцы с номером предыдущей строки, соответствующие наладке уже изготовленных деталей). Таким образом, от строки к строке число возможных вариантов уменьшается. Процедура выбора минимального значения времени переналадки последовательно начинается с каждой из n строк матрицы, поэтому образуется n сумм времен. Такой прием позволяет учесть все возможные сочетания последовательностей переналадок. Предложенный алгоритм позволяет заменить анализ n_1 вариантов анализом n вариантов ($n < n_1$).

Алгоритмы, используемые для решения задач только трассировки, могут быть названы геометрическими (волновые, лучевые). Для реализации *волновых алгоритмов* площадь размещения элементов разбивают на прямоугольные площадки, исходя из допустимых размеров соединений или транспортных потоков. Решение задачи трассировки сводится к определению последовательности прохождения прямоугольных площадок. Волновой алгоритм включает в себя два этапа.

Этап 1 заключается в построении числовой волны (вычисление длины между элементами) от начальной точки трассы, которая находится в некоторой прямоугольной площадке. Как только числовая волна достигнет конечной точки трассы, процесс распространения числовой волны заканчивается. Каждой площадке при-

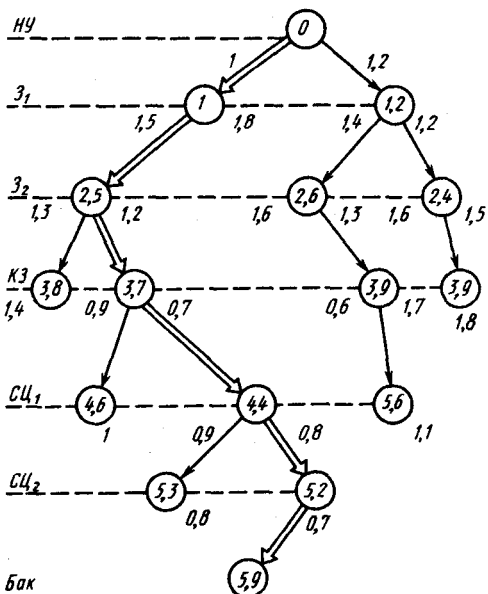


Рис. 5.16. Минимизация длины трубопроводов гидросистемы станка методом динамического программирования

объекта проектирования [24]. Причем вторую задачу решают после того, как решена первая.

Большинство задач параметрического синтеза представляет собой задачи оптимизации или задачи математического программирования. Общая формулировка задач математического программирования

$$F \rightarrow \text{extr } F(x), \quad (5.21)$$

$$x \in G$$

где $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ — вектор параметров объекта проектирования, $F(x)$ — целевая функция, G — область ограничений на параметры объекта проектирования.

Оптимизация производится в соответствии со схемой алгоритма, приведенной на рис. 5.5, где блок генерирования вариантов конструкции реализуется с помощью соответствующего метода оптимизации.

Для классификации задач и методов математического программирования обычно используют признаки составляющих математической модели оптимизации, описываемой соотношением (5.21): варьируемые параметры $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$; ограничения G ; целевую функцию $F(x)$. Разделение задач математического программирования по указанным критериям показано в табл. 5.1. В таблице наличие соответствующего признака обозначается единицей, а отсутствие (противоположное утверждение) — нулем. Так, если размерность задачи оптимизации $k=1$, то она называется *однопараметрической*, при $k=2$ — *двухпараметрической* и т. д. Задача, в которой целевая функция имеет несколько экстремумов (многоэкстремальная), ставит целью поиск глобального экстремума целевой функции. При отсутствии ограничений решается задача поиска безусловного экстремума. Целевая функция может включать несколько критериев качества (критерии точности, надежности, производительности, экономической эффективности и др.): $F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x))$.

В этом случае задача называется *многокритериальной* [17]. Дискретное программирование предполагает дискретное изменение с некоторым шагом варьируемых параметров. В задачах целочисленного программирования параметры x_1, x_2, \dots, x_k могут быть только целыми (например, x_i — число станков в автоматической линии). Задачи целочисленного программирования решаются с помощью методов полного перебора, ветвления, отсечений и т. д. Если x_i меняется непрерывно, а ограничения и целевая функция линейные, то решается *задача линейного программирования*.

Самый большой класс задач математического программирования образуют задачи *нелинейного программирования*, в которых одновремен-

сваивается весовое значение, определяющее расстояние от этой площадки до начальной точки трассы.

Для этапа 2 получают модель, аналогичную модели задачи динамического программирования (например, на рис. 5.16). Соответственно алгоритм на втором этапе будет реализовываться так же, как и алгоритм динамического программирования. Этап 2 заключается в проведении соединительной трассы с учетом запретных зон на площадке размещения элементов и ограничивающих условий. Перебор площадок начинают от конечной точки трассы так, что на каждом шаге выбирают прямоугольную площадку, имеющую наименьший вес.

Волновой алгоритм связан со значительными затратами машинного времени, причем 90 % времени затрачивается на распространение волны и лишь 10 % — на проведении трассы.

Лучевые алгоритмы обеспечивают сокращение затрат машинного времени за счет того, что рассматривают не все прямоугольные площадки, как это делается в волновых алгоритмах, а только те, которые расположены на некоторых направлениях (лучах).

5.5. Параметрический синтез станочных конструкций

Основные задачи параметрического синтеза — назначение технических требований к объекту проектирования и расчет параметров

5.1. Задачи и методы математического программирования

| Задачи и методы математического программирования | Параметры x | | | | Ограничения G | | Целевая функция F | | | | | | Целевая функция и ограничения | | |
|--|-------------------|-------------|-------|-----------|-----------------|----------|---------------------|----------|--------------|--------------------|--------------------|---------------|-------------------------------|----------------|---------------|
| | Размерность $k=1$ | Непрерывные | Целые | Случайные | Аналитические | Линейные | Линейная | Выпуклая | Квадратичная | Многоэкстремальная | Многокритериальная | Сепарабельная | Показательные | Стохастические | Эвристические |
| Однопараметрические | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| Многопараметрические | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| Одноэкстремальные | | | | | | | | | 0 | | | | | | |
| Многоэкстремальные | | | | | | | | | 1 | | | | | | |
| Безусловной оптимизации | | | | | 0 | | | | | | | | | | |
| Условной оптимизации | | | | | 1 | | | | | | | | | | |
| Однокритериальные | | | | | | | | | | | | | | | |
| Многокритериальные | | | | | | | | | | | | 0 | | | |
| Дискретного программирования | | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | |
| Целочисленного программирования | | | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Линейного программирования | | 1 | | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| Нелинейного программирования | | | | | | 0 | 0 | | | | | | | | |
| Выпуклого программирования | | 1 | | | | | | | | | | 1 | | | |
| Сепарабельного программирования | | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Квадратичного программирования | | 1 | | | | | 1 | | | | | | | | |
| Генерализованного программирования | | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Случайного поиска | | | | 1 | | | | | | | | | | | |
| Стохастического программирования | | | | | | | | | | | | | | 1 | |
| Эвристического программирования | | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 |

но или по отдельности целевая функция и ограничения нелинейны. В зависимости от типа нелинейности различают несколько видов задач нелинейного программирования: выпуклые, сепарабельные, квадратичные, геометрические. Множество x , объединяющее значения параметров x_i , называется выпуклым, если прямая, проведенная между любыми двумя точками множества, принадлежит этому множеству. Однопараметрическая целевая функция $F(x)$ называется выпуклой, если для любых двух точек x_i и x_j и любого $\lambda (0 \leq \lambda \leq 1)$ $F(\lambda x_i + (1 - \lambda)x_j) \leq \lambda F(x_i) + (1 - \lambda)F(x_j)$. Гиперповерхность $F(x)$ является выпуклой, если отрезок, соединяющий ее любые две точки $[x_i, F(x_i)]$, $[x_j, F(x_j)]$, лежит на поверхности или выше ее. Если функция $F(x)$ выпуклая, то функция $F(x)$ — вогнутая. Выпуклость функции в точке x^* означает, что x^* — точка глобального экстремума функции [17].

В случае *квадратического программирования* ограничения линейны, а целевая функция является комбинацией линейной и квадратичной формы:

$$F(x) = \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i,j=1}^k x_i x_j$$

Если квадратичная форма $F(x)$ выпуклая (вогнутая), то имеется максимум (минимум) целевой функции $F(x)$. Выпуклость или вогнутость квадратичной формы определяют по критерию Сильвестра [3].

Задача геометрического программирования формулируется для целевой функции и ограничений в виде позиномов (сумма показательных функций) [6]:

$$F(x) = \sum_{i=1}^v a_i x_1^{\alpha_{i1}} x_2^{\alpha_{i2}} \dots x_k^{\alpha_{ik}};$$

$$g_j(x) = \sum_{i=1}^{m_j} b_{ji} x_1^{\alpha_{i1}} x_2^{\alpha_{i2}} \dots x_k^{\alpha_{ik}} \leq 1,$$

$$j = 1, 2, \dots, q.$$

Задачи геометрического программирования широко используют при оптимизации режимов резания. Позиномы являются выпуклыми функциями.

Сепарабельные ограничения и целевая функция имеют вид

$$g(x) = g_1(x_1) + g_2(x_2) + \dots + g_k(x_k);$$

$$\Phi(x) = F_1(x_1) + F_2(x_2) + \dots + F_k(x_k). \quad (5.22)$$

Один из методов решения *задач сепарабельного программирования* основан на кусочно-линейной аппроксимации функции $F(x)$ и $g(x)$ [23].

Если целевая функция и ограничения пред-

ставлены нелинейными зависимостями общего вида, это существенно усложняет решение задачи оптимизации. Для таких задач наиболее широко применяют *методы регулярного поиска*, которые реализуют многошаговый процесс поиска оптимального решения. Если при поиске оптимума используется информация о предыдущем шаге, поисковые методы называют последовательными, в противном случае методы называют пассивными. Для целевых функций одной переменной поиск экстремума производят с помощью сокращения интервала, в котором находится экстремум. Для целевых функций многих переменных применяют *градиентные методы*, в которых для каждого шага или серии шагов выбирают направление движения к оптимальной точке [17].

Все эти методы предполагают, что область, в которой находится экстремум, уже получена, т. е. предварительно должна быть решена задача поиска глобального экстремума. Для поиска глобального экстремума можно использовать *метод случайного поиска*. Он заключается в том, что значения варьируемых параметров задают в виде случайных величин с помощью датчика случайных чисел. Центры группирования экстремальных значений принимаются за предполагаемые точки экстремума и в области этих точек проводится более подробный анализ и выбор области глобального экстремума. Случайный поиск может быть использован и для непосредственного решения задач нелинейного программирования. В этом случае применяются методы направленного случайного поиска, использующие результаты предыдущего шага [6, 7].

Задача, в которой как ограничения, так и целевая функция выражаются случайными функциями, называется *задачей стохастического программирования* [6]. В некоторых случаях эти задачи сводят к детерминированным задачам нелинейного программирования, например, используя лишь математические ожидания варьируемых параметров. В некоторых случаях эта замена позволяет получить достаточно точные значения оптимума.

Особое место среди многошаговых методов оптимизации занимает *динамическое программирование* [3]. Метод динамического программирования может быть реализован в виде непрерывного и дискретного алгоритма (дискретное динамическое программирование). Непрерывный многошаговый алгоритм динамического программирования используют для решения вариационных задач, т. е. он относится к аналитическим методам оптимизации. В этом случае решение задачи оптимизации сводится к решению уравнения в частных производных (уравнения Беллмана), составленного по целевой функции и уравнениям динамики объекта.

Дискретное динамическое программирование обеспечивает получение оптимального решения в виде многошагового процесса, в ходе которого принимаются значения параметров, оптимальные не только для данного шага, но и для задачи в целом. Процедура многошагового процесса должна быть построена таким образом, чтобы на каждом шаге осуществлялась оптимизация только по одному параметру. Результат оптимизации получается в виде области возможных значений параметра, и только на последнем шаге вычисляются оптимальные значения всех параметров. Для обеспечения такого процесса целевая функция должна быть приведена к сепарабельному виду [см. уравнения (5.22)].

Эвристическое программирование основывается на действиях, которые выполняет проектировщик, например, при отборе оптимального варианта конструкции. Этот процесс характеризуется отсутствием четких ограничений и целевой функции, а также жесткого алгоритма отбора вариантов и основано на опыте и интуиции проектировщика. Алгоритм эвристического программирования можно разделить на две группы. К первой группе относятся эвристические программы, в которых реализуется попытка моделирования творческой деятельности человека. Ко второй группе относятся программы, созданные с учетом анализа действий человека при решении конкретных задач, например программы, имитирующей диалог на заданную тему, игру в шахматы и т. д.

В качестве примера пакета программ анализа и параметрической оптимизации рассмотрим систему автоматизированного моделирования и параметрической оптимизации (СИАМ), разработанную в МГТУ им. Н. Э. Баумана для персональных ЭВМ, совместимых с IBM PC/XT/AT. СИАМ может быть использована для анализа и синтеза динамических систем с сосредоточенными параметрами: станочных приводов главного движения, приводов подач рабочих органов станков, несущей системы станков и в целом динамической системы металло-режущих станков.

СИАМ ориентирована на блочно-структурную форму представления математических моделей. Таким образом, модель в СИАМ — это совокупность типовых блоков и связей между ними. Графически на экране дисплея математическая модель строится с помощью курсора в режиме «пера» в виде структурной схемы динамической системы с использованием типовых блоков. Всего в системе 52 типовых блока, из них 12 — передаточные функции типовых звеньев, 10 — различные входные воздействия, 15 — математические операции и функции и 15 — нелинейные звенья.

Максимальная сложность модели определяется оперативной памятью и для 640К байт составляет примерно 300 блоков при максимальном порядке дифференциального уравнения около 600. Построение структурной схемы на экране дисплея производится с помощью меню, в котором указаны операции, выполняемые функциональными клавишами $F1...F10$, и наиболее часто используемые типовые линейные и нелинейные блоки динамических систем (рис. 5.17).

Основными режимами работы являются моделирование, построение частотных характеристик, параметрическая оптимизация. В режиме моделирования проводится решение дифференциальных уравнений методом Кутты — Мерсона 4-го порядка точности, методом Фельберга 5-го порядка точности, методом Рунге — Кутты 4-го порядка точности и методом Эйлера 2-го порядка точности. При использовании первых двух методов шаг интегрирования выбирается автоматически, при использовании двух последних — шаг интегрирования фиксированный. Результаты моделирования могут быть представлены в виде таблиц или графиков, выведенных на экран дисплея или на принтер.

Основной формой представления частотных характеристик являются логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ). Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) выводится сплошной линией, а фазовая — пунктирной линией. Кроме того, возможно построение частотных характеристик в виде годографа Найквиста.

Параметрическая оптимизация выполняется методами Гаусса — Зайделя, Хука — Дживса [23] и методом слепого поиска.

Структурно-параметрический синтез конструкции станочных узлов. Критерии оценки станочных узлов в основном можно разделить на две группы: критерии эффективности и критерии качества (рис. 5.18). В соответствии с этим цель синтеза состоит в достижении заданного качества при максимальной эффективности, т. е. критерии эффективности составляют целевую функцию F , а критерии качества — ограничения задачи синтеза. В основном заданное качество достигается благодаря затратам материальных и трудовых ресурсов, и критерии эффективности должны минимизировать эти затраты. Однако имеется группа задач и моделей, где приходится целевую функцию строить из критериев качества или по крайней мере на основе технических критериев эффективности, так как достижение заданного качества не связано или в незначительной степени связано с материальными и трудовыми затратами. К таким моделям относятся, например, модели коррекции и адаптации. В данном случае качество обеспечивается настройкой корректирующего устройства или соответствующим ал-

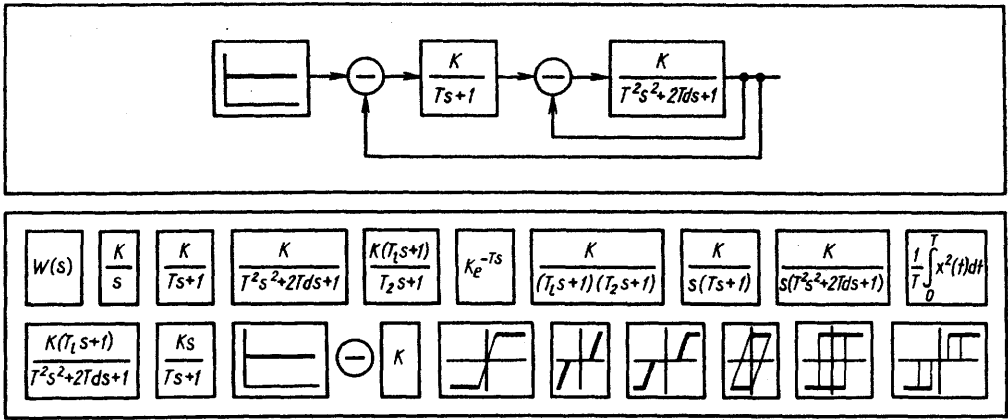


Рис. 5.17. Меню СИАМ:

F1 — справочная служба СИАМ; F2— режим выбора блока; F3— поднять/опустить «перо»; F4— режим редактирования блока; F5— записать блок-схему на диск или считать ее с диска; F6— показать или убрать окно-подсказку в нижней части экрана; F7— режим моделирования; F8— режим параметрической оптимизации; F9— режим построения ЛЧХ; s — оператор Лапласа; $W(s)$ — передаточная функция (п. ф.) станочного узла для механизма общего вида; K/s — п. ф. интегрирующего звена; $K/(Ts+1)$ — п. ф. аperiodического звена; $K/(T^2s^2+2dT, s+1)$ — п. ф. колебательного звена; Ke^{-Ts} — п. ф. звена запаздывания;

$\int_0^T x^2(t) dt/T$ — интегральная квадратичная оценка, \ominus — элемент сравнения; K — п. ф. безынерционного звена

горитмом блока адаптации. Примером служит задача достижения максимального быстродействия следящего привода, когда в результате оптимизации определяется алгоритм управления привода, т. е. настройка управляющей части.

Критерии эффективности в зависимости от моделей, на которых они базируются, делятся на экономические, технико-экономические и технические. Причем если две первые группы критериев определяют в основном материальные потери, то технические критерии косвенно определяют эти потери, например, вследствие снижения производительности.

Критерии качества делят на системные и фи-

зические. Системные критерии качества могут быть определены только для старших уровней: для станка или станочного модуля или системы. Физические характеристики для низших уровней: станочного узла и для станка в целом.

При анализе конструкции станочных узлов, агрегатов и систем как объектов проектирования важнейшим условием правильности выбора компоновочных решений является обеспечение заданного качества функционирования при минимальных трудовых и материальных затратах. Таким образом, при синтезе конструкции прежде всего должны быть достигнуты

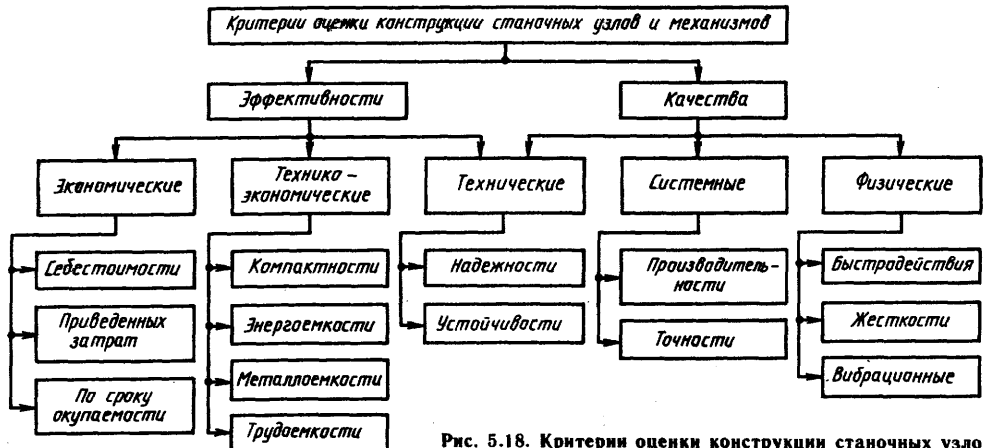


Рис. 5.18. Критерии оценки конструкции станочных узлов

заданные показатели качества, т. е. задача синтеза сводится к следующей задаче оптимального проектирования:

$$F(x^*) = \text{extr} F(x); g(x) = g_0, \quad (5.23)$$

где $F(x)$, $F(x^*)$ — соответственно целевая функция (критерий эффективности задачи) и ее оптимальное значение; x , x^* — векторы соответственно переменных варьирования и их оптимальных значений; $g(x)$ и g_0 — соответственно показатель качества и уровень этого показателя, который необходимо достичь.

Характерной особенностью традиционных методов оптимизации конструкций является раздельное решение задач параметрического и структурного синтеза. При этом сначала выполняется структурный синтез конструкции, а затем ее параметрический синтез. Это вызывает необходимость многократного повторения процедур параметрического и структурного синтеза, что, вообще говоря, не гарантирует оптимальности одновременно структурных и параметрических переменных модели конструкции. Для повышения эффективности процедур синтеза станочных конструкций можно использовать метод баланса градиентов (БГ-метод) [4]), который обеспечивает структурно-параметрический синтез станочных конструкций. Для реализации БГ-метода вводится функционал качества станочного узла

$$\Phi = g(F),$$

где $g(x)$ — функция качества; $F(x)$ — функция эффективности.

Критерием оптимизации при применении БГ-метода является равенство координат вектора градиента функционала качества $\text{grad}\Phi$:

$$A_1 = A_2 = \dots = A_k = A_0 < 0, \quad (5.24)$$

где $A_i = \partial\Phi/\partial x_i = \partial g/\partial F|_{x_i} \approx \Delta g/\Delta F|_{\Delta x_i}$;

$$A_0 = 1/k \sum_{i=1}^k A_i \text{ или } A_0 = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k A_i}.$$

Из соотношения (5.24) видно, что критерий оптимизации БГ-метода инвариантен по отношению к типу переменной (структурная или параметрическая, дискретная или непрерывная).

В случае применения БГ-метода, сравнивая текущие значения A_i и A_0 , получаем возможность выбора варьируемых переменных для модели оптимизации (по уровню значимости переменной):

если $|A_i| \gg |A_0|$, то $x_i = \sup x_i$, $x_i = \text{const}$;

если $|A_i| \ll |A_0|$, то $x_i = \inf x_i$, $x_i = \text{const}$,

т. е. переменную x_i можно исключить из модели оптимизации.

С помощью БГ-метода можно оценивать увеличение (уменьшение) затрат на повышение (снижение) качества конструкции:

$$\Delta F = \Delta g/A_0, \quad (5.25)$$

где $g = g_0 \pm \Delta g$, $F = F(x^*) \pm \Delta F$.

На основе БГ-метода могут быть получены аналитические соотношения между оптимальными параметрами. Подробно возможности БГ-метода и примеры проектирования станков с его применением описаны в работах [4, 5].

Двухуровневая модель синтеза станочных узлов. При раздельной оптимизации узлов сложно обеспечить оптимальную конструкцию станка в целом.

В работах [4, 5] описана двухуровневая модель оптимизации станочных узлов для следующих комбинаций уровней агрегатирования (иерархии): станочная система (станочный модуль) — станочный агрегат, станок — станочные узлы (механизмы) — конструктивные элементы — детали. На основе этого для каждой двухуровневой системы может быть произведена оптимизация элементов нижнего уровня с учетом их связей и взаимодействия в системе верхнего уровня. Кроме того, двухуровневая модель (алгоритм) оптимизации позволяет назначить требования к элементам нижнего уровня, исходя из требований, предъявляемых к системе верхнего уровня, т. е. способствует решению задачи комплексного проектирования станочной системы или станка.

Алгоритм двухуровневой оптимизации конструкции станочных узлов включает три этапа:

1) выполняется разработка структурно-параметрического ряда оптимальных конструкций узлов по требованиям критерия качества (g_{10} , g_{20} , ..., g_{n0}). Разработка такого ряда осуществляется на основе БГ-метода. При этом в конструкцию узлов могут входить унифицированные элементы или унифицированные конструктивные блоки. Эти ряды могут быть построены и при нескольких критериях качества [4, 5]. Описание структурно-параметрического ряда для каждого s -го узла производится с помощью соответствующего функционала качества $\Phi_s = g_s(F)$;

2) осуществляется оптимизация v узлов (элементов) в составе системы верхнего иерархического уровня с помощью функционалов качества $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_v$ при заданном качестве компоновки системы g_0 , при экстремуме функции F . Поскольку формулировка задачи оптимизации при этом аналогична (5.23), на этом этапе можно использовать БГ-метод. Результатом этого этапа является разработка требований к качеству формообразующих узлов;

3) исходя из полученных требований к каждому узлу, на базе БГ-метода определяют параметры конструкции соответствующего узла.

Графическое решение задачи двухуровневой оптимизации (второй этап) возможно и при большем числе узлов, однако трудоемкость оптимизации существенно возрастает, а точность решения ухудшается. При аналитическом описании функционала качества оптимального набора узлов удобно пользоваться БГ-методом. Для каждого i -го узла аналитическое выражение функционала качества имеет вид

$$F_i = (1/g_i^m)(K_{m,i}g_i^m + K_{m-1,i}g_i^{m-1} + \dots + K_{1,i}g_i + K_{0,i}) \dots \quad (5.26)$$

Коэффициенты $K_{ij}(j = \overline{1, m})$ находят с помощью метода наименьших квадратов по значениям F_i и $g_i(i = \overline{1, n})$, определяющим набор вариантов i -го узла. Степень уравнения (5.26) m подбирают исходя из адекватности уравнения регрессии (5.26) для исходной модели набора вариантов i -го узла. Задача оптимизации компоновки станка из v узлов формулируется следующим образом:

$$F \rightarrow \min; F = \sum_{i=1}^v \beta_i F_i; \quad (5.27)$$

$$g = g_0; \quad g = \sum_{i=1}^v \alpha_i g_i,$$

где β_i, α_i — весовые коэффициенты, учитывающие соотношение критериев качества и эффективности узлов в составе компоновки станка.

С помощью БГ-метода решение задачи оптимизации (5.27) сводится к итерационному решению системы уравнений

$$g_i = g_{i+1}^{m+1} \sqrt{\frac{\alpha_{i+1} \beta_i R(g_i)}{\alpha_i \beta_{i+1} R(g_{i+1})}}, \quad i = \overline{1, v-1};$$

$$g_v = g_0 - \sum_{i=1}^{v-1} g_i, \quad (5.28)$$

где для i -го узла $R(g_i) = K_{m-1,i}g_i^{m-1} + 2K_{m-1,i}g_i^{m-2} + \dots + (m-1)K_{1,i}g_i + mK_{0,i}$.

5.6. Оптимизация при проектировании

Важнейшей частью автоматизации проектирования является нахождение оптимального варианта проектируемого объекта. Структуру объекта синтезируют в основном с помощью эвристических методов, не исключая, однако, применения вычислительной техники. Взаимодействие проектировщика с ЭВМ делает синтез

структуры объекта наиболее эффективным процессом, особенно при применении *структурной оптимизации*.

Проектируемый объект с уже определенной структурой может иметь несколько допустимых решений при различных значениях его параметров. В этом случае возможен такой набор значений параметров, который обеспечивает оптимальное решение. Процесс поиска решения называют *параметрической оптимизацией*. В дальнейшем при рассмотрении различных аспектов процесса оптимизации, как правило, имеется в виду параметрическая оптимизация, а структура объекта считается заданной. Применяя параметрическую оптимизацию, производят оценку различных структур объекта, сравнивая между собой их оптимальные варианты.

Процесс оптимизации в общем виде представляет собой следующее. Имеется вектор $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ независимых внутренних параметров, значения которых однозначно определяют все характеристики изделия, в том числе значения целевой функции $F(Y)$ и функции ограничений R_1, R_2, \dots, R_m . Таким образом, целевая функция и функции ограничений зависят от внутренних параметров. Эта зависимость в общем случае нелинейна. Независимые параметры — это обычно размеры изделия или характеристики его элементов. Так, для шпиндельного узла независимыми параметрами могут быть диаметр опорной шейки, длины консоли и межопорной части, жесткость подшипника и т. д.

В процессе оптимизации часть независимых внутренних параметров подвергается изменениям в определенных пределах. Такие параметры называют *управляемыми*, а пределы их изменений — *параметрическими ограничениями*. Формальная постановка задачи параметрической оптимизации сводится к нахождению таких значений независимых параметров, при которых целевая функция $F = F(Y)$ достигает своего минимума при

$$y_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5.29)$$

и

$$R_i(Y) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5.30)$$

К такой формулировке приводят любую реальную задачу оптимизации. Если требуется максимизация целевой функции, то, умножив ее на -1 , получим указанную форму.

Проектирование станков и их узлов с заданными или оптимальными выходными характеристиками требует математической формулировки задачи оптимального проектирования, для решения которой необходимо выполнить определенную последовательность действий:

определить основную систему переменных и выделить решающие расчетные параметры;

выработать критерий качества, выражающий цель конструктора при проектировании узла и позволяющий определить область допустимых решений;

сформулировать в виде неравенств или равенств все ограничения, налагаемые на расчет;

сформировать математическую модель узла в виде системы необходимых и достаточных выражений, связывающих различные переменные и описывающих поведение узла,

выбрать метод поиска (оптимизации), наиболее пригодный для решаемой задачи и дающий возможность систематически и эффективно исследовать область допустимых решений для отыскания наилучших из них.

Задачи оптимизации реальных станков и их узлов, как правило, не только многопараметрические, но и многокритериальные. Даже если математическое описание конструкции и область изменения варьируемых параметров y_1, y_2, \dots, y_n известны, то формирование целевой функции (обобщенного критерия качества) $F(\mathbf{Y})$ представляет собой серьезную проблему.

Целевая функция позволяет получить количественную оценку качества проектируемого объекта. Такую оценку можно произвести с помощью вектора выходных характеристик объекта $\mathbf{Z}=(z_1, z_2, \dots, z_n)$, однозначно определяемого значениями независимых варьируемых параметров z_k .

Отдельные выходные характеристики z_k (их называют частными критериями) — суть технико-экономические показатели изделия. В станке — это его точность, производительность, материалоемкость и т. п.

Предельно допустимые значения выходных характеристик регламентированы в техническом задании на проектирование. Если обозначить эти значения через z_k^3 , то выражение

$$z_k - z_k^3 \leq 0 \quad (5.31)$$

называют условием работоспособности, которое может быть реализовано для любых характеристик.

Степень выполнения требований технического задания оценивают выражением

$$\Delta z_k = (z_k - z_k^3) / z_k^3. \quad (5.32)$$

Критерии Δz_k не противоречат принятому условию минимизации целевой функции, а их безразмерная форма позволяет сравнивать между собой характеристики разной физической природы. Основные трудности в использовании критериев z_k или Δz_k для оценки проекта состоят в том, что эти критерии не являются независимыми, так как все они — функции внутренних параметров.

Среди критериев всегда находятся такие, улучшение которых приводит к ухудшению других. Это *конфликтные критерии*. Наличие конфликтных критериев не позволяет ставить

целью одновременное улучшение всех выходных характеристик изделия, и требуется поиск компромиссного решения, которое, однако, чрезвычайно трудно формализовать.

Аддитивные критерии весьма часто применяют в задачах многокритериальной оптимизации. Целевая функция в этом случае имеет вид

$$F(\mathbf{Y}) = \sum_{k=1}^s c_k \Delta z_k(\mathbf{Y}), \quad (5.33)$$

где c_k — весовые коэффициенты, определяющие степень влияния каждого частного критерия на целевую функцию. Их численные значения находят с помощью экспертных оценок. Обычно полагают

$$\sum_{k=1}^s c_k = 1. \quad (5.34)$$

Основной недостаток аддитивного критерия — отсутствие объективной достоверности значений весовых коэффициентов.

В ряде случаев применяют *минимаксные критерии*. Для этого в некоторой точке \mathbf{Y} , пространства независимых параметров определяют значения частных критериев $\Delta z_1(\mathbf{Y}_i), \Delta z_2(\mathbf{Y}_i), \dots, \Delta z_s(\mathbf{Y}_i)$. Из этих критериев выбирают наибольший (т. е. наихудший) и принимают его в качестве целевой функции $F(\mathbf{Y}) = \max_{k \in [1..s]} \Delta z_k(\mathbf{Y})$.

Так как целевую функцию надо минимизировать, то имеем следующую запись задачи:

$$\min_{x \in D} F(\mathbf{Y}) = \min_{x \in D} \max_{k \in [1..s]} \Delta z_k(\mathbf{Y}), \quad (5.35)$$

где D — область допустимых решений; $[1..s]$ — множество целых чисел в интервале от 1 до s .

При минимизации критерия (5.35) необходимо следить, чтобы остальные $s-1$ критериев не выходили за пределы допустимых значений. Исчерпав возможности минимизации критерия, выбранного в ряду всех критериев, вновь определяют наибольший, и вся процедура повторяется сначала. Так поступают до тех пор, пока не исчерпывается возможность улучшения каждого из s критериев.

В случаях, когда основным целевым назначением станков является обеспечение заданных показателей точности изготавливаемых деталей, очевидно, что *решающими расчетными параметрами* являются выходные параметры точности формообразующих узлов [18]. Тогда в качестве целевой функции при однокритериальной оптимизации принимают один (важнейший) из заданных выходных параметров точности узла x_1, x_i , а при многокритериальной оптимизации — вектор $\mathbf{X}_{\text{опт}}$, определяемый сово-

купностью заданных выходных параметров точности x_i , x_j узла и описываемый функцией соответствующих перемещений опорных точек узла [18] (точек, определяющих положение установочных баз узла) Именно вектор $X_{\text{опт}}$ и является глобальным критерием оптимизации узла по точности [20]

В тех случаях когда для определения динамического качества узла пользуются частотными характеристиками (АФЧХ и АЧХ), то целевой функцией при однокритериальной оптимизации служит какой либо радиус вектор $A_i(f)$ (для АФЧХ) или вектор (для АЧХ), лежащий в заданном интервале частот f , соответствующем определенному выходному параметру точности При многокритериальной оптимизации по частотным характеристикам целевой функцией является вектор $X_{\text{опт}}$, определяемый совокупностью подлежащих минимизации радиус векторов (или векторов)

Частными (локальными) критериями оптимизации формообразующих узлов станков являются либо отдельные выходные параметры точности, либо векторы частотных характеристик для фиксированных частот или узких интервалов частот, либо параметры узлов, оказывающие влияние на выходные параметры точности С учетом математических моделей, описывающих динамические и тепловые процессы в узлах станков, такими критериями являются следующие масса, демпфирование и жесткость, с изменением которых изменяются амплитуды перемещений опорных точек узла быстродействие, характеризующее скорость возврата узла к устойчивым значениям выходных параметров точности, энергетические потери в узлах, избыточные температуры и расход СОЖ, влияющие на тепловые смещения формообразующих узлов Система целевых функций при многокритериальной и однокритериальной оптимизации по точности вытекает из изложенных выше соображений

Параметры узлов станков необходимо оптимизировать уже на начальных этапах проектирования Оптимизируемыми параметрами могут быть следующие

в несущих системах станков масса, форма сечения станины и корпусных деталей и их размеры, компоновка направляющих, размеры и коэффициенты контактной податливости стыков,

в шпиндельных узлах межопорное расстояние, вылет консольной части, частота вращения, зазор — натяг (в опорах качения), зазор, размеры опор, глубина карманов вязкость и расход СОЖ, давление источника питания (в опорах скольжения),

в суппортах, столах, резцедержателях, револьверных головках масса, форма и размеры узлов, компоновка и взаимное расположение

направляющих, размеры и коэффициенты податливости стыков,

в приводах параметры корректирующих цепей в регуляторах (постоянная времени, коэффициент усиления и др.), инерционные, упругие и другие характеристики

В случаях, когда при проектировании станочного оборудования главной целью является обработка определенного множества деталей по принятой технологии с минимальными затратами, то обеспечение годового выпуска определенного множества деталей при минимальных затратах следует рассматривать [14] как целевую функцию, которая характеризует эффективность оборудования

$$A = N / \Sigma c \rightarrow \max, \quad (5.36)$$

где N — годовой выпуск деталей, шт, Σc — сумма приведенных затрат

Годовой выпуск деталей можно представить следующим образом

$$N = (T_0 / T) K_{т.и}, \quad (5.37)$$

где T_0 — годовой фонд времени, T — среднее время цикла обработки одной детали, $K_{т.и}$ — коэффициент технического использования оборудования

Тогда целевая функция

$$A = \frac{T_0 K_{т.и}}{T(\Sigma c)} \rightarrow \max \quad (5.38)$$

При известном T_0 и заданном T

$$\Sigma c \rightarrow \min, \quad (5.39)$$

$$K_{т.и} \rightarrow 1$$

При проектировании новых моделей станков, входящих в состав различных комплектов технологического оборудования, необходимо стремиться к повышению их производительности, так как при этом удается уменьшить число станков в комплекте и соответственно снизить стоимость всего комплекта оборудования С уменьшением числа станков повышается и надежность технологической системы В этом случае целевая функция

$$T(\Sigma c) \rightarrow \min \quad (5.40)$$

С увеличением степени автоматизации станочного оборудования сокращаются текущие затраты на обслуживание, и в сумме приведенных затрат наибольшая доля приходится на стоимость самих станков В современных ГПС и АЛ стоимость оборудования, отнесенная к одному году эксплуатации, составляет до 85 % всех приведенных затрат Поэтому при сопоставлении проектных вариантов станков и станочных систем следует прежде всего обращать внимание на их сравнительную стоимость

В качестве *проектных ограничений*, вводимых в расчет и формулируемых в виде неравенств или равенств, принимают максимально или минимально допустимые значения нескольких параметров или характеристик станка и его узлов. Ограничения связаны с функциональным назначением станка, с производственными возможностями изготовления и сборки станка, с условиями его эксплуатации.

Важнейшими функциональными ограничениями являются либо производительность (когда целевая функция — точность обработки), либо требования к точности (когда целевая функция — минимум затрат). Ограничения по точности или производительности обуславливают соответствующие ограничения допустимых геометрических, кинематических, динамических, тепловых и других погрешностей станка в целом и его отдельных узлов. Например, увеличение натяга подшипников в шпиндельном узле приводит, с одной стороны, к интенсификации режимов обработки, с другой, — к потере точности, связанной с увеличением выделения теплоты в опорах.

Возможности станкостроительного производства ограничивают допустимый и целесообразный набор технологических операций, режимы обработки, технологию сборки, наборы режущего инструмента, оснастки, метрологических средств и т. п.

На технологичность изготовления станка большое влияние оказывает унификация, связанная с применением в конструкции стандартных и унифицированных деталей, а также сборочных единиц. Основные требования к стандартным узлам следующие: они должны быть законченными, конструктивно самостоятельными механизмами, должны иметь требуемые характеристики прочности, динамические свойства, жесткость, быстродействие и т. п., должны обеспечивать взаимную компоновку в различных сочетаниях и положениях, должны обеспечивать унификацию стыковочных элементов, должны соответствовать стандартам.

Ряд проектных ограничений связан с условиями эксплуатации станков и станочных систем. Необходимо учитывать взаимодействие с инструментальными системами, с транспортными системами и роботами, автоматизированными средствами контроля и т. д. Обязательно учитывают ограничения, связанные с сохранением первоначального качества станка во времени (параметрической надежностью), долговечностью, старением, износом. Иногда ограничения вызваны характером производственной площади или особенностями транспортирования станка.

Существуют ограничения, связанные с эргономикой в проектируемой конструкции, должны быть решены вопросы удаления стружки, абра-

зивной пыли, подвода СОЖ. Особого внимания заслуживают внешнее оформление станка, удобство и безопасность его обслуживания.

К проектным ограничениям относят патентно-правовые вопросы, так как необходима полная патентная чистота проектируемого станка.

Математическая модель при поиске оптимальных параметров занимает центральное место. С ее помощью можно в достаточно широких пределах менять параметры конструкции станка и его узлов и подбирать требуемые характеристики, заменяя дорогостоящий натурный эксперимент математическим моделированием.

Математическими моделями узлов при оптимизации их параметров служат системы необходимых и достаточных выражений, связывающих различные переменные и описывающие поведение узла. Например, при оптимизации динамического качества шпиндельного узла таковыми являются уравнения, описывающие колебания балки на упруговязких опорах, имеющей одну, две или более степеней свободы. Для оптимизации тепловых характеристик узла может быть принята тепловая модель, описываемая с помощью метода конечных элементов [22]. Во всех случаях желательно, чтобы при выборе модели точность прогноза была соотнесена с точностью проектируемого узла и не превышала ее, так как это неизбежно приведет к существенному удорожанию этапа оптимизации и стоимости проектно-конструкторских работ в целом.

Метод оптимизации должен соответствовать расчетной области и принятому критерию. При выборе метода необходимо учитывать характер целевой функции, вид области допустимых значений, поведение ограничений, чувствительность целевой функции к отдельным изменениям варьируемых параметров узла, необходимость включения в расчеты критерия эффективности и сходимости поиска.

При многокритериальной оптимизации сложность задачи состоит в отсутствии аналитического выражения для целевой функции в гиперпространстве варьируемых параметров станка или узла. Некоторые критерии находятся в противоречии друг с другом, что затрудняет корректную постановку многокритериальной задачи до численного эксперимента на ЭВМ.

Метод случайного поиска [7] реализует выбор направления поиска на каждом шаге случайным образом, например, используя таблицы случайных чисел. Так, из некоторой точки Y_k переходят в точку Y_{k+1} , и если при этом оказывается $F(Y_{k+1}) < F(Y_k)$, то попытка считается удачной и поиск продолжают из точки Y_{k+1} . Если $F(Y_{k+1}) \geq F(Y_k)$, то попытка считается неудачной и из точки выбирают новое слу-

чайное направление Поиск прекращают после m неудачных попыток Число попыток m задают заранее, а его значение определяют из опыта решения подобных задач Недостаток этого метода заключается в том, что точки, в которых вычисляются значения $F(\mathbf{Y})$, могут распределиться неравномерно в пространстве независимых параметров, из за чего определенные области этого пространства окажутся не проанализированными

Метод ЛП поиска [27] не имеет этого недостатка Метод представляет собой детерминированный аналог случайного поиска Целесообразность его применения при многокритериальной оптимизации обусловлен его очевидными преимуществами

отсутствием необходимости формирования единой целевой функции при любом числе частных критериев оптимизации,

большой равномерностью зондирования пространства варьируемых параметров пробными точками,

повторяемостью численных экспериментов, возможностью получить ту же точность, что и при применении случайного поиска, но тогда, когда число пробных точек в 2—4 раза меньше, возможностью нахождения глобального оптимума,

возможностью получения информации о влиянии каждого варьируемого параметра системы на выходные параметры и характеристики проектируемого объекта благодаря просмотру всего гиперпространства параметров системы

Математический аппарат метода ЛП поиска обеспечивает формирование векторов $\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_N$ в N точках, равномерно расположенных в пространстве независимых параметров Достоинством этого метода является также удобная форма анализа комплекса частных критериев в виде таблицы испытаний Под испытанием здесь понимаются определение значений параметров и критериев в одной из N точек Общее число испытаний равно N , и для каждого из них вычисляют значения всех частных критериев Каждому критерию в таблице испытаний отведена одна строка, в которой значения этого критерия располагают в порядке возрастания с указанием номера испытаний Сумма таких строк по всем частным критериям позволяет анализировать комплекс этих критериев при отсутствии целевой функции в явном виде, рассмотрев все возможные компромиссы Применение ЛП-поиска требует, однако, множества вычислений целевой функции

Симплекс-метод [17] сокращает время вычислений, но он не позволяет получить информацию о влиянии каждого фактора на целевую функцию Симплекс-метод обычно применяют для задач, записанных в канонической форме

$$\min(c, x), Ax = b, x \geq 0, \quad (5.41)$$

где $c \in R^n, x \in R^n, A$ — матрица $m \times n, b \in R^m$

При применении симплекс метода просмотр вершин многогранного множества возможных решений выполняют таким образом, что значения целевой функции монотонно убывают При этом перебор значительно сокращается не рассматривают те вершины, в которых значения c, x больше уже найденных Кроме того, перебор идет по соседним вершинам, поэтому система линейных уравнений, которую приходится решать на очередном шаге, мало отличается от предыдущей При этом используют специальные экономные приемы решения таких систем

Задачи однокритериальной оптимизации параметров станков, их узлов и систем, как правило, относятся к задачам безусловной оптимизации, для решения которых разработано большое число различных методов [6, 28] Эти методы, как правило, можно применять и в задачах с ограничениями, так как существуют приемы сведения задач условной оптимизации к задачам безусловной оптимизации Существо метода и его название определяются способом выбора направления поиска в пространстве независимых параметров

Значение целевой функции может быть найдено непосредственно, если она выражена аналитически В этом случае минимум целевой функции вычисляют, используя необходимые условия экстремума, — равенство нулю градиента целевой функции или (что то же) равенство нулю всех частных производных целевой функции по независимым переменным

$$\text{grad } F(\mathbf{Y}) = (\partial F / \partial y_1, \partial F / \partial y_2, \dots, \partial F / \partial y_n) = 0 \quad (5.42)$$

Обычно в технических задачах аналитические выражения для целевой функции и функций ограничений отсутствуют Поэтому минимум целевой функции определяют, применяя *поисковую оптимизацию* Суть ее состоит в том, что определяют последовательный ряд точек, образующих траекторию в пространстве независимых параметров, двигаясь вдоль которой можно достичь минимума целевой функции При этом в каждой точке вычисляют значение целевой функции и проверяют условия прекращения поиска (рис 5.19) Таким условием, как правило, является уменьшение целевой функции на каждом последующем шаге

Ниже описаны некоторые методы поиска минимума целевой функции, удобные при решении задач однокритериальной оптимизации параметров и характеристик станков

Метод полного перебора является самым простым методом поиска Всю исследуемую область разбивают на элементарные подоблас-

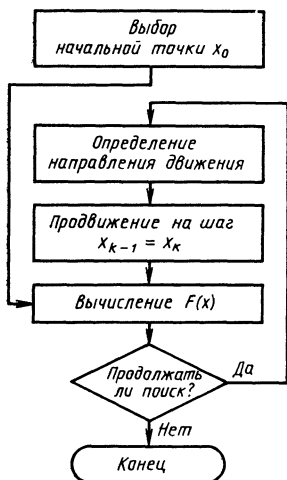


Рис. 5.19. Схема алгоритма поисковой оптимизации

ти, в каждой из которых вычисляют целевую функцию. Сравнивая полученные значения, находят минимум целевой функции. Метод рекомендуется для задач с небольшим числом независимых параметров (три-четыре) и ограниченными диапазонами их изменений. В противном случае затраты машинного времени становятся чрезмерными.

Метод координатного спуска предполагает направление поиска на очередном шаге, совпадающем с направлением одной из координатных осей. Другими словами, выполняется последовательная оптимизация по каждому независимому параметру. Например, вначале осуществляется движение в направлении оси X_1 до тех пор, пока целевая функция уменьшается. Когда такое уменьшение прекращается, начинают движение в направлении оси X_2 и т. д. После окончания полного цикла спусков по направлениям всех независимых параметров вновь возвращаются к направлению X_1 и реализуют новый цикл. Так продолжают до тех пор, пока не находят минимум целевой функции.

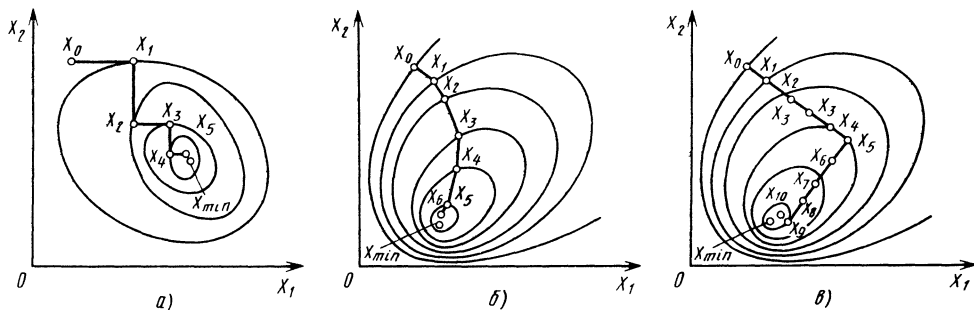


Рис. 5.20. Траектория поиска методами оптимизации: а — координатного спуска; б — градиента; в — наискорейшего спуска

Траектория спуска для случая двух независимых переменных показана на рис. 5.20, а.

Метод градиента и метод наискорейшего спуска. В этих двух методах при выборе направления поиска используют информацию о градиенте целевой функции. Так как направление градиента определяет направление самого быстрого возрастания целевой функции, то целесообразно поиск ее минимума вести в антиградиентном направлении. Метод градиента предусматривает определение этого направления в каждой точке траектории поиска, а при методе наискорейшего спуска движение в антиградиентном направлении осуществляется до тех пор, пока происходит уменьшение целевой функции. На рис. 5.20, б, в изображены траектория поиска по методу градиента (рис. 5.20, б) и траектория наискорейшего спуска (рис. 5.20, в). Сравнивая траектории, можно заключить, что метод наискорейшего спуска требует большего числа шагов, но при этом методе реже вычисляется градиент целевой функции.

Аппроксимация частных производных, необходимых для вычисления градиента целевой функции $F(\mathbf{Y})$, может быть произведена следующим образом:

$$\frac{\partial F(\mathbf{Y})}{\partial y_i} \approx \frac{F(y_1, y_2, \dots, y_i + h_i, \dots, y_n) - F(y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n)}{h_i} \quad (5.43)$$

где h_i — проекция шага поиска на направление y_i .

Метод штрафных функций позволяет сводить условную оптимизацию к безусловной. Суть метода заключается в замене целевой функции $F(\mathbf{Y})$ исходной задачи обобщенным критерием, значения которого совпадают с $F(\mathbf{Y})$ внутри области допустимых решений и резко возрастают вне ее. В качестве штрафной функции можно принять, например, такую:

$$Q(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^m \left[\frac{R_i(\mathbf{Y}) + |R_i(\mathbf{Y})|}{2} \right]^2 \quad (5.44)$$

Тогда обобщенный критерий можно представить в виде $T(Y, t) = F(Y) + tQ(Y)$, где t — коэффициент штрафа

Минимум функции $T(Y, t)$ стремится к минимуму функции $F(Y)$ при $t \rightarrow \infty$. Для всех $Y \in D$ $Q(Y) \geq 0$, и можно обойтись без штрафных функций, если заранее известно, что минимум лежит внутри области D . Обычно такая априорная информация отсутствует.

По результатам поиска оптимума целевой функции и анализа влияния на нее различных факторов выбирают оптимальные значения параметров и характеристик станка, его узлов и систем, а затем корректируют исходный вариант, принятый на начальной стадии проектирования.

5.7. Примеры автоматизированного проектирования

Концептуальное проектирование на ранних стадиях семейства станков базируется на ключевых особенностях автоматизированного концептуального проектирования: формировании исходных данных для проектирования, разработке концепции проектирования, применении модульного принципа проектирования (см. подразд. 5.1) и унификаций (см. подразд. 5.2).

Наиболее эффективна работа группы конструкторов-концептуалистов в случае разработки семейства станков различного целевого назначения на основе результатов анализа *Preisleistung*. С применением изложенного в подразд. 5.2 подхода на МСПО «Красный пролетарий» разработано [9] семейство из двенадцати станков (рис. 5.21), в том числе токарные станки патронные, центральноприводные (одно- и двухсуппортные), фрезерно-токарные, фрезерно-центровальные, для обработки труб и др. В этом семействе станков максимально реализованы принципы модульного проектирования и унификации. Применение системы CAD/CAM позволило получить конструкторские разработки токарных станков на уровне концепций (рис. 5.22).

Результаты проектирования, полученные с помощью систем CAD/CAM, подтверждают целесообразность автоматизации конструкторских работ, начиная с самых ранних стадий.

Автоматизированное проектирование узлов станков. Производственный опыт показывает целесообразность существования отдельных автономных систем САПР узлов станков, объединенных общей концепцией проектирования, имеющих возможность обращения к общим базам данных, а также общее методическое, программное, техническое, информационное, организационное и другие виды обеспечения.

Автоматизированное проектирование шпиндельного узла с аэростатическими подшипниками (САПР ШУ АП). В связи с необходимостью расширения использования шпиндельных узлов (ШУ) с аэростатическими подшипниками в технологическом оборудовании была создана система автоматизированного проектирования (САПР ШУ АП). Ее разработка была обусловлена тем, что для многообразных технологических процессов невозможно использовать одну-две конструкции ШУ. Чаще всего приходится либо разрабатывать новую конструкцию, применяя методы структурной оптимизации, либо создавать новый вариант уже известного ШУ с помощью методов параметрической оптимизации.

В качестве критериев оценки динамического состояния ШУ могут служить следующие при структурной оптимизации — тип конструктивной схемы, зависящей от целевого назначения ШУ для конкретного вида технологического процесса, при параметрической оптимизации — конструктивные размеры аэростатических подшипников, получаемые на основе физических моделей истечения газа.

Разработанная САПР ШУ АП имела следующие особенности: наличие достоверных математических моделей и методов расчета аэростатических подшипников, основанных на оптимизации их основных эксплуатационных характеристик и конструктивных размеров, наличие обширной информации о возможных вариантах компоновки ШУ для конкретных технологических процессов, возможность ее корректировки и доработки с учетом специфических особенностей объекта проектирования, возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик ШУ на стадии проектирования, получение их оптимальных значений, возможность выпуска полного комплекта конструкторской документации автоматизированным способом.

Область рационального использования ШУ АП была расширена путем оптимизации их параметров на основе алгоритма функционирования многоуровневой САПР (рис. 5.23). Многолетний опыт создания ШУ АП (структурная оптимизация) и применения методов их математического моделирования (параметрическая оптимизация) позволяет получать из банка данных необходимый вариант компоновки ШУ для разрабатываемого технологического процесса.

К уровню I САПР (блоки 1—5) относятся собственно ШУ как законченные изделия, различающиеся по функциональному значению, структуре и т. д., т. е. имеющие определенный набор признаков. Выявление структуры ШУ на уровне I представляет собой авто-

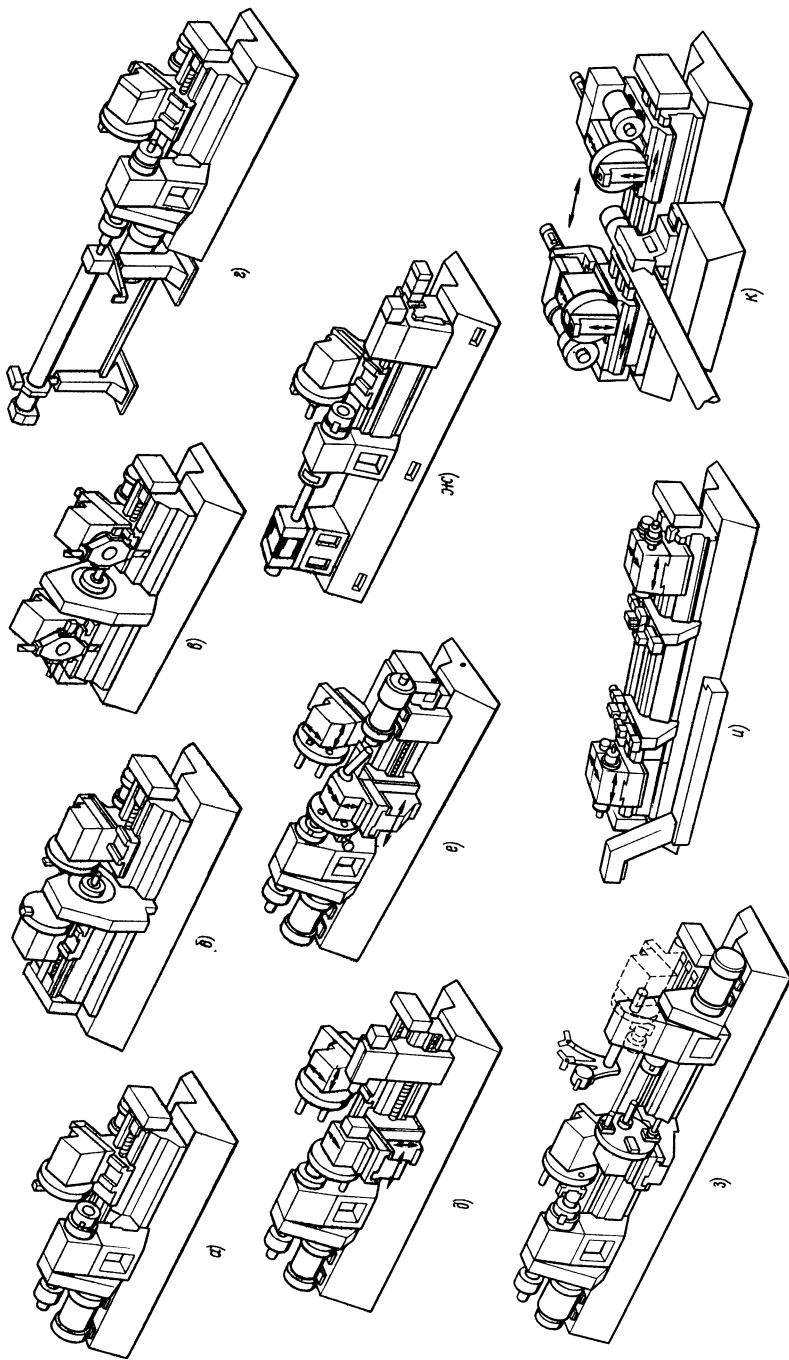
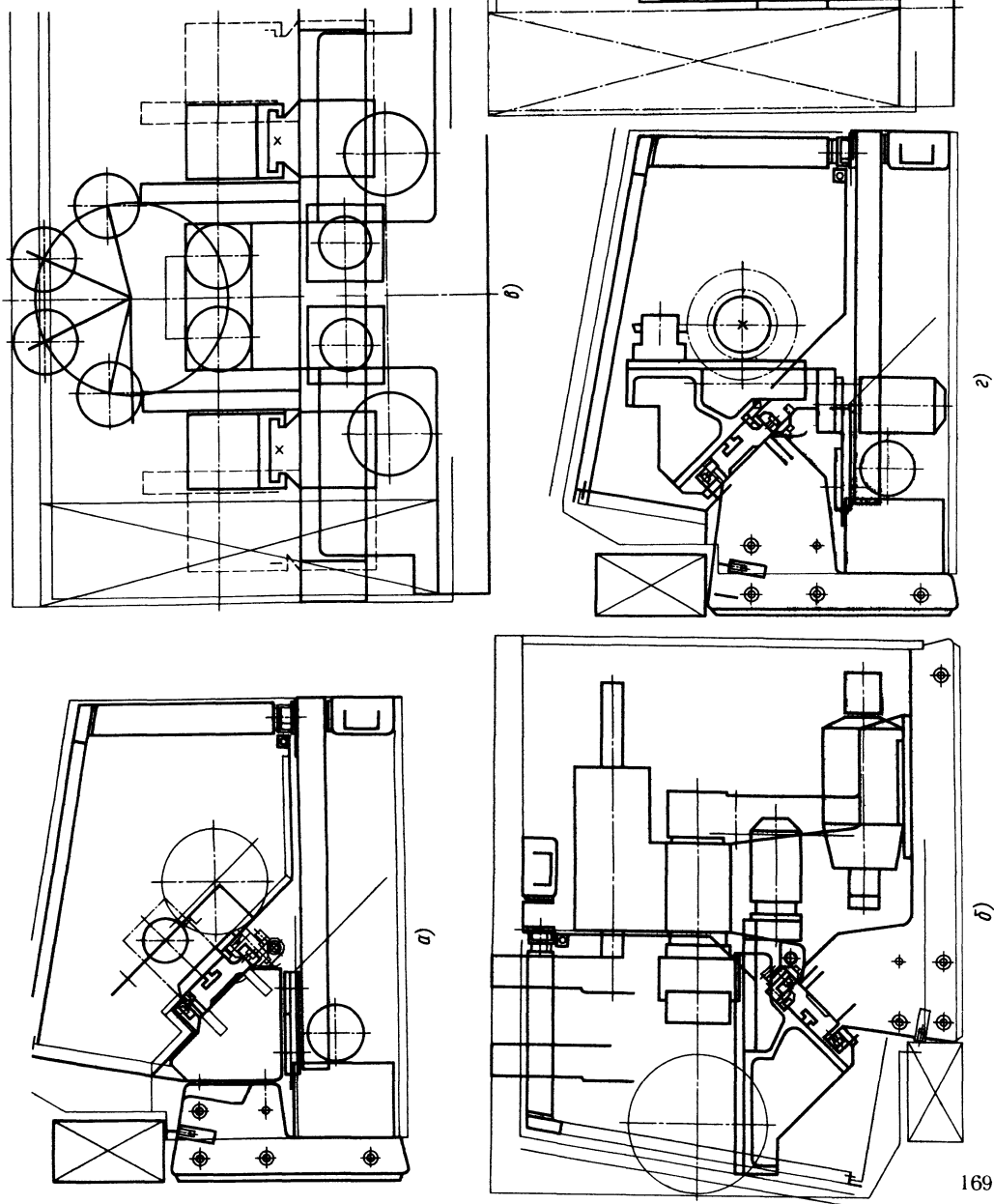


Рис. 5.21. Семейство станков на базе станка модели 17А20ПФ30: а — патронный односупортный; б — с центральным приводом для обработки концов валов; в — двухсупортный с центральным приводом; г — прутковый односупортный; д — многоцелевой двухсупортный; е — фрезерно-токарный патронный; ж — прецизионный патронно-центральной; з — для двусторонней обработки деталей (двухшпиндельный, с сегментным загрузочным устройством); и — фрезерно-центральной для обработки концов валов; к — для обработки труб вращающимся инструментом

Рис. 5.22. Примеры конструкторских разработок токарных станков на уровне концепций, полученных с применением системы САД/САМ:

а — прецизионный станок; *б*, *в* — двухшпиндельный двух- супортный фронтальный станок с ЧПУ; *г* — ручной станок с сервоприводами; *д* — патронный на базе фронтогра



матризованный поиск готовых структур, имеющих в базе данных и удовлетворяющих максимальному числу требований, сформулированных в техническом задании на проектирование ШУ (блок 1). Например, в коде технического задания на рис 5.23 использованы следующие обозначения: СС — сверление сверлами, 04—2— интервал диаметров сверл от 0,4 до 2 мм, 2— число степеней свободы вала, В— условное обозначение вала, 10—72— интервал частот вращения вала, тыс мин⁻¹, 5— окружная скорость вала, м/с, 1— число степеней свободы корпуса ШУ

В случае несоответствия выбранного варианта требованиям технического задания (блок 4) производится оценка элементов компоновки — переход на уровень II САПР

Уровень II (блоки 6—8) определяет все конструктивно обособленные элементы ШУ, набор которых позволяет получить его обобщенную компоновку без искажения пространственного расположения составных частей и их взаимосвязи. Поэтому в уровень II входят как основные узлы конструкции (вал в сборе, корпус с подшипниками, шпиндель, который часто является статором электродвигателя), так и обособленные детали, необходимые для получения завершённой компоновки на уровне I (штуцер, заглушка, кожух, цапга, втулка для крепления инструмента и др.)

Уровень III (блок 9) позволяет спроектировать детали, из которых собирается ШУ, и некоторые самостоятельные детали, не вошедшие в уровень II. Способ представления элементов на уровнях II и III — контурно-табличный, причем контуры большинства деталей, составляющих ШУ, оформляются на уровне II

Уровень IV (блок 10) — элементарный, сюда включены все конструктивные элементы, которыми (в соответствии с их функциональным назначением) могут дополняться предыдущие уровни структуры ШУ. К таким элементам относятся проточки, фаски, канавки, отверстия и т.п.

Поскольку аэроэстатические подшипники используются главным образом в высокоскоростных и малонагруженных ШУ, наиболее эффективными критериями их оптимизации (проводимой в блоке 7) являются минимум приведенной массы шпинделя и максимум жесткости несущего воздушного слоя.

Минимизируя значение приведенной массы шпинделя при известной форме его колебаний, подбирают межопорное расстояние, обеспечивая тем самым максимальную устойчивую частоту вращения шпинделя. Выходные параметры точности ШУ АП в значительной степени зависят от жесткости несущего воздушного слоя. При проектировании такого ШУ в качестве заданных величин обычно принимают параметры подводимого воздуха (давление поддува, вязкость, показатель адиабаты, газовую постоянную, температуру) и начальные параметры подшипника (диаметр и длину, число рядов дросселей и число дросселей в одном ряду). Тогда параметром, оказывающим самое сильное влияние на выходные характеристики подшипника, является отношение входного и выходного сопротивлений, т.е. сопротивлений дросселя и рабочего зазора.

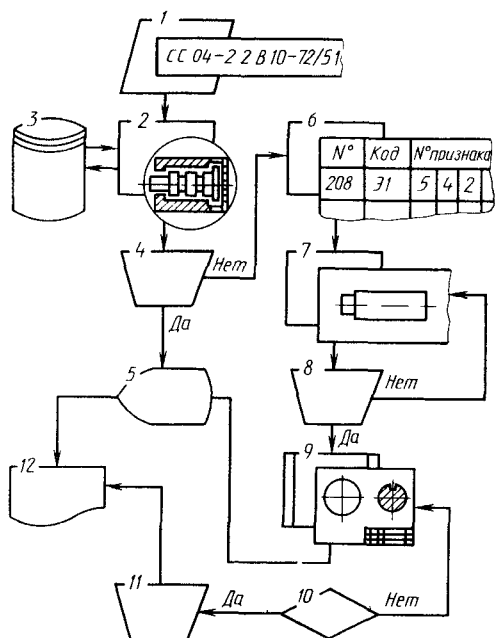


Рис. 5.23. Схема алгоритма функционирования САПР ШУ АП:

1 — ввод кода технического задания, 2 — синтез исходной компоновки, 3 — банк исходных компоновок, 4 — анализ, согласование и утверждение технического задания, 5 — отображение элементов компоновки на экране дисплея, 6 — построение таблицы иерархии элементов компоновки, 7 — доработка компоновки, расчет параметров, оптимизация, 8 — анализ, согласование и утверждение технического проекта, 9 — набор подпрограмм («Виды», «Разрезы», «Спецификации» и т.д.), 10 — проверка соответствия элементов компоновки функциональному назначению, 11 — проверка комплектности конструкторской документации рабочего проекта, 12 — печать конструкторской документации

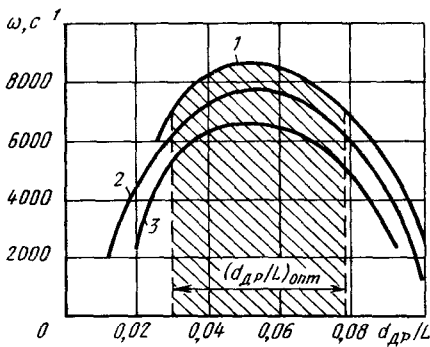
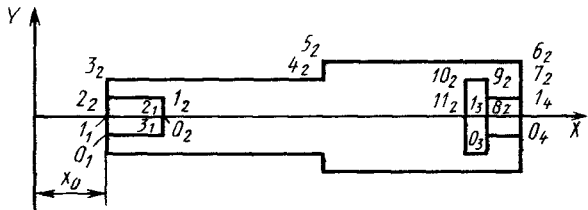


Рис 5 24 Оптимальные параметры аэроэстатического подшипника $d_{др}/L$, обеспечивающие максимальную частоту ω вращения шпинделя
1— $d_{др}=0,4$ мм 2— $d_{др}=0,2$ мм 3— $d_{др}=0,3$ мм

Оптимальные значения относительного диаметра $D_{др\text{ опт}}$ дросселя (в зависимости от относительного давления p_a) и диаметра $d_{др\text{ опт}}$ дросселя (в зависимости от величины зазора Δ в подшипнике и давления p_s поддува) обеспечивают максимальные значения жесткости подшипника [21]

Рис 5 25 Изображение объекта проектирования (ступенчатого вала), полученное с помощью САПР ШУ АП



С учетом полученного решения находят оптимальные соотношения конструктивных размеров аэроэстатического подшипника обеспечивающие максимальные значения частоты вращения шпинделя (рис 5 24) При этом про-

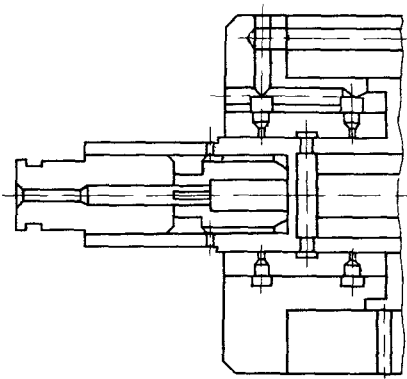


Рис 5 26 Фрагмент конструкции шпиндельного узла, полученный на плоттере с помощью САПР ШУ АП

ведена параметрическая оптимизация ШУ (уровень II САПР см рис 5 23)

В прикладной САПР любых изделий машиностроения важную роль играет автоматизированный выпуск конструкторской документации большую часть которой составляют чертежи Для реализации САПР ШУ АП был разработан пакет прикладных программ обработки графической информации КОНТУР Пакет не является узкоспециализированным и легко может быть использован для любого другого изделия как машиностроения так и других отраслей промышленности

Для ввода графической информации а также обеспечения пользователю возможности оперировать ею разработаны упрощенные геометрические математические модели графических элементов на основе контурно табличного метода При этом любой геометрический объект разбивается на ряд контуров границами которых служат реальные или мнимые поверхности

В описываемой САПР принято изображать объекты рассеченными вдоль оси без нанесения штриховки (рис 5 25) и излишней дета-

лизации Система координат расположена так что ось X проходит через ось объекта а ось Y отстоит от левого торца объекта на определенное расстояние x_0 Объект разбивают на замкнутые или разомкнутые контуры 1—4 а также линии 0_3-1_3 и 0_4-1_4 для упрощения разложения Всем точкам излома (перегиба) контура присваивают номер начиная с нулевого Координаты x и y точек всех контуров хранятся в памяти или заносятся в таблицу где N_k — номер контура N_T — номер точки (см $0_1, 1_1, 2_1, 3_1, 0_2, 1_2, 2_2, 3_2$)

При классификации конструктивные элементы ШУ группируют по конструктивному признаку (валы корпуса заглушки и т д) Кроме того в классификации используют типовой и порядковый признаки Каждый тип элемента полученной конструкции определяет показатели качества изделия

На любой стадии выполнения проектных процедур пользователь может вернуться к началу либо к промежуточному этапу разработки

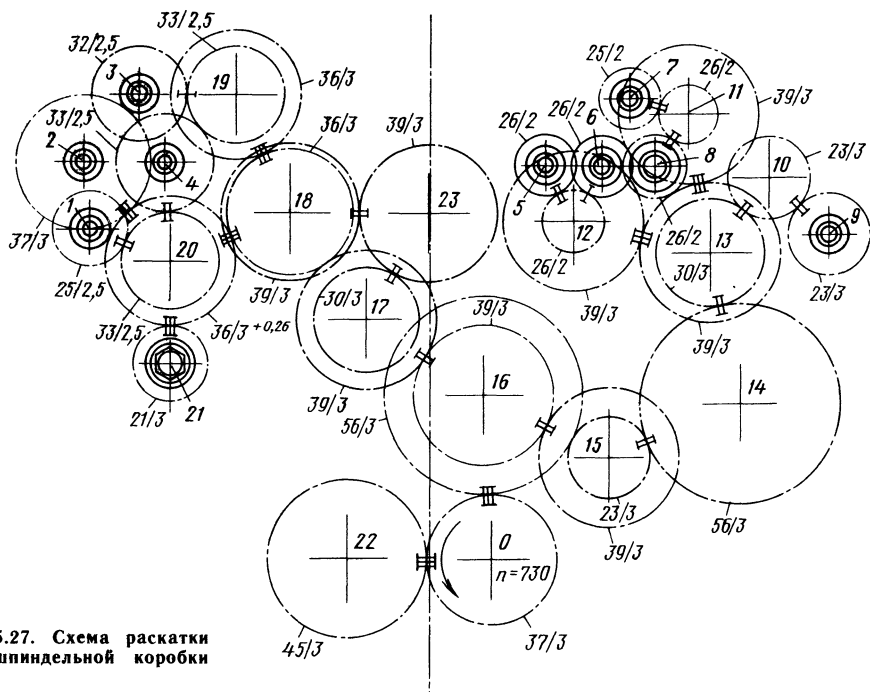


Рис. 5.27. Схема раскладки многошпиндельной коробки

что экономит машинное время. Продолжительность проектирования одного прецизионного ШУ АП средней сложности (рис. 5.26) составляет 80—100 ч при уровне автоматизации 60 %, который может быть в реальных условиях увеличен до 80 %.

Проектирование многошпиндельных коробок. Наиболее полно автоматизируют процесс конструирования узлов из унифицированных элементов и деталей. В этом случае сведения по унифицированным деталям и сборочным единицам хранятся в банке данных. ЭВМ по заданным характеристикам может выбирать детали и целые сборочные узлы. При этом значительно упрощаются формирование массивов исходных данных и выполнение вспомогательных работ, связанных с подготовкой проектной документации.

Максимальный уровень унификации среди специальных механических узлов металлорежущих станков имеют многошпиндельные коробки, а также насадки агрегатных станков и автоматических линий [19].

При автоматизированном проектировании многошпиндельных коробок и насадок на ЭВМ выполняют следующие расчеты: пересчет координат шпинделей и промежуточных валов из одной системы координат в другую; определение нагрузок на шпиндели и исполнительные органы (силовые головки, силовые столы, шпиндельные бабки); выбор комплектов шпинделей; проверку совместности сборочных еди-

ниц и деталей многошпиндельной коробки или насадки; силовой расчет деталей и узлов.

Нагрузки на каждый шпиндель и суммарные нагрузки рассчитывают с учетом их изменения во времени. При неавтоматизированном проектировании переменность нагрузок обычно не учитывают вследствие большой трудоемкости расчетов, что приводит к завышению мощности приводного электродвигателя и увеличению массы шпинделей из-за больших коэффициентов запаса прочности валов и шпинделей. Проверка совместности узлов и деталей включает проверку отсутствия касания зубчатыми колесами валов, шпинделей и корпусных деталей, а также проверку выполнения ограничений на межцентровые расстояния промежуточных валов и шпинделей. Силовой расчет деталей и узлов включает расчет частот вращения промежуточных валов, расчет и контроль отклонения частот вращения шпинделей, расчет мощности вспомогательного и рабочего ходов, расчет на прочность, жесткость и долговечность шпинделей, промежуточных валов, их опор и шпоночных соединений, расчет на изгиб и контактную прочность зубьев зубчатых колес.

Таким образом, ЭВМ используют почти на всех этапах проектирования многошпиндельных коробок и насадок, включая подготовку проектной документации, вплоть до разработки управляющих программ для обработки корпусных деталей многошпиндельных коробок. Наи-

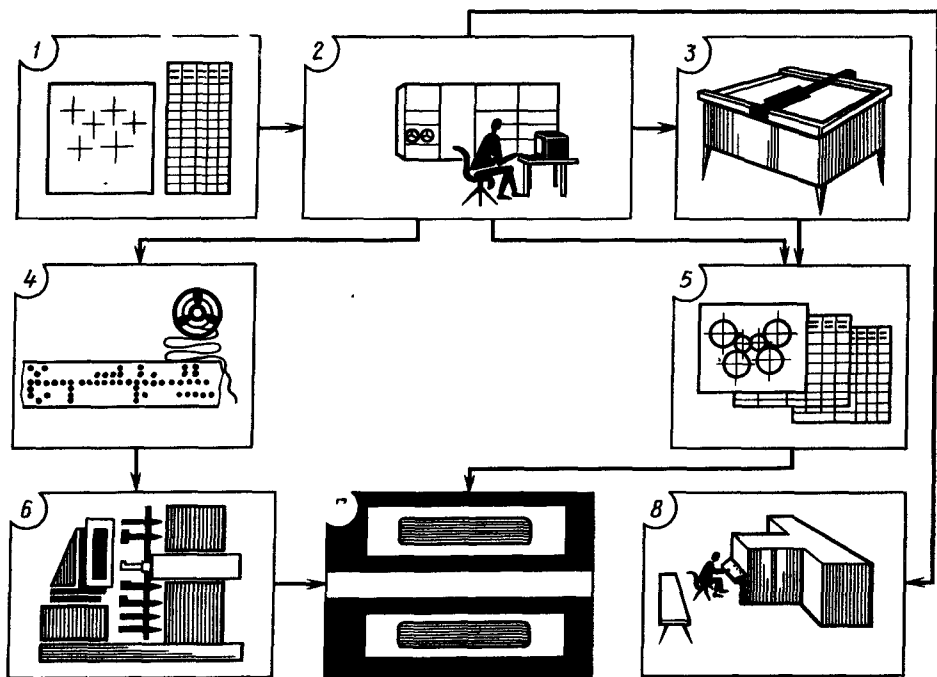


Рис. 5.28. Система автоматизированного конструирования и изготовления многошпиндельных коробок

более сложным этапом является проектирование раскатки многошпиндельной коробки или насадки. На рис. 5.27 приведена схема раскатки девятишпиндельной коробки, выполненной на графопостроителе с указанием расположения входного вала 0 ($n=730 \text{ мин}^{-1}$), шпинделей 1—9, промежуточных валов 10—20, вала для проворота шпинделей вручную 21, вала привода насоса для смазки 22, рядов, где размещаются соответствующие зубчатые колеса, чисел зубьев и модулей зубчатых колес (через косую черту).

Значительное число многошпиндельных насадок имеет однородное расположение зубчатых колес. В этом случае задача разработки раскатки значительно упрощается. В работе [2] описана программа построения раскатки однородных многошпиндельных насадок. Программа включает два этапа: создание кинематической схемы насадки и вычисление координат центров промежуточных валов, а также диаметров зубчатых колес. Если результаты второго этапа не удовлетворяют конструктивным ограничениям или условиям совместности деталей, возвращаются к первому этапу с учетом коррекции исходных данных.

Задача представляется в виде дерева, вершинами которого являются шпиндели и промежуточные валы, а дугами — межосевые расстояния. Этапы разработки раскатки много-

шпиндельной насадки реализуются с помощью соответствующих подпрограмм. Работу подпрограмм согласуют с помощью управляющей программы. При определении общей структуры кинематической схемы первая подпрограмма определяет кратчайшую сеть, связывающую центры исходных координат шпинделей и валов. Эта процедура реализуется в виде алгоритма Прима — Краскала для решения задачи Штайнера [11]. Сначала строится дерево вариантов схем раскатки многошпиндельной коробки с введением дополнительных узлов (промежуточных валов). Затем решается задача оптимизации расположения дополнительных узлов циклическим итерационным процессом релаксации [17].

Конструирование раскатки многошпиндельной коробки выполняют в диалоговом режиме. На рис. 5.28 показана система автоматизированного конструирования и изготовления многошпиндельных коробок [19].

Исходные данные 1 для проектирования вводятся в оперативную память ЭВМ СМ-4. В режиме диалога с помощью графического дисплея производится конструирование раскатки многошпиндельной коробки 2. Далее обеспечивается вывод информации на чертежно-графический автомат 3. Кроме того, подготавливаются управляющие программы 4 и конструкторская документация 5 для обработки за-

готовки 7 на станках с ЧПУ 6 Спецификация сконструированной шпиндельной коробки используется в автоматизированной системе управления производством 8

Первым шагом при автоматическом построении вариантов раскатки является упорядочение шпинделей относительно центра приводного вала. Проверяется наличие оси симметрии, и, если она есть, раскатка строится для половины многошпиндельной коробки, а другая половина берется идентичной. Построение раскатки начинается со шпинделя, который находится на максимальном расстоянии от центра приводного вала. Формируются «пучки» шпинделей, т. е. строятся варианты заземления этого шпинделя с ближайшими к нему шпинделями при условии выполнения ограничений, так, чтобы число промежуточных валов и колес было ми-

нимальным. По направлению к приводному валу строится цепь промежуточных валов, связывающая первый шпиндель с приводным валом, при этом проверяются возможности зацепления колес на промежуточных валах с другими шпинделями. Далее выбирается последний шпиндель (по величине расстояния от центра входного вала) и также кинематически соединяется с ближайшими шпинделями, причем варианты зацепления, использованные ранее, не повторяются.

Конструирование и изготовление деталей.

На рис. 5.29 показана структура системы автоматизированного конструирования и изготовления барабанных кулачков многошпиндельных автоматов, которая разработана фирмой Pitler (ФРГ). С помощью этой системы удается использовать параболическую интерполяцию профилей цилиндрических кулачков. При неавтоматизированном конструировании профили кулачков составляются преимущественно из отрезков прямых и дуг окружностей, что приводит к возникновению ускорений больших, чем при использовании параболической интерполяции. Параболическая интерполяция осуществляется подпрограммой MERCUR, информация с которой передается в процессор, подготовляющий управляющие программы 3 и 4 для оборудования с ЧПУ. Преимуществом данной системы является автоматизация как конструирования, так и изготовления барабанных кулачков.

В рассмотренной системе машинного конструирования цилиндрических кулачков опорные точки профиля задаются конструктором, а ЭВМ производит интерполяцию по этим точкам.

Автоматизированное проектирование отдельных узлов и деталей должно осуществляться в общей концепции проектирования станка и только тогда принесет действительный экономический эффект.

Список литературы

- 1 Автоматизированное проектирование гибких производственных систем/А. И. Левин, Л. Ю. Лишинский, С. В. Пичев и др. // Станки и инструмент 1987 № 3 С 4—7
- 2 Борщевский В. М., Лившиц Э. М. Построение с помощью ЭВМ кинематической схемы однорядных многошпиндельных насадок//Станки и инструмент, 1977 № 11 С 19—20
- 3 Васильев Г. Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков М. Машиностроение, 1987 280 с
- 4 Васильев Г. Н. Компоночное проектирование станков и станочных систем М. ВНИИ ТЭМР, 1989 60 с

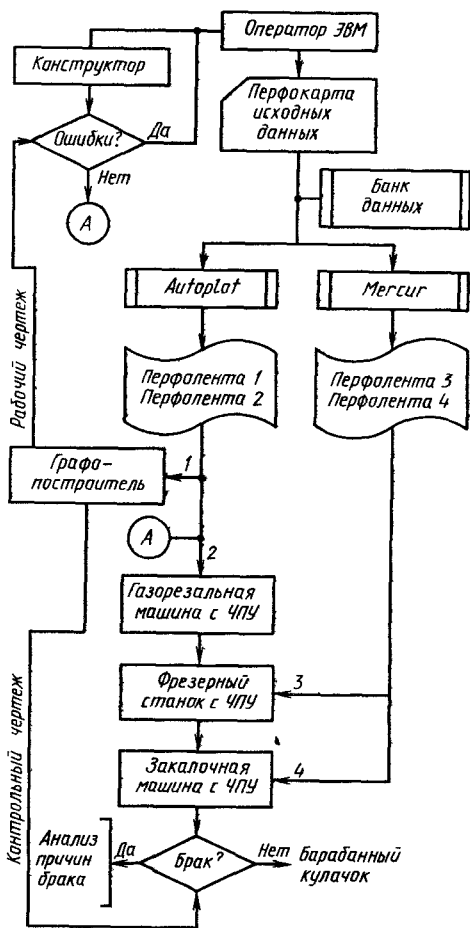


Рис. 5.29. Структурная схема системы автоматизированного конструирования и изготовления барабанного кулачка многошпиндельного автомата

- 5 **Васильев Г. Н.** Оптимальное проектирование станочных систем//Известия ВУЗов 1987 № 10 С 142—153
- 6 **Геминтерн В. И., Каган Б. М.** Методы оптимального проектирования М Энергия, 1980 160 с
- 7 **Гладков Д. И.** Оптимизация систем неградиентным случайным поиском М Энергоатомиздат, 1984 256 с
- 8 **Дашенко А. И., Белоусов А. П.** Проектирование автоматических линий М Высшая школа, 1983 228 с
- 9 **Итин А. М., Пуш А. В.** Особенности автоматизированного проектирования станков на ранних стадиях//Станки и инструмент 1991 № 11 С 9—12
- 10 **Кривомазов Д. В., Шалаев П. А.** Стандартизация в области систем автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов в машиностроении Учебное пособие М Изд во стандартов, 1987 152 с
- 11 **Кристофидес Н.** Теория графов Алгоритмический подход/Пер с англ М Мир, 1978 432 с
- 12 **Левина З. М., Астафьев А. М.** Расчеты при автоматизированном проектировании шпиндельных узлов//Станки и инструмент 1981 № 6 С 4—8
- 13 **Металлорежущие станки и автоматы/** А С Проников, Н И Камышный, Л И Волчеквич и др Учебник для машиностроительных вузов Под ред А С Проникова М Машиностроение, 1981 479 с
- 14 **Металлорежущие станки/** В Э Пуш, В Г Беляев, А А Гаврюшин и др Учебник для машиностроительных вузов Под ред В Э Пуша М Машиностроение, 1985 256 с
- 15 **Наянзин Н. Г., Романов В. Ф.** Оптимизация размещения инструментов в магазине многоцелевого станка//Станки и инструмент 1968 № 1 С 27—29
- 16 **Опитц Г.** Современная техника производства, состояние и тенденции/Пер с нем Под ред В С Васильева М Машиностроение, 1975 280 с
- 17 **Поляк Б. Т.** Введение в оптимизацию М Наука, 1983 384 с
- 18 **Проников А. С.** Программный метод испытаний металлорежущих станков М Машиностроение, 1985 288 с
- 19 **Пути** повышения качества агрегатных станков и автоматических линий на стадии проектирования/Г И Плашей, О М Борисевич, Н У Марголин и др М НИИМаш, 1980 36 с
- 20 **Пуш А. В.** Многокритериальная оптимизация шпиндельных узлов//Станки и инструмент 1987 № 4 С 14—18
- 21 **Пуш А. В., Шолохов В. Б., Сергеев М. В.** САПР шпиндельных узлов с аэростатическими подшипниками//Станки и инструмент 1989 № 12 С 18—21
- 22 **Расчетный анализ** деформационных, динамических и температурных характеристик шпиндельных узлов при проектировании Методические рекомендации/Сост З М Левина и др М ЭНИМС, 1989 64 с
- 23 **Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.** Оптимизация в технике В 2-х кн Кн 1/Пер с англ М Мир, 1986 349 с
- 24 **Системы автоматизированного проектирования** Учебное пособие для вузов В 9 кн Кн 6 Автоматизация конструкторского и технологического проектирования/Под ред И П Норенкова М Высшая школа, 1988 191 с
- 25 **Системы автоматизированного проектирования** Учебное пособие для вузов В 9 кн Кн 1 Принципы построения и структура/И Н Норенков и др М Высшая школа, 1986 127 с
- 26 **Снесарев А. М.** Оптимизация размещения технологического оборудования гибких производственных систем//Станки и инструмент, 1987, № 8 С 2—4
- 27 **Соболь И. М., Статников Р. Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями М Наука, 1981 108 с
- 28 **Хофер Э., Лундерштедт Р.** Численные методы оптимизации Пер с нем /Под ред В В Семенова М Машиностроение, 1981 192 с
- 29 **Figner M., Maier H.** Einstieg in CAD Carl Hauser Verlag München — Wien, 1985 396 S

Глава 6

Работоспособность станков

6.1. Показатели и критерии работоспособности станка

Основной задачей при проектировании станка является создание работоспособной конструкции, в которой значения всех выходных параметров соответствуют требованиям нормативно-технической документации (ГОСТ 27.002—83).

Номенклатура и допустимые значения показателей, которые характеризуют работоспособность станка, устанавливают исходя из требований, предъявляемых к его техническому уровню; при этом особое значение имеют выходные параметры станка, связанные с его точностью (см. гл. 2).

Нарушение работоспособности станка, т. е. его отказ, может выражаться как в прекращении его функционирования в результате поломки, заклинивания, замыкания и других причин (отказ функционирования), так и в выходе значений, установленных для параметров станка, за допустимые пределы (параметрический отказ).

Для станка наиболее характерны параметрические отказы нарушающие его работоспособность, когда он может функционировать, но с более низкими техническими показателями или с меньшей эффективностью.

Работоспособность станка по выходным параметрам оценивают путем сравнения области работоспособности с областью состояний.

Область состояний — это область, в которой с заданной вероятностью находятся регламентированные выходные параметры станка. В общем случае это многомерное пространство, поскольку для каждого станка устанавливается несколько показателей, которые должны находиться в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Для независимых выходных параметров эта область может быть представлена в виде набора отдельных областей состояний для каждого параметра. Область состояний является комплексной характеристикой качества станка, так как определяет его реакцию на внешние и внутренние воздействия. Чем меньше область

состояний, тем выше начальное качество станка, а чем медленнее она изменяется во времени, тем выше его надежность.

Область работоспособности — это область допустимых значений выходных параметров. Для выходных параметров, характеризующих точность станка, ее устанавливают, исходя из требований к точности обработанных деталей (см. п. 2.3).

Работоспособным будет станок, для которого область состояний находится внутри области работоспособности.

При эксплуатации станка изменяется (как правило, увеличивается) область состояний выходных параметров. Это связано с тем, что при эксплуатации станок подвергается многочисленным внешним и внутренним воздействиям. Все виды энергии, в первую очередь механическая и тепловая, действуя на станок и его механизмы, вызывают в нем целый ряд нежелательных процессов, создают условия для ухудшения его технических характеристик.

Часть процессов, происходящих в станке и влияющих на его технические характеристики, обратимы, так как они изменяют параметры деталей, узлов и всей системы в определенных пределах, без тенденции прогрессивного ухудшения. Наиболее характерный пример обратимых процессов — деформации узлов и деталей станков, происходящие под действием внешних и внутренних сил или тепловых полей.

Необратимые процессы, например изнашивание, коррозия, приводят к постепенному ухудшению с течением времени технических характеристик станка. Все процессы влияют на характеристики станка, вызывают погрешности в его функционировании и снижают качество заданного технологического процесса.

На изменение показателей качества станка влияет скорость процессов, действующих на его узлы и механизмы. По скорости протекания все процессы можно разделить на три категории.

Быстропротекающие процессы имеют периодичность, измеряемую обычно долями секунды. Эти процессы заканчиваются в пределах цикла

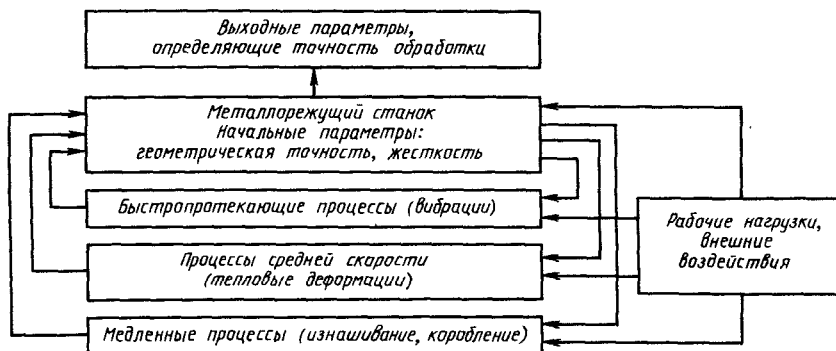


Рис. 6.1. Влияние различных процессов на начальные параметры станка

работы станка и вновь возникают при обработке следующей заготовки. К ним относятся вибрация узлов, изменения сил трения в подвижных соединениях, колебания рабочих нагрузок и другие процессы, влияющие на взаимное положение инструмента и заготовки в каждый данный момент времени и снижающие точность обработки.

Процессы средней скорости протекают за время непрерывной работы станка, и их длительность измеряется обычно в минутах или часах. Они приводят к изменению начальных параметров станка. К этой категории относятся как обратимые процессы, например изменения температурных полей станка и температуры окружающей среды, так и необратимые, например процесс изнашивания режущего инструмента, который протекает во много раз интенсивнее, чем процесс изнашивания деталей и узлов станка.

Медленные процессы протекают в течение всего периода эксплуатации станка и проявляются, как правило, между его периодическими ремонтами. Они длятся дни и месяцы. К таким процессам относятся изнашивание основных механизмов станка, перераспределение внутренних напряжений в корпусных деталях, ползучесть металлов, загрязнение поверхностей трения, коррозия, сезонные изменения температуры. Эти процессы влияют на точность, а также на КПД и другие характеристики станка, но изменения их происходят очень медленно.

На рис. 6.1 приведена схема, на которой показано влияние различных процессов на начальные параметры станка. Эти взаимодействия достаточно сложны и имеют обратные связи, когда возникающие изменения начальных параметров станка влияют на характеристики протекающих процессов. Например, тепловые деформации отдельных звеньев станка могут не только исказить взаимное положение его узлов и этим повлиять на точность обработки,

но и привести к повышенным нагрузкам и, как следствие, к более интенсивному тепловыделению в механизмах.

Для обеспечения работоспособности станка необходимо не только иметь заданные начальные характеристики станка, но и создать такую конструкцию, которая имела бы высокую сопротивляемость по отношению к воздействию различных процессов, изменяющих его выходные параметры.

Основные критерии работоспособности станка следующие:

- 1) геометрическая и кинематическая точность;
- 2) статическая жесткость;
- 3) вибростойкость;
- 4) теплостойкость (сопротивляемость температурным деформациям);
- 5) износостойкость;
- 6) коррозионная стойкость;
- 7) сопротивление усталости;
- 8) сопротивляемость короблению.

Основную роль играют первые пять критериев, связанных как с начальными характеристиками (критерии 1 и 2) станка, так и с быстропротекающими (критерий 3), средней скорости (критерий 4) и медленными процессами (критерий 5). Критерии 6, 7 и 8 также относятся к медленно протекающим процессам, но они характерны для специфических деталей и условий работы станка. Коррозионная стойкость к внешним воздействиям связана главным образом с недопустимыми методами эксплуатации, транспортирования и хранения станков. Коррозия может проявляться также под действием СОЖ при плохом ее составе.

Сопротивление усталости характерно для условий работы кинематических пар (подшипники и направляющие качения, зубчатые передачи). Коробление характерно для станин и крупных корпусных деталей станков, расчет которых и соответствующие критерии работоспособности для различных деталей и узлов станка

рассмотрены в т. 2 данного справочника. Основные критерии работоспособности рассмотрены ниже.

6.2. Геометрическая и кинематическая точность станка

Геометрическая и кинематическая точность станка характеризует точность перемещения его формообразующих узлов без силовых и тепловых воздействий. Поэтому эти характеристики связаны в основном с точностью изготовления и сборки станка, т. е. с технологическими факторами. Высокие требования к точности современных станков определяют строгие допуски на точность перемещения и положения рабочих органов, связанных с геометрией станка, как с его исходной характеристикой.

По точности станки подразделяют на пять классов.

Класс Н — станки нормальной точности, обеспечивают обработку деталей примерно по 8—7-му квалитетам точности.

Класс П — станки повышенной точности, изготовлены преимущественно на базе станков класса Н, но с более высокими требованиями к точности базовых деталей (шпиндель и его опоры, направляющие и др.).

Класс В — станки высокой точности, которая обеспечивается за счет специальной конструкции отдельных элементов, более высокого качества их изготовления и эксплуатации станка в специальных условиях.

Класс А — станки особо высокой точности, изготовленные с более строгими допусками, чем станки класса В.

Класс С — сверхточные станки — специальные мастер-станки, предназначенные для изготовления прецизионных деталей станков, машин и приборов, от точности которых зависит получение требуемых характеристик изделия (делительные и эталонные колеса, измерительные винты и др.).

Допускаемые отклонения для регламентированных нормативами показателей точности станков при переходе от класса к классу составляют геометрическую прогрессию со знаменателем $\varphi = 1,6$.

В западных странах применяют аналогичную градацию станков на пять классов точности: обычный (без обозначения), высокий (*H*), прецизионный (*P*), суперпрецизионный (*SP*) и ультрапрецизионный (*UP*).

Перечень параметров, характеризующих геометрическую и кинематическую точность станков данного типа, методы их проверки и допустимые отклонения параметров регламентированы соответствующими стандартами. Обобщенным стандартом является ГОСТ 22267—76 «Станки металлорежущие. Схемы и способы

измерений геометрических параметров», в котором приведены методы и указаны метрологические средства, применяемые для проверок геометрической и кинематической точности станков различных типов. Нормы точности (допускаемые отклонения измеряемых параметров станка) приведены в стандартах «Станки металлорежущие. Нормы точности» на следующие станки:

токарно-револьверные (ГОСТ 17—70), внутрিশлифовальные (ГОСТ 25—80)*, долбежные (ГОСТ 26—75)*, плоскошлифовальные с круглым выдвинутым столом и вертикальным шпинделем (ГОСТ 27—88)*, продольно-строгальные (ГОСТ 35—85Е)*, автоматы прутковые многошпиндельные (ГОСТ 43—85Е)*, токарно-карусельные (ГОСТ 44—85Е)*, плоскошлифовальные с крестовым столом (ГОСТ 273—77)*, вертикально-сверлильные (ГОСТ 370—81Е)*, отделочно-расточные вертикальные (ГОСТ 594—82), зубодолбежные (ГОСТ 658—89Е), зубофрезерные (ГОСТ 659—78Е), плоскошлифовальные с круглым столом (ГОСТ 871—71), резьбофрезерные (ГОСТ 1797—78), хонинговальные и притирочные (ГОСТ 2041—78Е), полуавтоматы токарные многошпиндельные (ГОСТ 6819—84Е)*, зубошлифовальные (ГОСТ 7640—76Е)*, резьбошлифовальные (ГОСТ 8716—81)*, токарно-продольные автоматы (ГОСТ 8831—79Е), зуборезные для конических колес (ГОСТ 9152—83Е, ГОСТ 9153—83Е), фрезерные вертикальные с крестовым столом (ГОСТ 9726—89Е)*, профильно-шлифовальные (ГОСТ 9735—87), круглошлифовальные (ГОСТ 11654—84)*, зубошлифовальные с червячным (ГОСТ 13086—77Е) и профильным (ГОСТ 13133—77Е) кругом, продольно-шлифовальные (ГОСТ 13135—80Е)*, зубошлифовальные для конических колес (ГОСТ 13142—83), зубошвинговальные (ГОСТ 13281—77Е)*, круглошлифовальные бесцентровые (ГОСТ 13510—84Е)*, полуавтоматы протяжные горизонтальные (ГОСТ 16015—83Е)* и вертикальные (ГОСТ 16025—83Е)*, фрезерные консольные (ГОСТ 17734—88Е)*, токарные и токарно-винторезные (ГОСТ 18097—88Е)*, координатно-расточные и координатно-шлифовальные (ГОСТ 18098—87), автоматы токарно-револьверные (ГОСТ 18100—80)*, продольно-фрезерные (ГОСТ 18101—85Е)*, электроэрозионные (ГОСТ 20551—82Е), бабки расточные агрегатных станков (ГОСТ 21186—87)*, бабки фрезерные агрегатных станков (ГОСТ 22410—87)*. В ГОСТах, отмеченных звездочкой, приведены также и нормы жесткости.

Каждым стандартом предусмотрено обычно 20—30 проверок, осуществляемых, как правило, при ручном перемещении формообразующих узлов станка или при их перемещении на малых скоростях без нагрузок и отражаю-

щих поэтому совершенство станка по точности с позиций его геометрии и кинематики

В стандарты «Нормы точности» включена также проверка точности и шероховатости образца изделия, конфигурация и материал которого установлены стандартом. Образцы обрабатывают на чистовых режимах. Полученные результаты не могут служить достаточно полной характеристикой точности станка и для этой цели требуется проведение специальных испытаний, учитывающих весь диапазон силовых и тепловых нагрузок и характеристики номенклатуры обрабатываемых деталей (см п 17.3)

Перечень проверок точности и соответствующие нормативы, указанные в стандартах, отражают специфику станков данного типа и применяемого метода обработки. По характеру проверки можно разбить на следующие группы:

1 Точность движения радиальное и осевое биение шпинделя, торцевое и осевое биение планшайбы (стола), прямолинейность перемещения суппорта (стола), постоянство углового положения рабочей поверхности стола при его перемещении, точность дискретных перемещений

2 Точность взаимного положения и движения параллельность движения суппорта оси шпинделя, перпендикулярность оси шпинделя к поверхности стола, соосность или параллельность двух шпинделей, взаимная перпендикулярность продольного и поперечного перемещения стола

3 Точность позиционирования (установки) точность перемещения стола (суппорта) в заданное положение, точность фиксации углового положения при повороте револьверной головки (шпиндельного блока) точность ручной установки линейных (угловых) положений рабочего органа по измерительным шкалам

4 Кинематическая точность точность передаточного отношения шпиндель — ходовой винт (токарно-винторезные станки), точность взаимного движения продольного и поперечного перемещения крестового стола (обработка фасонных профилей), точность взаимного перемещения (поворота) шпинделя и стола (зуборезные станки)

5 Точность поверхностей, определяющих положение заготовки и инструмента плоскостьность рабочей поверхности стола, точность Т разных пазов стола и их параллельность, точность положения конического отверстия шпинделя, торцевое и радиальное биение базовых поверхностей шпинделя (фланцевый конец)

6 Точность направляющих поверхностей плоскостьность направляющих скольжения, извернутость направляющих

Приведенные примеры проверок являются наиболее типичными, но не исчерпывают всех ви-

дов измерений, указанных в соответствующих стандартах. Первые четыре группы проверок непосредственно связаны с выходными параметрами станка, т. е. с характеристиками траекторий перемещений формообразующих узлов

Проверки, оценивающие точность поверхностей станка, служащих для базирования инструмента и заготовки (группа 5), характеризуют точность соединения компонентов технологической системы. Стандартные проверки, связанные с оценкой точности направляющих поверхностей (группа 6), не относятся непосредственно к определению точности станка, так как в данном случае измеряются характеристики его элемента, а не выходные параметры. Эти проверки необходимы в связи с тем, что направляющие и, в первую очередь, точность их геометрических форм во многом определяют точность движения формообразующих узлов станка.

Основные проверки связаны с определением погрешностей движения формообразующих узлов, так как от этого зависит реализуемая на станке точность обработки.

Поскольку положение твердого тела в пространстве определяется шестью степенями свободы, необходимо в общем виде определять шесть погрешностей, характеризующих отклонение этого движения от идеального. При этом каждая из погрешностей участвует в формировании погрешностей детали.

На рис. 6.2 приведены схемы для оценки погрешностей движения двух основных типов формообразующих узлов станка при поступательном (рис. 6.2, а) и вращательном (рис. 6.2, б) движениях [12]. При поступательном движении стола (суппорта, ползуна и т. п.) вдоль оси X (рис. 6.2, а), во первых, возникают погрешности линейного положения, которые отнесены к опорной точке O стола. Они определяют погрешность позиционирования δx в направлении движения и погрешности δy и δz , характеризующие отклонение от прямолинейности в двух взаимно перпендикулярных направлениях (по осям Y и Z). Во вторых, возникают угловые отклонения в движении стола относительно соответствующих осей. Угловая погрешность $\delta\varphi(x)$ относительно оси X связана с «извернутостью» направляющих или с погрешностями тел качения. Колебания относительно поперечной оси $\delta\varphi(y)$ и вертикальной оси $\delta\varphi(z)$ («рыскание») также связаны в основном с погрешностью формы и положения направляющих, а при движении под нагрузкой также и с жесткостью системы.

При вращательном движении (рис. 6.2, б) имеет место аналогичная картина: возникают угловые погрешности $\delta\varphi(z)$, связанные с точностью позиционирования, и угловые погреш-

ности $\delta\varphi(x)$ и $\delta\varphi(y)$, определяющие перекос при движении относительно осей X и Y . Линейные погрешности, отнесенные к центру планшайбы, — это осевое (δz) и радиальное (δx и δy) биение.

Для станков нормальной точности, как правило, измеряют не все погрешности, а лишь те, которые в наибольшей степени влияют на точность обработки (например, точность позиционирования стола, радиальное и осевое биение шпинделя). Чем выше требования к точности станка (выше его класс точности), тем измеряют большее число параметров, характеризующих положение и движение узла.

Для определения геометрической и кинематической точности станка применяют разнообразные метрологические средства и оснастку. Если при основных проверках (группы 1—4), характеризующих выходные параметры станка, примененный метод измерения позволяет оценить эти параметры не только при перемещении узлов без нагрузок, но и при рабочих режимах станка (в процессе обработки), то полученные результаты будут полностью характеризовать точность станка с учетом его силовых и тепловых деформаций. Для этой цели обычно не пригодны контактные измерительные приборы, часто применяемые при проверке геометрической точности станка.

В табл. 6.1 приведены примеры схем для измерения геометрической и кинематической точности станков с применением контактных методов, используемых в стандартных проверках, и современных методов, позволяющих оценить параметры траекторий формообразующих узлов станка. Приведены схемы следующих проверок точности:

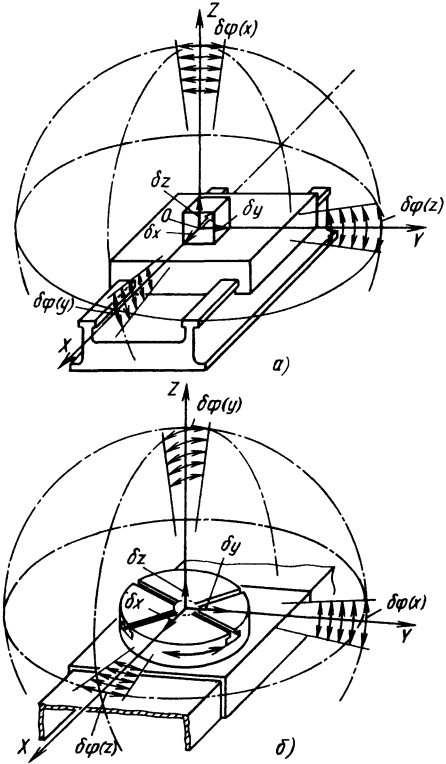
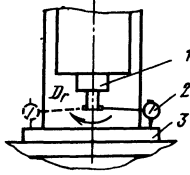
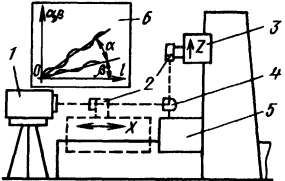
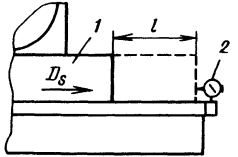
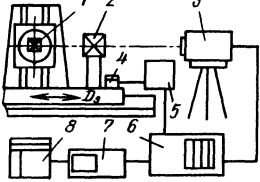
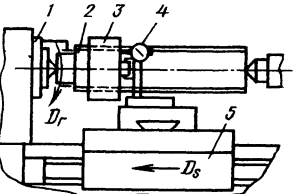
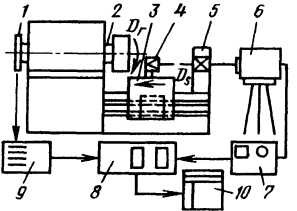


Рис. 6.2. Погрешности, возникающие при движении формообразующих узлов станка

6.1. Схемы измерения точности станка

| Группа проверки | Метод измерения | |
|-------------------|---|---|
| | Контактный | Бесконтактный |
| Точность движения | <p>1 — шпиндель; 2 — оправка; 3 — индикаторы (датчики) линейных перемещений</p> | <p>1 — датчик угла поворота шпинделя; 2 — шпиндель; 3 — эталонный шарик; 4 — бесконтактные измерительные преобразователи перемещений; 5 — блок обработки данных; 6 — осциллоскоп; 7 — дисплей</p> |

| Группа проверки | Метод измерения | |
|------------------------------|--|---|
| | Контактный | Бесконтактный |
| Точность взаимного положения |  <p>1 — шпиндель; 2 — индикатор; 3 — стол</p> |  <p>1 — лазер; 2 — четырехквadrантный фотодиод; 3 — шпиндельная бабка; 4 — пентапризма; 5 — стол; 6 — диаграмма результатов измерения; l — перемещение стола или бабки; α — отклонения от перпендикулярности; β — погрешность установки</p> |
| Точность позиционирования |  <p>1 — стол; 2 — индикатор</p> |  <p>1 — отражатель, установленный на шпинделе; 2 — интерферометр; 3 — лазер; 4 — датчики давления воздуха и температуры; 5 — компенсатор; 6 — лазерное вычислительное устройство; 7 — блок обработки данных; 8 — блок регистрации данных</p> |
| Кинематическая точность |  <p>1 — шпиндель; 2 — эталонный ходовой винт; 3 — гайка; 4 — индикатор; 5 — суппорт</p> |  <p>1 — датчик угла поворота; 2 — шпиндель; 3 — суппорт; 4 — отражатель; 5 — интерферометр; 6 — лазер; 7 — блок обработки данных; 8 — блок сравнения; 9 — блок преобразования данных; 10 — блок обработки и регистрации данных</p> |

а) измерение радиального и осевого биения шпинделя,

б) измерение радиального и осевого биения шпинделя и траектории перемещения оси шпинделя,

в) измерение отклонения от перпендикулярности оси шпинделя относительно поверхности стола,

г) измерение отклонения от перпендикулярности двух движений (стола и шпиндельной бабки) с использованием калиброванного лазерного источника,

д) измерение точности позиционирования стола,

е) измерение точности позиционирования стола с использованием лазерного интерферометра,

ж) измерение точности передаточного отношения «шпиндель — суппорт» с помощью эталонного ходового винта,

з) измерение точности передаточного отношения «шпиндель — суппорт» с помощью лазерного интерферометра

Контактные методы требуют во многих случаях применения специальных контрольных оправок и точной оснастки (угольники, линейки, эталонные ходовые винты и др.), вносящих дополнительные погрешности в получаемые результаты. Этими методами, как правило, измеряют предельные отклонения и они мало приспособлены для измерения параметров траекторий узлов станка. Стандартные проверки позволяют оценить лишь нахождение данного параметра в пределах допуска.

Бесконтактные методы измерения обеспечивают более широкие возможности оценки выходных параметров станка, характеризующих его точность. Они позволяют автоматизировать процесс измерения и получить массив данных при многократных измерениях, фикси-

ровать результаты графически, на дисплее или в виде протокола испытаний, перерабатывать информацию с оценкой более широкой номенклатуры показателей, характеризующих точность станка.

Численные значения допустимых отклонений при различных проверках зависят от типа, размера и класса точности станка. В среднем порядок отклонений для станков средних размеров нормальной точности находится в пределах 10—30 мкм. Для станков классов А и С эти отклонения от нескольких микрометров до десятых долей микрометра и выше. Для сверхпрецизионных станков достигнута точность обработки, которая измеряется тысячными долями микрометра (нано технология).

В табл. 6.2 приведены средние значения допустимых отклонений Δ образцов, обработанных на станках средних размеров (наибольший диаметр заготовки $D = 320$ мм и длина $L = 1000$ мм) нормальной точности Н [8]. Для станков с другими размерами D_1 и L_1 эти значения изменяются соответственно в

$$\left(\sqrt{D_1/320}\right) \text{ и } \left(\sqrt{L_1/1000}\right)$$

раз. Для станков более высокой точности для каждого последующего класса значения Δ уменьшаются в $\varphi = 1,6$ раз, а для классов А и С могут назначаться более жесткие допуски на Δ .

Характеристики геометрической и кинематической точности, относящиеся к движению и положению формообразующих узлов станка, являются результатом суммирования погрешностей отдельных элементов станка, которые образуют размерную цепь от инструмента до заготовки. Теория размерных цепей проф. Б. С. Балакшина [2] и развитые на ее базе точностные расчеты станков [1, 8] позволяют

6.2. Средние значения допустимых отклонений Δ образцов, обработанных на станках класса Н

| Проверяемый параметр | Размер образца d, l, b мм | Δ мкм |
|--|--|--|
| Точность цилиндрической поверхности | $d \geq D/8$ $l \geq 8d$ при обработке в центрах, $l \leq D$ при обработке в патроне | $d_{\max} - d_{\min} = 16$ |
| Плоскостность торцевой поверхности тела вращения | $d \geq D/2$ | 14 |
| Плоскостность поверхности | $l \geq 0,6L$ ($b \geq 0,3B$) | 36 (выпуклость не допускается) |
| Точность винтовой линии | $l \approx D$ для токарно-винторезных станков, $l = 0,75L$ для специализированных станков | 72 при $l = 1000$ мм (накопленная погрешность) |
| Точность межосевого расстояния | $l \cdot b = 0,6$ площади стола | 90 |
| Точность окружных шагов зубчатого колеса | $d = 0,5D, b \geq 0,1D$ $d = D, b \geq 0,1D$ | $\Delta_0 = 55, \Delta_n = 180$ $\Delta_0 = 40, \Delta_n = 125$ |

Обозначения D — наибольший диаметр обработанной поверхности, L — наибольшая длина обработки, B — ширина стола, Δ_0 — предельная разность соседних окружных шагов зубьев, Δ_n — предельная накопленная погрешность окружных шагов.

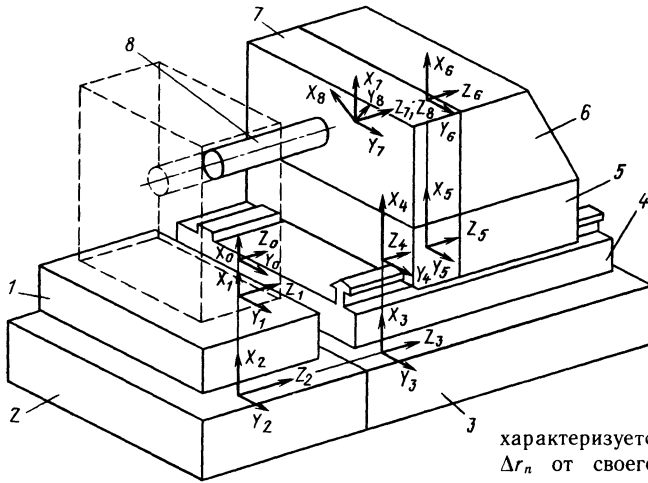


Рис. 6.3. Формирование суммарной погрешности агрегатно-расточного станка: 1— приспособление; 2— боковая станина; 3— центральная станина; 4— направляющая плита; 5— подвижная платформа; 6— упорный угольник; 7— инструментальная бабка; 8— шпиндель

оценить вклад элементарных погрешностей станка в формирование выходных параметров точности. Для примера на рис. 6.3 представлена схема агрегатно-расточного станка, скомпонированного из унифицированных узлов [4]. Этот станок является одной из позиций автоматической линии. К станку предъявляют повышенные требования точности, особенно к положению подвижной платформы. Для оценки суммарной погрешности обработки Δr_n (расточивания отверстия диаметром $2r$) рассматривают последовательный переход от одной системы координат к другой, построенных на базовых поверхностях сопряженных узлов станка. При этом учитываются смещение и поворот осей каждой системы по отношению к исходной и влияние этих погрешностей на погрешность обработки, вносимую станком.

Обрабатываемую поверхность представляют в виде совокупности точек, каждая из которых

6.3. Звенья формообразующей системы расточного станка

| Звено | Система координат (см. рис. 6.3) | Направление перемещения относительно предыдущего звена |
|------------------------|----------------------------------|--|
| Заготовка | S_0 | — |
| Приспособление | S_1 | X_1 |
| Боковая станина | S_2 | X_2 |
| Центральная станина | S_3 | Z_3 |
| Направляющая плита | S_4 | X_4 |
| Подвижная платформа | S_5 | Z_5 |
| Упорный угольник | S_6 | X_6 |
| Инструментальная бабка | S_7 | Z_7 |
| Шпиндель | S_8 | Φ_8 |

характеризуется координатами и отклонением Δr_n от своего номинального положения по нормали к данной поверхности. Баланс погрешностей положения точки имеет вид

$$\Delta r_n = \sum_{i=1}^N a_i \delta_i, \text{ где } a_i \text{ — передаточный коэффициент}$$

для i -й элементарной погрешности; N — число элементарных погрешностей (в рассматриваемом случае $N=9$); δ_i — элементарная погрешность, вносимая i -м узлом.

В табл. 6.3 указаны звенья формообразующей системы станка и соответствующие им системы координат.

Для определения суммарной погрешности Δr_n оценивают (экспериментально или расчетным путем) направление и величину наибольших смещений данного звена относительно предыдущего и определяют передаточные коэффициенты a_i , оценивающие влияние данного звена на погрешность обработанной поверхности.

Передаточные коэффициенты для погрешностей двух элементов силового стола (направляющей плиты и подвижной платформы) для операции растачивания приведены в табл. 6.4.

Методика аналитического и матричного методов суммирования элементарных погрешностей формообразующей системы станка и оценка точности положения конечного звена станка, определяющего точность обработки, рассмотрена в работах [8] и [1].

Основные методы повышения геометрической и кинематической точности станков связаны с технологией их изготовления — с точностью обработанных сопрягаемых поверхностей и в первую очередь таких элементов, как направляющие качения и скольжения, шпиндельные опоры, пары ходовой винт — гайка, червячные делительные передачи.

Методы изготовления точных деталей станков рассмотрены в специальной литературе

6.4. Передаточные коэффициенты для оценки влияния плиты и платформы расточного станка на выходную погрешность

| Источник погрешности | δ_i | Передаточный коэффициент q_i | Характер выходной погрешности |
|----------------------|--------------------------------|---|---|
| Направляющая плита | δ_{x4} | $\cos \varphi$ | Смещение оси растачиваемого отверстия от номинального положения по оси X То же, по оси Y |
| | δ_{y4} δ_{z4} | $\sin \varphi$ 0 | |
| | α_4 | $-(Z_n + Z_5 + Z_7) \sin \varphi$ | Перекося оси растачиваемого отверстия в горизонтальной плоскости То же, в вертикальной плоскости Смещение оси растачиваемого отверстия от номинального положения по оси Y |
| | β_4 | $(Z_n + Z_5 + Z_7) \cos \varphi$ | |
| | γ_4 | $(X_6 + X_n \cos \varphi) \sin \varphi$ | |
| Подвижная платформа | δ_{x5} | $\cos \varphi$ | Смещение оси растачиваемого отверстия от номинального положения по оси X То же, по оси Y |
| | δ_{y5} δ_{z5} | $\sin \varphi$ 0 | |
| | α_5 | $-(Z_n + Z_7) \sin \varphi$ | Перекося оси растачиваемого отверстия в горизонтальной плоскости То же, в вертикальной плоскости Смещение оси растачиваемого отверстия от номинального положения по оси Y |
| | β_5 | $(Z_n + Z_7) \cos \varphi$ | |
| | γ_5 | $(X_6 + X_n \cos \varphi) \sin \varphi$ | |

Обозначения: $\delta_{x_i}, \delta_{y_i}, \delta_{z_i}$ — малые поступательные смещения; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ — малые повороты вокруг осей X_i, Y_i, Z_i системы координат S_i (см. рис. 6.2); Z_n и X_n — координаты формообразующей точки инструмента в общей системе координат; φ — текущий угол поворота инструмента.

[9]. Существенное влияние на геометрическую точность оказывает сборка прецизионных узлов станка, например шпиндельного узла, закаленных накладных направляющих скольжения и качения, узлов фиксации поворотных столов и блоков [3]. Геометрическая и кинематическая точность станка — необходимый, но недостаточный критерий, определяющий их работоспособность. В первую очередь надо определить силы, действующие на станок и его узлы, и оценить те деформации и смещения, которые они вызывают.

6.3. Силы, действующие в станках

Силы и моменты, действующие в станках, делят на следующие группы.

1. Движущие силы и моменты, вызванные работой двигателей (электрических, гидравлических и др.). Силы и моменты приложены к ведущим звеньям приводов станка.

2. Силы и моменты полезного сопротивления [10] — силы резания и другие силы и моменты рабочих процессов. Приложены в зоне резания или в рабочей зоне к инструменту и заготовке, а через них — к звеньям станка, которые называют ведомыми (шпиндель, суппорт, стол и др.).

3. Силы и моменты вредных сопротивлений [10] — силы трения, сопротивление среды и др. Приложены в местах контакта звеньев станка со средой или с другими звеньями и направлены против движущих сил. Силы и моменты сопротивлений (пп. 2 и 3) уравниваются в статике движущими силами и моментами. Силы сопротивления оказывают решающее влияние на тепловой режим работы станка.

4. Силы тяжести (вес) G действуют на все детали станка. Определяют в соответствии со вторым законом Ньютона: $G = mg$, где m — масса детали; g — ускорение свободного падения.

5. Силы упругости деформируемых звеньев станка. Возникают под действием любых сил, действующих на звенья станка. Свообразная реакция на действующие силы. После снятия нагрузок силы упругости восстанавливают (в пределах упругих свойств) первоначальные размеры и форму звеньев станка, поэтому их также называют восстанавливающими или позиционными силами.

6. Силы взаимодействия между звеньями станка или механизма (в кинематических парах). В соответствии с третьим законом Ньютона в кинематических парах возникают нормальные составляющие силы, равные и противоположные по направлению, и тангенциаль-

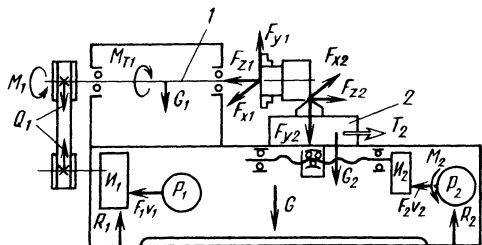


Рис. 6.4. Схема силового воздействия на станок

ные составляющие — силы трения. Первые работы не совершают. Работа сил трения трансформируется в теплоту.

7. Динамические силы, в том числе силы инерции $F_n = m\ddot{y}$, и моменты инерционных сил $M_n = J\epsilon$, где m — масса звена; \ddot{y} , ϵ — соответственно линейное и угловое ускорение звена; J — момент инерции звена. Роль этих сил возрастает с ростом ускорений.

Силы и моменты групп 1, 2 и 4 относят к внешним воздействиям. Они приложены к станку и его механизмам извне, известны или могут быть определены.

Силы и моменты групп 3, 5 и 6 называют внутренними. Они представляют собой реакцию на действие внешних сил и неизвестны заранее.

Рассмотренная классификация не является исчерпывающей. Важную роль в станках играют силы, вызванные тепловыми деформациями звеньев, погрешностью изготовления отдельных

деталей станков, наличием пассивных связей, неуравновешенностью вращающихся валов и др.

Схема силового воздействия на станок показана на рис. 6.4. Силы и моменты внешних силовых воздействий выделены жирными стрелками. К ним следует отнести и реакции основания на станину R_1, R_2 . От двигателей главного движения P_1 и подачи P_2 на ведущие звенья приводов I_1 и I_2 передаются соответственно движущие силы и моменты:

$$P_1 \equiv F_1 v_1 \equiv M_1 n_1 \quad \text{и} \quad P_2 \equiv F_2 v_2 \equiv M_2 n_2, \quad (6.1)$$

где P_1, P_2 — мощность электродвигателей; F_1, F_2 и M_1, M_2 — соответственно движущие силы и моменты; v_1, v_2, n_1, n_2 — соответственно скорости и частоты вращения ведущих звеньев.

Силы и моменты полезного сопротивления по трем координатным осям действуют на инструмент (с индексом 2) и заготовку (с индексом 1), а через них на шпиндель 1 и суппорт 2. По каждой из осей силы равны по величине и противоположны по направлению: $F_{x1} = F_{x2}$, $F_{y1} = F_{y2}$, $F_{z1} = F_{z2}$. Силы и моменты полезного сопротивления функционально зависят от движущих сил и моментов. Из уравнения (6.1) получаем

$$F_{y1} v_{y1} \equiv M_{y1} n_1 \equiv F_1 v_1 \eta; \quad F_{y1} = 1020 P_1 \eta / v_{y1}, \quad (6.2)$$

где v_{y1} — скорость резания в направлении действия силы F_{y1} , м/с; M_{y1} — момент в направлении действия силы F_{y1} ; n_1 — частота вращения шпинделя; η — КПД привода главного движения.

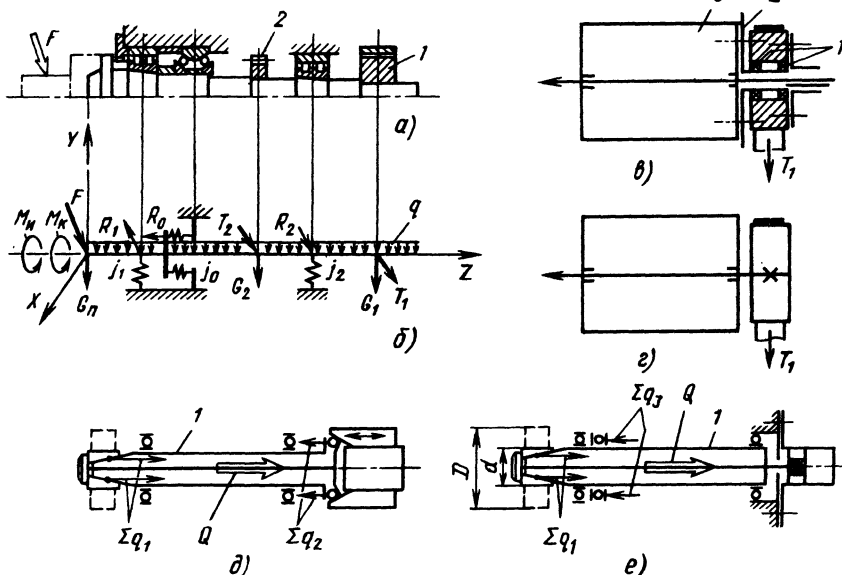


Рис. 6.5. Внешние силы и моменты, действующие на шпиндельный узел:

а — конструктивная схема; б — силовое воздействие; в — схема разгруженного шпинделя; г — схема неразгруженного шпинделя; д — опоры шпинделя разгружены от осевых сил зажима Q ; е — опоры шпинделя нагружены от действия силы Q

6.5 Расчет сил и упругих смещений валов и осей с учетом жесткости опор

| № схемы | Расчетная схема | Прогиб от действия единичной силы, y_{ik} * | Прогиб и реакция в опорах |
|---------|-----------------|---|---|
| 1 | | $y_{11} = - \left[\frac{(a+b)^2}{j_1 a^2} + \frac{b^2}{j_2 a^2} + \frac{b^3}{3EJ_k} + \frac{ab^2}{3EJ_{np}} \right]$ $y_{12} = \frac{(a+b)a_2}{j_1 a^2} - \frac{a_1 b}{j_2 a^2} - \frac{a_2 b(a^2 - a_2^2)}{6EJa}$ $y_{13} = \frac{(a+b)c}{j_1 a^2} + \frac{(a+c)b}{j_2 a^2} - \frac{abc}{6EJ}$ | $y_1 = P_1 \frac{a+b}{j_1 a}$ $y_2 = P_1 \frac{b}{j_2 a}$ $R_{11} = j_1 y_1$ $R_{12} = j_2 y_2$ |
| 2 | | $y_{21} = y_{12}$ $y_{22} = - \left[\frac{a_2^2}{j_1 a^2} + \frac{a_1^2}{j_2 a^2} + \frac{a_1^2 a_2^2}{3EJa} \right]$ $y_{23} = \frac{a_2 c}{j_1 a^2} - \frac{a_1(a+c)}{j_2 a^2} + \frac{a_1 c(a^2 - a_1^2)}{6EJa}$ | $y_1 = P_2 \frac{a_2}{j_1 a}$ $y_2 = P_2 \frac{a_1}{j_2 a}$ $R_{21} = j_1 y_1$ $R_{22} = j_2 y_2$ |
| 3 | | $y_{31} = y_{13}$ $y_{32} = y_{23}$ $y_{33} = - \left[\frac{c^2}{j_1 a^2} + \frac{(a+c)^2}{j_2 a^2} + \frac{c^2(a+c)}{3EJ} \right]$ | $y_1 = P_3 \frac{c}{j_1 a}$ $y_2 = P_3 \frac{a+c}{j_2 a}$ $R_{31} = j_1 y_1$ $R_{32} = j_2 y_2$ |
| 4 | | $y_{41} = - \frac{ql}{2a^2} \left\{ \frac{l_1(l_1-c)}{j_1} - \frac{b(l-2b)}{j_2} - \frac{ab}{12EJ} \left[\frac{l_1 b^3}{l} - \frac{l_1^4}{l} + 2a^2(l_1 c) \right] \right\}$ $y_{42} = - \frac{ql}{2a^2} \left\{ \frac{(l_1-c)a_2}{j_1} + \frac{(l-2b)a_1}{j_2} - \frac{a}{12EJ} \left[\frac{a_2 b^4}{l} + \frac{a_1 l_1^4}{l} - \frac{a(a_1+b)^4}{l} - 2a_1 a_2 (l_1-c)(a+a_1) \right] \right\}$ | $y_1 = \frac{ql(l-2c)}{2j_1 a}$ $y_2 = \frac{ql(l-2b)}{2j_2 a}$ $R_{41} = j_1 y_1$ $R_{42} = j_2 y_2$ |

* Индекс i обозначает номер схемы; индекс k — номер сечения

Из (6.2) следует, что при очень малых скоростях действующие в станке силы могут быть сколь угодно большими.

На рис. 6.4 показаны направления действия силы тяжести станины G , суппорта (салазок) G_2 , шпинделя G_1 и момента силы вредных сопротивлений шпинделя M_{T1} и салазок T_2 , силового воздействия ременной передачи Q_1 M_1 , которые необходимо учитывать для всех звеньев.

Внешние силы и моменты, действующие на станок, удобно рассмотреть на примере основных узлов станка, что позволяет вскрыть их функциональную роль. Шпиндель подвергается пространственному нагружению (рис. 6.5) силами резания F , силами тяжести шпинделя $G_{ш}$, учитываемой в виде распределенной нагрузки q , силами тяжести сидящих на нем звеньев G_n , G_1 , G_2 , силами T_1 и T_2 , возникающими соответственно в передачах ведомого и ведущего звеньев, силами зажима Σq заготовок или инструмента. Эти силы вызывают изгиб, кручение, растяжение-сжатие, сдвиг шпинделя и контактное деформирование в опорах. Кроме того, в подшипниках, зубчатых и ременных передачах, механизмах зажима возникают силы трения, количественная оценка которых известна.

На рис. 6.5, б приведена расчетная схема шпиндельного узла, в которой подшипники заменены пружинками соответствующей жесткости j_1 , j_2 , j_0 и реактивными силами R_1 , R_2 , R_0 ; ведомое 1 и ведущее 2 звенья нагружаются соответствующими силами тяжести G_1 , G_2 и силами передачи T_1 , T_2 . В схеме на рис. 6.5, в сила натяжения ремня T_1 не действует на шпиндель, а в схеме на рис. 6.5, г сила T_1 нагружает шпиндель и его опоры.

Силовое нагружение шпинделя рассматривается раздельно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях YOZ и XOZ . Например, при изгибе шпинделя в плоскости YOZ возникает упругое смещение шпинделя в сечениях 1—3 (табл. 6.5) и реакции опор R_{11} , R_{12} , где i — номер схемы. При нагружении силой P_1 по схеме № 1 возникают смещения y_{11} , y_{12} , y_{13} , а при нагружении по схеме № 2 — смещения y_{21} , y_{22} , y_{23} и т. д.

Суммарное смещение шпинделя в каждом сечении находим как алгебраическую сумму смещений от каждой из сил в данном сечении: для сечения 1 суммарное смещение $y_{1\Sigma} = y_{11} + y_{21} + y_{31} + y_{41}$, для сечения 2 — $y_{2\Sigma} = y_{12} + y_{22} + y_{32} + y_{42}$ и т. д.

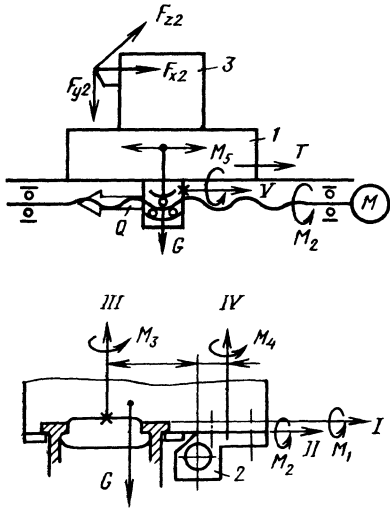


Рис. 6.6. Силовая нагрузка станка из-за асимметрии сил движущих Q , тяжести G и полезного сопротивления F

Смещение сил резания относительно оси заготовки (инструмента) создает дополнительный изгибающий M_n и крутящий M_k моменты (рис. 6.5, б). В разгруженной конструкции шпиндельного узла (рис. 6.5, в) сила T_1 натяжения ремня через подшипники 1 и ступицу 2 воспринимается корпусом 3 и не нагружает шпиндель и опоры. В неразгруженной конструкции (рис. 6.5, г) нет ступиц и подшипников, которые, к тому же, являются дополнительным источником вибровозмущений, но в этом случае шпиндель и опоры нагружаются силой T_1 . Эффективность разгрузки оценивается по формулам, приведенным в табл. 6.5. Сила зажима заготовок может замыкаться на шпиндель 1 (рис. 6.5, д) или на опоры шпинделя (рис. 6.5, е). Во втором случае силы зажима Σq_1 нагружают упорный подшипник силой Σq_3 в течение всего времени обработки.

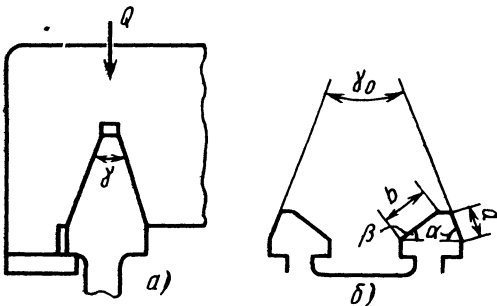


Рис. 6.7. Силы вредного сопротивления, возникающие в треугольных направляющих: а — симметричные, б — несимметричные; в — изменение коэффициента приведения в зависимости от γ_0

Силы и моменты вредных сопротивлений играют особо важную роль в механизмах, определяющих точность и работоспособность станков, в том числе в приводах подач, кулачковых механизмах, при перемещении столов, суппортов, ползунов, толкателей и др. При этом следует учитывать, что асимметрия движущих сил со стороны привода, сил тяжести и сил полезного и вредного сопротивлений (сил резания и трения) вызывает дополнительную моментную силовую нагрузку рабочих поверхностей (рис. 6.6). Например, на работающем станке стол I , корпус гайки 2 , резцедержатель 3 нагружаются моментами $M_1 - M_5$ относительно осей $I - V$ из-за асимметрии движущей силы Q , сил тяжести G и сил резания F .

Суммарная сила трения T в направляющих (вредное сопротивление) определяется через сумму реакций всех граней ΣR_i и приведенный коэффициент трения f_n :

$$T = f_n \Sigma R_i; \Sigma R_i = \Sigma q_i S_i; f_n = f \lambda, \quad (6.3)$$

где q_i — давление на этой поверхности; S_i — номинальная поверхность контакта; f — коэффициент трения; λ — коэффициент приведения.

В общем случае λ находят из отношения абсолютной суммы $\Sigma |R_i|$ реактивных сил, перпендикулярных к поверхности трения, к алгебраической сумме ΣR_i тех же сил и характеризует конструктивное совершенство механизма:

$$\lambda = \Sigma |R_i| / \Sigma R_i.$$

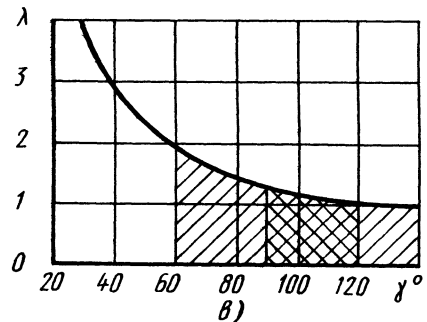
Для треугольных направляющих (рис. 6.7, а) сила трения зависит от угла γ при вершине призмы:

$$T = Q f \lambda, \quad \lambda = 1 / \sin \gamma / 2.$$

Следует проверять силы трения и по общему углу γ_0 (рис. 6.7, б), при этом

$$\lambda_0 = 1 / \sin \gamma_0 / 2.$$

На рис. 6.7, в заштрихована область возможных ($60 - 140^\circ$) и предпочтительных ($90 - 120^\circ$) углов γ для треугольных направляющих.



Как следует из выражений (6.3), расчет сил вредных сопротивлений сводится к нахождению реакций или давлений. Для опорной поверхности направляющих (рис. 6.8)

$$\text{при } x = 0, \quad y = 0 \quad q_1 = \frac{1}{l} \left(\Sigma P_z \frac{4F + 3N^2}{dF} - \Sigma M_x \frac{6}{dl} - \Sigma M_y \frac{6N}{F} \right), \quad (6.4)$$

$$\text{при } x = c, \quad y = 0 \quad q_2 = \frac{12dc}{lF} (\Sigma M_y - \Sigma P_z \frac{N}{2d}) + q_1, \quad (6.5)$$

$$\text{при } x = 0, \quad y = l \quad q_3 = \frac{12}{dl} \left(\Sigma M_x \frac{1}{l} - \Sigma P_z \frac{1}{2} \right) + q_1, \quad (6.6)$$

$$\text{при } x = c, \quad y = l \quad q_4 = q_2 + q_3 - q_1, \quad (6.7)$$

где ΣP_z — сумма проекций внешних сил на ось z , ΣM_x , ΣM_y — сумма моментов внешних сил соответственно относительно оси X и Y , для простоты введены обозначения

$$F = 4M(a+b) - 3N^2, \quad M = a^3 + b^3 + 3bc(c-b), \\ N = a^2 - b^2 + 2bc, \quad d = a + b$$

Если давление по ширине направляющих можно принять постоянным (узкая направляющая), то

$$\text{при } y = 0 \quad q_1 = q_2 = \frac{1}{l} \left(\Sigma P_z \frac{4}{a} - \Sigma M_x \frac{6}{al} \right),$$

$$\text{при } y = l \quad q_3 = q_4 = \frac{1}{l} \left(-\Sigma P_z \frac{2}{a} + \Sigma M_x \frac{6}{al} \right)$$

Если опорная поверхность непрерывна, то

$$q_1 = \frac{1}{al} \left(7 \Sigma P_z - \Sigma M_x \frac{6}{l} - \Sigma M_y \frac{6}{a} \right),$$

$$q_2 = \frac{12}{a^2 l} \left(\Sigma M_y - \Sigma P_z \frac{a}{2} \right) + q_1,$$

$$q_3 = \frac{12}{al^2} \left(\Sigma M_x - \Sigma P_z \frac{l}{2} \right) + q_1,$$

$$q_4 = q_2 + q_3 - q_1$$

Давление принято считать положительным, если оно совпадает с направлением оси Z , и отрицательным, если оно направлено против оси Z . Последний случай соответствует раскрытию стыка, давление воспринимается прижимными планками, что для конструкции нежелательно. Строго говоря, расчетные зависимости в этом

случае справедливы только для беззазорного сопряжения.

При определении ΣP_z силы берут со знаком «плюс», если они направлены против оси Z . За положительное направление моментов принято направление, соответствующее вращению по часовой стрелке, если смотреть из начала координат.

Давление q в круговых направляющих рассчитывают аналогично.

$$\text{при } \rho = R, \quad \varphi = 0 \quad q_1 = 0,318 \frac{\Sigma P_z}{R^2 - r^2} + 1,27 \frac{\Sigma M_y}{R^4 - r^4} R,$$

$$\text{при } \rho = R, \quad \varphi = \pi/2 \quad q_2 = 0,318 \frac{\Sigma P_z}{R^2 - r^2} + 1,27 \frac{\Sigma M_x}{R^4 - r^4} R,$$

$$\text{при } \rho = R, \quad \varphi = \pi \quad q_3 = 0,318 \frac{\Sigma P_z}{R^2 - r^2} - 1,27 \frac{\Sigma M_y}{R^4 - r^4} R,$$

$$\text{при } \rho = R, \quad \varphi = 3\pi/2 \quad q_4 = 0,318 \frac{\Sigma P_z}{R^2 - r^2} - 1,27 \frac{\Sigma M_x}{R^4 - r^4} R,$$

$$\text{при } \rho = R, \quad \varphi = 3\pi/2 \quad q_4 = 0,318 \frac{\Sigma P_z}{R^2 - r^2} - 1,27 \frac{\Sigma M_x}{R^4 - r^4} R,$$

где ρ , r , R — соответственно текущий, наименьший и наибольший радиусы направляющих, остальные обозначения см на рис. 6.8.

Если направляющие имеют призматическую форму, то при расчете давлений фактическую ширину граней a и b (см рис. 6.7, б) заменяют приведенными a_n и b_n : $a_n = a \cos^2 \alpha$, $b_n = b \cos^2 \beta$.

Динамические силы в условиях вынужденных колебаний

$$F_d = F_{ст} \mu,$$

где $F_{ст}$ — амплитудное значение внешней статической силы, μ — динамический коэффициент.

Для одномассовой системы

$$\mu = \left[\sqrt{(1 - \omega^2/\nu^2)^2 + 4b^2\omega^2/\nu^4} \right]^{-1},$$

где ω — частота возмущающего воздействия, ν — собственная частота, b — коэффициент сопротивления.

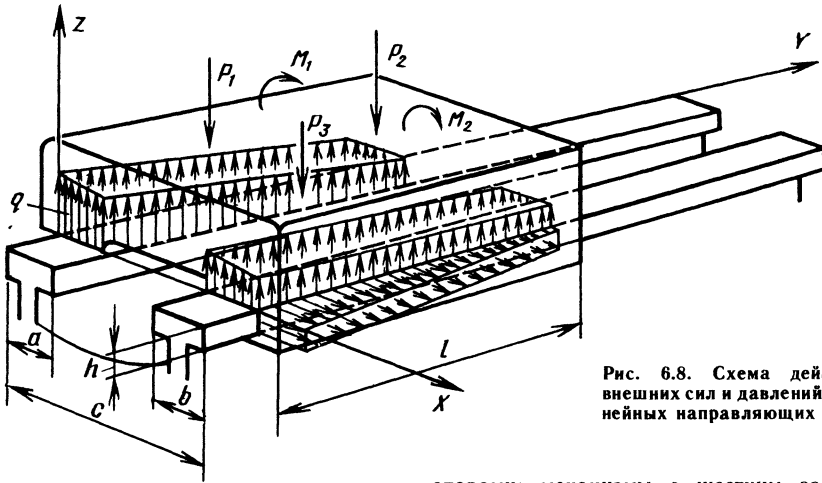


Рис. 6.8. Схема действия внешних сил и давлений в линейных направляющих

Центробежные силы $F_u = m\omega^2 y$ оказывают возмущающее воздействие на вращающиеся валы и нагружают опоры вала дополнительной динамической силой $R_x = jy / (1 + j/2j_0)$, где y , j — соответственно прогиб и жесткость симметрично нагруженного двухопорного вала силой F_u ; j_0 — жесткость опор; m — приведенная масса вала и установленных на нем деталей.

Динамическая сила «вращается» с частотой ω вращения вала, вызывая периодическое изменение упругих смещений вала и опор. Для валов, роторов, вращающихся с большой частотой, следует учитывать воздействие гироскопического момента.

Силы F_n , вызываемые пассивными связями в станках, характерны для конструкций, которые одновременно зафиксированы по двум и более направляющим (валы, ползуны с тремя и более

опорами; механизмы с жестким замыканием и др.). Эти силы пропорциональны смещению y_n , вызванному погрешностью изготовления и жесткости системы j_n в направлении этого смещения:

$$F_n = j_n y_n.$$

Если ось ходового винта 1 (рис. 6.9, а) не параллельна направляющим 2, то на длине a_1 суммарное смещение составит y_n в соответствии с допуском на параллельность. В винтовой паре возникает дополнительная радиальная сила

$$F_n = y_n \left[\frac{a_2^2}{j_1 a^2} + \frac{a_1^2}{j_2 a^2} + \frac{a_1^2 a_2^2}{3EJa} \right]^{-1}.$$

Другим примером могут служить механизмы с жестким замыканием (в прутковых автоматах механизмы зажима прутка). При постоянном ходе кулачка 1 (рис. 6.9, б) звено 2 перемещается на постоянную величину y , что соответствует упругому смещению y звеньев H заготовки. При увеличении размера заготовки на ΔH увеличиваются деформация звеньев и сила зажима до Q_{\max} :

$$Q = jy;$$

$$Q_{\max} = j(y + \Delta H) = Q + Q'.$$

Если во избежание поломки звеньев механизма зажима увеличить их размеры, то увеличится жесткость механизма, еще больше увеличится Q_{\max} и желаемый результат не достигается.

6.4. Жесткость и силовые смещения в станках

Под жесткостью станков понимают их способность сопротивляться упругим деформациям при силовом нагружении. Жесткость j — отно-

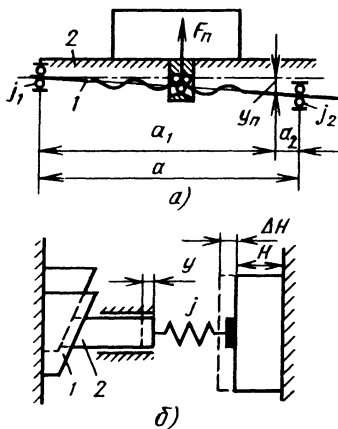


Рис. 6.9. Силы пассивных связей, вызванные непараллельностью направляющих оси ходового винта станка (а) и изменением диаметра заготовок при жестком замыкании (б)

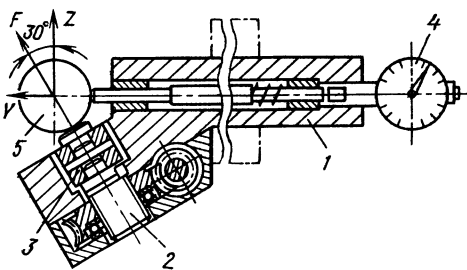


Рис. 6.10. Динамометр конструкции ЭНИМС для испытания жесткости токарных станков

шение силы F к соответствующему упругому смещению y : $j = F/y$. Величину, обратную жесткости, называют податливостью:

$$\omega = 1/j = y/F. \quad (6.9)$$

По ГОСТ 7035—75 жесткость станка определяется как производная проекция нагружающих сил по перемещению узлов в одном и том же направлении. Жесткость станка или какой-либо системы рассматривают как векторную величину, численное значение которой имеет смысл лишь для определенного направления в каждой точке системы. Она оказывает решающее влияние на основные выходные показатели станков — точность и производительность, в том числе на качество обработанной поверхности, виброустойчивость, стойкость инструмента, долговечность конструкций. Жесткость выступает и как критерий качества, и как критерий расчета размеров несущей системы станков, и с этих позиций ее роль в технологии машиностроения более значительна, чем прочности.

С повышением жесткости производительность станков увеличивается благодаря повышению их виброустойчивости, предельных режимов резания, стойкости инструмента, снижения погрешности копирования.

Влияние жесткости станка на точность обработки проявляется в процессе изменения действующих сил и изменения самой жесткости. Экспериментально установлено, что жесткость станков одной и той же модели изменяется. Распределения аппроксимируются нормальным законом. Случайной величиной можно считать и радиальную жесткость шпиндельных узлов в функции угла поворота. Даже у серийно выпускаемых станков она может изменяться до 25—30%.

Способы и средства измерения жесткости станков сводятся к измерению действующей силы и соответствующего упругого смещения в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Силовое нагружение станка и регистрация силы осуществляются с помощью приборов, называемых динамометрами.

Смещения измеряют индикаторами, миниметрами стандартной конструкции или с помощью измерительных преобразователей для более точных измерений или быстро протекающих процессов.

Различают статический, динамический и производственный методы измерения жесткости.

Статический метод является основным, и его используют при проверке станков на жесткость. На рис. 6.10 показан динамометр конструкции ЭНИМС для токарных станков. Корпус 1 динамометра крепят в резцедержателе. При вращении маховичка через червячную пару перемещается вдоль оси винт 2, который через П-образную пружину 3 нагружает оправку 5 под углом 30°. Сила F имитирует равнодействующую сил резания и измеряется пропорционально деформации П-образной пружины 3. Относительные смещения оправки и резцедержателя измеряют индикатором 4.

Динамический метод измерения жесткости применяют при частотном анализе динамической системы станка: модуль амплитудно-фазовой частотной характеристики представляет собой динамическую податливость станка для соответствующей частоты возмущения (см. гл. 8). Станок при этом нагружается периодически изменяющейся силой на разных частотах. В принятой методике динамическая жесткость учитывает влияние сил трения.

Производственный метод измерения жесткости сводится к обработке за один проход участков заготовки с разными припусками (обработка ступенчатого валика или валика с эксцентричным пояском). Изменение припуска вызывает соответствующее изменение сил резания и размера заготовки. По изменению сил резания, определяемых расчетом, и размеров оставшихся ступеней обработанной заготовки определяют жесткость станков.

При статическом методе исследования жесткости станок последовательно нагружают через равные интервалы и регистрируют соответствующие смещения. Затем через те же интервалы станок разгружают. В координатах сила — смещение строят график, который представляет собой характеристику силовых смещений (рис. 6.11). При необходимости станок нагружают в двух противоположных направлениях (соответственно кривые 1 и 2). Рекомендуется жесткость определять как среднее значение по разгрузочным ветвям $P1$ и $P2$ или после вторичной нагрузки (по кривым $P1'$, $P2'$):

$$j_1 = F_1/y_1; \quad j_2 = F_2/y_2. \quad (6.10)$$

Зависимость (6.10) характеризует жесткость станка как некоторую постоянную величину, и в таком виде ее используют в технологических расчетах. Из-за наличия сил трения определенную экспериментально жесткость станка нужно

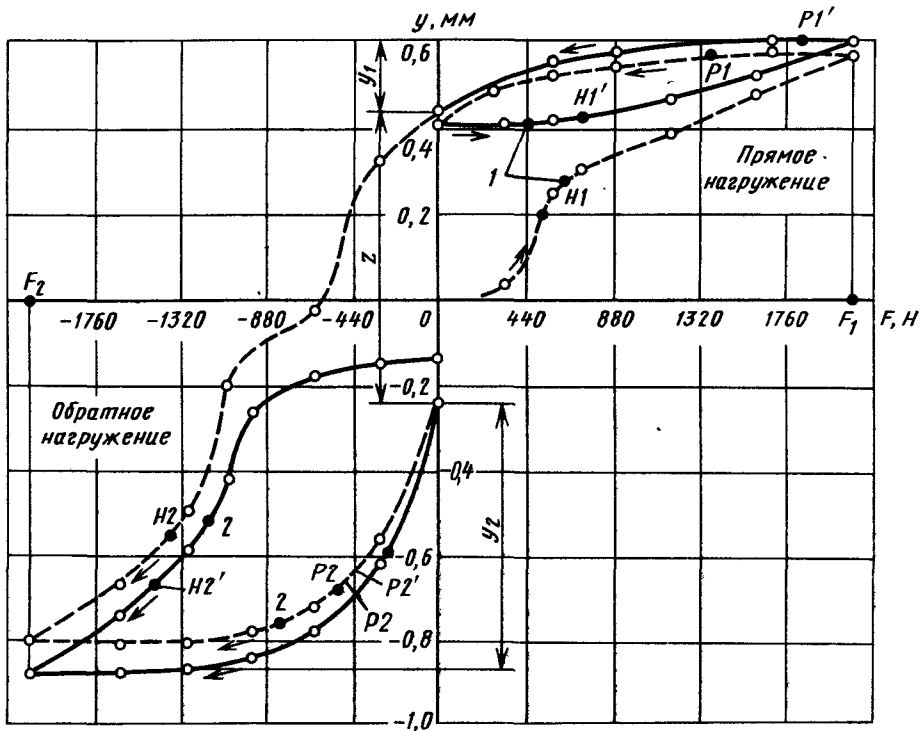


Рис. 6.11. Характеристика силовых смещений

рассматривать как некоторую приближенную величину.

Расстояние z , показанное на рис. 6.11, называют «разрывом характеристики», оно зависит от зазоров, сил трения и пластических деформаций. Площадь, ограниченная характеристиками силовых смещений, отражает работу сил трения и в меньшей степени потенциальную энергию остаточных сил упругости.

Автоматизация исследований жесткости станков возможна с применением графопостроителя. Наклеенный на упругий элемент динамометра тензодатчик через усилитель подает электрический сигнал на графопостроитель и вызывает смещение по координате «сила». Другой измерительный преобразователь вызывает смещения по координате «смещение». В процессе нагрузки-разгрузки станка автоматически строится характеристика силовых смещений.

Баланс жесткости станка составляется с целью оценки влияния отдельных узлов или деталей станка на относительные смещения инструмента и заготовки. Например, каждое слагаемое в формулах в табл. 6.5 определяет смещение соответственно передней опоры, задней опоры и вала в общем смещении переднего конца шпинделя.

Жесткость станка зависит от собственных де-

формаций деталей, воспринимающих нагрузку, и контактных деформаций в стыках.

Собственную жесткость деталей, как правило, можно представить в виде линейного элемента упругости, пренебрегая в первом приближении внутренним трением. Ее можно рассчитывать известными методами. В соответствии с видами деформации различают собственную жесткость растяжения-сжатия j_1 , изгиба j_2 , кручения j_3 и сдвига j_4 , значения которых зависят от физических параметров

$$\begin{aligned} j_1 &= ES/l, \quad j_2 = EJ_c/l^3, \\ j_3 &= GJ_p/l, \quad j_4 = GS/kl, \end{aligned} \quad (6.11)$$

где E , G — модуль упругости первого и второго рода; J , J_p — осевой и полярный моменты инерции стержней соответственно; S — площадь поперечного сечения стержня; c , k — коэффициенты, характеризующие соответственно способ закрепления стержня и форму поперечного сечения при сдвиге.

Собственная жесткость деталей, как следует из уравнения (6.11), не зависит от предела прочности материала, а зависит только от модуля упругости материала, линейных размеров, формы сечения и способа закрепления. Собственная жесткость деталей мало зависит от термической обработки.

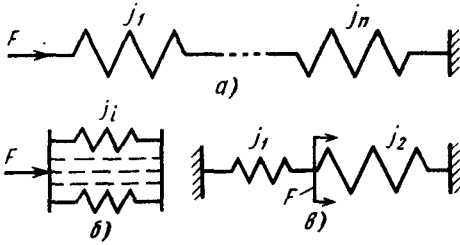


Рис. 6.12. Связи элементов системы

В расчетах используют зависимости для определения жесткости систем с последовательной j_{c1} (рис. 6.12, а) и параллельной j_{c2} (рис. 6.12, б, в) связями:

$$j_{c1}^{-1} = \sum_{i=1}^n j_i^{-1}; \quad (6.12)$$

$$j_{c2} = \sum_{i=1}^n j_i. \quad (6.13)$$

Не следует последовательную связь отождествлять с последовательным расположением деталей. Например, в системе, приведенной на рис. 6.12, в, существует параллельная связь, и жесткость рассчитывают по формуле (6.13), а в шпиндельных узлах консоль, пролет и опоры шпинделя составляют систему звеньев с последовательной связью.

Из выражения (6.12) следует, что жесткость станка j_c всегда меньше жесткости наиболее слабого звена j_{\min} этого станка: $j_c < j_{\min}$.

Чем больше число звеньев n , определяющих жесткость станка, и больше отношение $\alpha = j_{\max}/j_{\min}$, тем меньше удельный вес A , %, звена с максимальной жесткостью j_{\max} в общем балансе смещений:

$$A = 100(1 + \alpha C)^{-1}, \text{ где } C = \sum_{i=1}^{n-1} (j_{\min}/j_i).$$

Контактирование реальных деталей осуществляется по отдельным микровыступам, и фактическая площадь контакта очень мала по отношению к номинальной опорной поверхности. Удельный вес контактных деформаций в шпиндельных узлах, консолях, суппортах достигает 50—90 %. Собственная деформация станин вертикально-фрезерных, координатно-расточных станков, приведенная к инструменту, составляет около 15 %.

Различают контактные нормальные Y_σ и тангенциальные Y_τ смещения. Соответствующие характеристики силовых смещений определяют эмпирически (рис. 6.13)

$$Y_\sigma = Cq^m; \quad (6.14)$$

$$Y_\tau = k_\tau \tau, \quad (6.15)$$

где C, k_τ, m —коэффициенты и показатель степени, зависящие от геометрических параметров поверхностей, свойств материала, смазочного материала, характера нагружения; q, τ —соответственно нормальные и тангенциальные напряжения в стыках.

Для плоских стальных и чугунных стыков с отклонением от плоскости менее 1 мкм, шероховатостью поверхностей $Ra=0,08 \dots 2,5$ мкм при центральном повторном нагружении значения C и m рекомендуется брать из табл. 6.6. По формуле (6.14) определяют упругую составляющую Y_σ , мкм, нормальных смещений (рис. 6.13, б). Смещения Y_{n1}, Y_{n2} , вызванные пластическими деформациями при первичном и вторичном нагружениях (кривые 1 и 2), здесь не учитываем. Нормальное напряжение определяют как отношение нормальной силы N к номинальной опорной поверхности S : $q = N/S$.

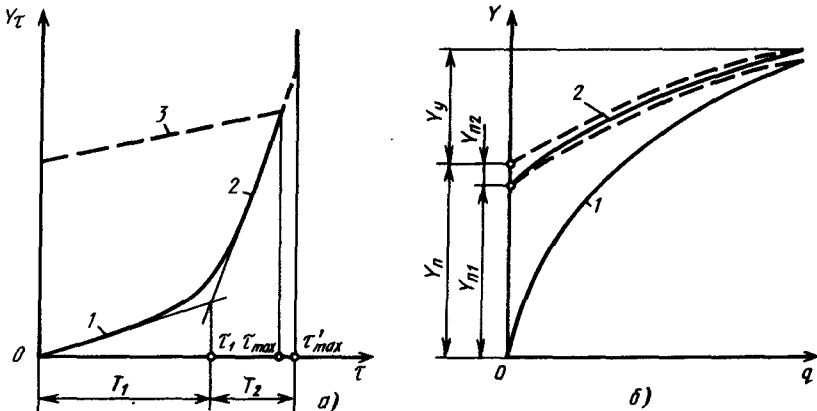


Рис. 6.13. Характеристики контактных силовых смещений.

6.6. Значения величин C , m для расчета контактных нормальных силовых смещений

| Материал заготовки | Вид обработки | Ra , мкм | z^* | C | m |
|--|--------------------|-------------|---------|-----------|-----|
| Сталь или чугун | Финишное строгание | — | — | 0,6 | 0,5 |
| | Точение | 1,25 — 0,63 | — | 0,4 | |
| | Шлифование | 1,25 — 0,63 | — | 0,4 — 0,5 | |
| | » | 0,63 — 0,32 | — | 0,35 | |
| | » | 0,32 — 0,16 | — | 0,25 | |
| | » | 0,16 — 0,08 | — | 0,15 | |
| | Притирка | 0,08 — 0,04 | — | 0,07 | |
| Чугун и текстолит ПТ винипласт гетинакс кордонный капрон и полиамид-68 | Шабрение | — | 5 — 10 | 1,5 | 1/3 |
| | » | — | 12 — 18 | 0,8 | |
| | » | — | 24 — 36 | 0,4 | |
| | Шабрение | — | — | 5,5 | |
| | » | — | — | 5,7 | |
| » | — | 8 — 10 | 3,0 | | |
| » | — | — | 4,0 | | |

Обозначение: z^* — число пятен контакта на площади $25 \times 25 \text{ мм}^2$.

На характеристике тангенциальных силовых смещений (рис. 6.13, а) выделяют участок 1 упругих смещений и участок 2 упруго-пластических смещений. При $\tau \leq \tau_1$ нагрузка и разгрузка осуществляются по участку 1, при $\tau > \tau_1$ — нагрузка по участку 2, а разгрузка по участку 3, параллельному участку 1. При $\tau = \tau'_{\max}$ начинается относительное скольжение сопряженных деталей. Величину τ определяют как отношение тангенциальной силы T к номинальной опорной поверхности S : $\tau = T/S$.

Тангенциальные смещения Y_{τ} , мкм, по формуле (6.15) определяют для участка 1, где $\tau \leq \tau_1$, $\tau = f_y q$. Значения $k_{\tau 1}$ и f_y для серого чугуна берут из табл. 6.7. При $\tau > \tau_1$ тангенциальные смещения $Y_{\tau n}$ определяют с учетом коэффициента контактной податливости $k_{\tau 2}$ на участке 2, $k_{\tau 2} = (20 \dots 25) k_{\tau 1}$:

$$Y_{\tau n} = Y_{\tau} + k_{\tau 2}(\tau - \tau_1).$$

Жесткость станков регламентирована ГОСТами (см. п. 6.2). Ориентировочно жесткость станков средних размеров составляет 30—100 Н/мкм.

Для повышения качества станков и точности обработки рекомендуется:

- 1) нормировать не только нижнюю, как предусмотрено в ГОСТах, но и верхнюю границу жесткости станков;
- 2) учитывать, что на величину смещений влияют не только упругие свойства станка, но и сила трения;
- 3) нормировать изменение радиальной жесткости шпиндельных узлов в функции угла поворота;
- 4) жесткость станков рассматривать как случайную величину;
- 5) нормы жесткости обосновывать в функции физических свойств конструкции расчетным путем;

6.7. Значения коэффициента f_y в зависимости от коэффициента трения покоя f и $k_{\tau 1}$

| Обработка поверхности | Без смазочного материала | | Со смазочным материалом | | $k_{\tau 2}$, мкм·см ² /кг* |
|---|--------------------------|------|-------------------------|------|---|
| | f_y | f | f_y | f | |
| Чистовое точение $Ra = 5,0 \dots 2,5$ мкм | 0,13 | 0,25 | 0,13 | 0,25 | 0,28...0,13 |
| Шлифование $Ra = 1,25 \dots 0,32$ мкм | 0,12 | 0,18 | 0,12 | 0,18 | 0,26...0,12 |
| Шлифование с притиркой $Ra = 0,16 \dots 0,08$ мкм | 0,17 | 0,35 | 0,14 | 0,30 | 0,24...0,11 |
| Шабрение, глубина впадин не более 8—10 мкм | 0,12 | 0,22 | 0,12 | 0,22 | 0,32...0,13 |
| Шабрение, глубина впадин не более 1—2 мкм | 0,14 | 0,28 | 0,10 | 0,24 | 0,26...0,12 |

*Для стыка площадью 5100 мм^2 при нормальном напряжении $\sigma = 0,5 \dots 1,4 \text{ МПа}$.

| № Модуля | Схема модуля | Характеристика модуля |
|----------|--------------|-----------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |

Обозначение F — сила, действующая на модуль, Y — соответствующее силовое смещение

6) учитывать, что реальные циклы нагружения станков со стороны привода и из зоны резания различны даже для станков одной модели;

7) снижение жесткости станков j_c из-за несовершенства конструкции и технологической оснастки оценивать по коэффициенту снижения жесткости станка α относительно жесткости $j_{ш}$ шпиндельного узла: $\alpha = j_c/j_{ш}$.

Методы повышения жесткости станков предопределены расчетными зависимостями (6.11), (6.14), (6.15). Основные направления можно свести к следующим:

а) повышение собственной жесткости деталей, в том числе путем применения замкнутых рамных конструкций, заменой деформации изгиба, кручения деформациями растяжения-сжатия, увеличением момента инерции при одной и той же массе, применением материалов с высоким модулем упругости;

б) уменьшение количества стыков в несущей системе станков; если условно принять жест-

кость всех стыков j_i одинаковой, то суммарная жесткость системы с последовательной связью j_c обратно пропорциональна числу стыков n : $j_c = j_i/n$;

в) повышение качества обработки и сборки; следует обратить внимание на тщательность пригонки стыков, отклонения поверхностей от заданной геометрической формы, на увеличение числа пятен контакта z на площадке $25 \times 25 \text{ мм}^2$ при шабровке; одной из главных причин изменения радиальной жесткости шпиндельных узлов в функции угла поворота считается отклонение от круглости отверстий под подшипники и шеек шпинделя;

г) применение конструкций с предварительным натягом (один из распространенных способов повышения жесткости шпиндельных опор на подшипниках качения); смысл предварительного натяга в том, что при малых силах нормальные контактные смещения велики; если создать предварительный натяг, то при рабочей нагрузке будет использоваться участок характеристики с большей средней жесткостью.

К силовым смещениям в станках относят все смещения узлов или относительные смещения инструмента и заготовки, вызванные действием внешних сил. При оценке жесткости учитывают только упругие смещения.

При теоретической оценке силовых смещений любую механическую систему представляют в виде закономерной совокупности абстрагированных элементов упругого j и неупругого T сопротивлений, образующих модуль (табл. 6.8). Последний является частицей всего многообразия возможных теоретических моделей и характеристик силовых смещений.

Элемент упругого сопротивления обладает чисто упругими свойствами. Элемент неупругого сопротивления изменяет силу упругости относительно внешних сил. Если жесткость или сила трения элементов изменяются в функции внешней силы, то их собственную характеристику называют зависимой $[j(F), T(F)]$, если не изменяется — независимой. Зависимые характеристики могут быть линейными и нелинейными при неограниченном числе закономерностей этих нелинейностей. Сочетание элементов с различными собственными характеристиками порождает множество оригинальных модулей. Наиболее характерные из них показаны в табл. 6.8: модули 1,2 — с независимыми линейными характеристиками элементов жесткостью j и силой трения T , модуль 7 — с зависимыми характеристиками элементов переменной жесткостью $j(F)$ и переменной силой трения $T(F)$, модули 6,8 — учитывают соответственно зазор δ и пластические деформации Y_n . Остальные модули не содержат новых элементов.

Общая теоретическая модель силовых смещений

$$Y = \sum_{i=1}^n \left[F_y(F) \mp \sum_{i=1}^k T_i(F) W_i(F) \right]$$

Модель силовых смещений для последовательной схемы связи и модуля 1 (см. табл. 6.8):

$$Y_1 = \sum_{i=1}^n \left[F_y \mp \sum_{i=1}^k T_i \right] W_i; \quad (6.16)$$

$$Y_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{i=1}^k T_i \right) W_i; \quad F_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^k T_i,$$

$$Y_{\tau} = \sum_{i=1}^n F_y W_i. \quad (6.17)$$

Модель силовых смещений для той же схемы связи и модуля 3 (см. табл. 6.8):

$$Y_3 = \sum_{i=1}^n \left(F_{y_i} \mp \sum_{i=1}^k F_{y_i} a_i \mu_i \right) \times$$

$$\times W_i \xrightarrow{F_{y_i}=F_y} F_y \sum_{i=1}^n \left(1 \mp \sum_{i=1}^k a_i \mu_i \right) W_i, \quad (6.18)$$

где Y , Y_{τ} — соответственно силовое смещение с учетом сил трения и теоретическое без учета сил трения; T_i , W_i — соответственно сила трения и податливость элементов; $Y_{\text{ост}}$, $F_{\text{ост}}$ — соответственно остаточное смещение и остаточная сила упругости; μ_i , a_i — соответственно коэффициент трения и соотношение нормальной и тангенциальной составляющих внешней силы элементов; n , k — соответственно число и порядковый номер модуля; $F_y = F_y(F)$, F_{y_i} — составляющая внешней силы F в направлении смещения; знак « \rightarrow » принимают при нагрузке, знак « \leftarrow » — при разгрузке.

При разгрузке F_y зависит от наибольшей внешней силы F_{max} : $0 \leq F_y \leq F_{\text{max}}$;

при расчете по формуле (6.17)

$$F'_{\text{max}} = F_{\text{max}} - 2 \sum_{i=1}^k T_i;$$

а при расчете по формуле (6.18)

$$F'_{\text{max}} = F_{y \text{ max}} \left[\sum_{i=1}^n \left(1 - \sum_{i=1}^k \mu_i a_i \right) \times \right.$$

$$\left. \times W_{i1} / \sum_{i=1}^n \left(1 + \sum_{i=1}^k \mu_i a_i \right) W_i \right], \quad (6.19)$$

т. е. для каждого модуля будет свое значение F'_{max} .

По теоретическим моделям установлены следующие новые закономерности формирования силовых смещений.

1. В механической системе после ее разгрузки сохраняются остаточные силы упругости $F_{\text{ост}}$. Они поддерживают конструкцию в напряженном состоянии и при случайном изменении сил трения вызывают соответствующие смещения. Этот вывод приобретает силу закона, объясняет различные явления «последствия», эффект выстоя в конце цикла резания, рассеяние точности обработки и др.

2. Упругодеформирующаяся, безазорная конструкция после разгрузки не возвращается в исходное положение. Возникают остаточные смещения $Y_{\text{ост}}$ (рис. 6.14, а), которые растут с увеличением числа модулей [см. зависимость (6.17)]. При обработке заготовок методом радиальной подачи остаточные смещения $Y_{\text{ост}}$ представляют собой границы возможного рассеяния точности обработки, которые проявляются при всяком изменении сил трения и жесткости.

3. Существуют строгие закономерности формирования характеристик. Для системы из двух модулей и модели (6.17) излом характеристики

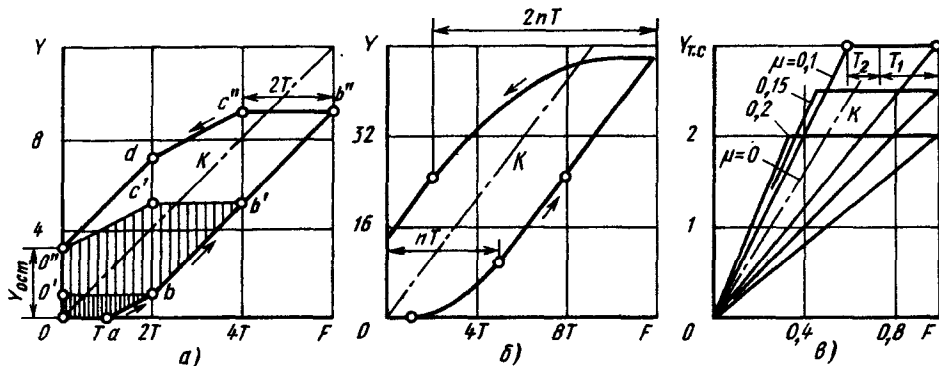

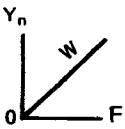

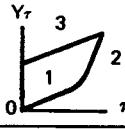

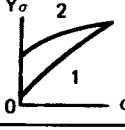


Рис. 6.14. Характеристики силовых смещений системы:

а — с независимыми элементами трения при $n=2$, б — то же, при $n=5$; в — с зависимым элементом трения при $n=4$; F задано в количествах единиц сил трения T .

6.9. Типовые элементы конструкций

| Элемент | Физическая модель | Математическая модель локальных смещений | ХСС элемента |
|----------|---|--|---|
| μ |  | (6.20) |  |
| τ |  | (6.21) (6.22) |  |
| σ |  | (6.23) (6.24) |  |

в точках a , b (рис. 6.14, a) соответствует равенству внешних сил силам трения модулей. При большом числе модулей n силы трения nT создают впечатление нелинейности упругой системы (рис. 6.14, b) при заведомо линейной жесткости.

В процессе разгрузки системы участки характеристики повторяются, они параллельны нагрузочным, но их размеры в 2 раза больше, (см. рис. 6.14, a): $Oa \parallel c''b''$ и $c''b'' = 2Oa$, $ab \parallel dc''$ и $dc'' = 2ab$ и т. д.

Характеристики $Ob'O''$, $Ob''O''$ и $Ob''O''$ относятся к одной и той же двухмодульной системе. Неодинаковая форма объясняется разным соотношением сил внешних и сил трения системы. Чисто упругая характеристика K для них одинакова, так как она не зависит от сил трения.

Для систем с зависимой характеристикой трения внешне силы трения проявляются менее заметно. На рис. 6.14, b показаны характеристики модели (6.18) для системы из четырех модулей: остаточные смещения равны нулю, как у чисто упругой системы; нагрузочные и разгрузочные ветви характеристики прямолinéйны; с изменением коэффициента трения μ изменяются размеры и площадь характеристик

4 Многократное нагружение технологической системы (ТС) не изменяет размеры и форму характеристики силовых смещений, начиная со второго цикла нагружения.

5. Силы упругости, деформирующие систему, не тождественны внешним силам. Часть внешней силы теряется на преодоление сил трения. Разгрузка же системы осуществляется накопленными силами упругости.

6. Жесткость, как свойство упругих систем,

не зависит от сил трения и способа ее определения. Различные виды жесткости (статическая, динамическая, при резании, при движении и т. п.) отражают лишь изменение условий работы реальной конструкции, в том числе изменение сил трения, значение и точки приложения реактивных сил и т. д. Некорректно сопоставлять статическую и динамическую жесткость, определяемую по частотной характеристике: если в первом случае силы трения не учитывают, то во втором — их учитывают.

7. Площадь характеристики силовых смещений ХСС при полцикле нагружения практически всегда включает не только работу сил трения, но и часть потенциальной энергии ТС, обусловленной остаточными силами упругости $F_{ост}$.

Теоретическое описание силовых смещений позволяет использовать новый способ физического моделирования, когда реальный объект заменяют отличным по конструкции устройством из типовых элементов упругости и трения, сохраняющих упругие и неупругие свойства оригинала, т. е. моделируется не конструкция в каком-либо масштабе, а ее упругие и неупругие свойства.

Расчет и анализ точности станков в условиях силового нагружения возможен на базе теоретического описания силовых смещений. Под точностью станка понимают его свойство сохранять заданный закон относительных перемещений инструмента и заготовки. Точность станка оценивается отклонением этих перемещений от теоретических в реальных условиях эксплуатации. Отклонение определяют по смещению несущей системы станка, на которую оказывается силовое воздействие.

Для упрощения расчета и анализа точности

станков все многообразие конструкций сведено к типовым элементам: деформируемые детали (μ -элементы), стыки в виде элементов нормальных (σ -элементы) и тангенциальных (τ -элементы) смещений, типовые сборочные единицы (π -элементы) (табл. 6.9).

Деформируемые детали представляют в виде элемента упругости с линейной и иногда с нелинейной характеристикой. Упругое смещение деформируемой детали

$$Y_{\mu} = WF. \quad (6.20)$$

Податливость определяется в зависимости от вида деформаций по одной из зависимостей (6.11) известными методами. В табл. 6.9 физическая модель μ -элемента представлена в виде пружинки, которая имеет линейную характеристику силовых смещений (ХСС).

Физическая модель τ -элемента изображена в виде двух пружинок разной податливости W_1 и W_2 и одного элемента трения T , что соответствует эмпирической характеристике тангенциальных силовых смещений. Все элементы имеют независимые характеристики. Тангенциальные смещения определяют:

при нагрузке

$$Y_{\tau n} = k_{\tau 1} \tau_1 + (k_{\tau 2} - k_{\tau 1})(\tau_1 - \tau_1); \quad (6.21)$$

при разгрузке

$$Y_{\tau p} = k_{\tau 1} \tau_1 + (k_{\tau 2} - k_{\tau 1})(\tau_{\max} - \tau_1). \quad (6.22)$$

Все обозначения в (6.21), (6.22) были раскрыты при описании рис. 6.13, а, а необходимые коэффициенты указаны в табл. 6.7.

Физическая модель σ -элемента изображена в виде пружинки переменного диаметра, что соответствует переменной податливости, зависящей от внешней силы $W(F)$, и треугольника, имитирующего пластические деформации Y_n . Характеристика элемента нелинейна. Нормальные контактные смещения также определяют по известным эмпирическим зависимостям типа (6.14):

при нагрузке

$$Y_{\sigma n} = C_1 q_i^{m_1} v' v''; \quad (6.23)$$

при разгрузке

$$Y_{\sigma p} = [C_1 q_{\max}^{m_1} - C_2 (q_{\max}^{m_2} - q_i^{m_2})] v' v'', \quad (6.24)$$

где q_{\max}, q_i — максимальное и текущее нормальное напряжение; C, m — то же, что в (6.14); v', v'' учитывают влияние неплоскостности и смазки; параметры с индексом 1 — для первичного нагружения, параметры с индексом 2 — для вторичного нагружения, см. рис. 6.13, б. Ориентировочно для неподвижных стыков расчет вести по вторичному нагружению, для подвижных — по первичному нагружению.

В подавляющем большинстве случаев нелинейная жесткость станков предопределяется

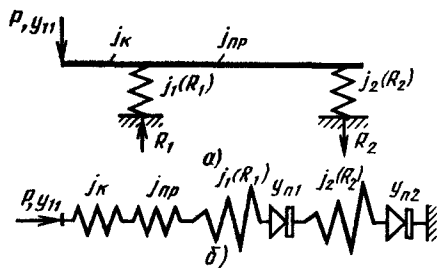


Рис. 6.15. Шпиндельная сборочная единица: а—принципиальная схема; б—аналоговая модель

нелинейностью характеристик контактных силовых смещений, а нелинейность характеристик силовых смещений станков зависит также и от сил трения и зазоров.

Последний π -элемент относится к сборочным единицам, наиболее часто встречающимся в станках; это шпиндельные узлы, механизмы с винтовыми парами качения, столы и т. п. Их исследуют самостоятельно и в расчетах точности станка используют готовые алгоритмы решения.

Принципиальная схема сборочной единицы типа балки на упругих опорах и ее физическая модель с указанием жесткости консоли j_k , пролета j_{np} опор и пластических деформаций y_{n1}, y_{n2} показаны на рис. 6.15.

Математические модели, данные в табл. 6.9, и уравнения (6.19) — (6.24) позволяют определить локальные смещения для всех типовых элементов. При расчетах смещения приводятся к зоне резания (к точке приложения сил резания) через коэффициент смещений u .

Для расчета и анализа точности по чертежам составляют схемы (рис. 6.16), анализируют условия нагружения, деформации и вид связи, определяют группу типового элемента, к кото-

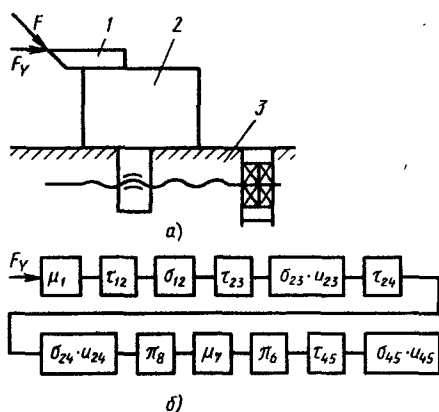


Рис. 6.16. Несущая система станка: а — принципиальная схема; б — структурная схема

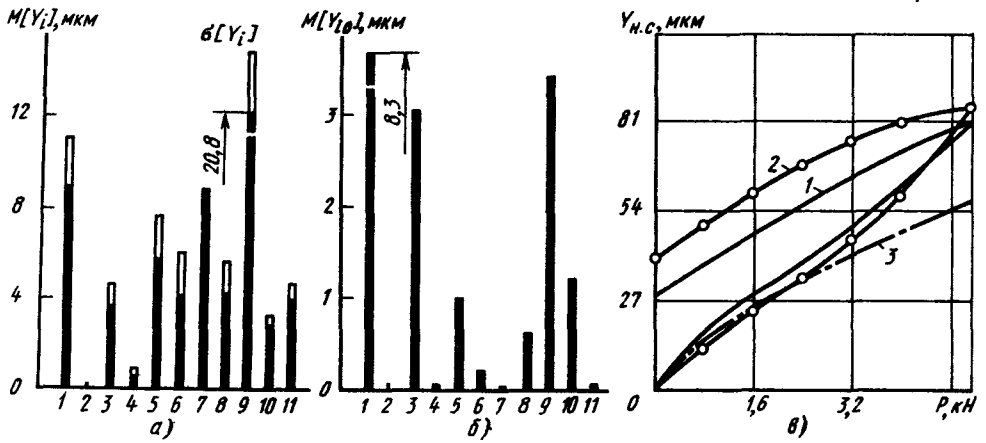


Рис. 6.17. Баланс смещений привода подач в зависимости от порядкового номера элемента: а — нагрузочные смещения; б — остаточные смещения, в — характеристика силовых смещений

рому относится та или иная деталь, сопряжение. Например, резец 1 (рис. 6.16, а) представляет собой деформируемую деталь, μ -элемент; в сопряжении деталей 1 и 2 будут тангенциальные (τ_{12} -элементы) и нормальные (σ_{12} -элементы) смещения с соответствующими коэффициентами $u_{\tau 12}$, $u_{\sigma 12}$ и т. д. Построенная схема (рис. 6.16, б) отражает качественно структуру несущей системы станков: состав и количество по основным группам типовых элементов, необходимость учета передаточных отношений. Уже на этой стадии оператор часть типовых элементов отбрасывает. В данном случае (рис. 6.16, а) не учтены собственные деформации корпуса 2 и станины 3.

В общем случае в различных точках рабочего пространства станка с координатами x, y, z изменяются силовые воздействия и свойства

несущей системы. Поэтому для каждой точки будут различные силовые смещения несущей системы по каждой из координат: $X_{н.с.}(x, y, z)$, $Y_{н.с.}(x, y, z)$, $Z_{н.с.}(x, y, z)$. Но чаще всего достаточно определить смещения, направленные перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. Сгруппировав типовые элементы, получим смещение несущей системы станка в любой точке трехмерного рабочего пространства при нагрузке (разгрузке):

$$\begin{aligned}
 Y_{н.с.}(x, y, z) = & \sum_{i=1}^{n_1} Y_{\mu i}(F, x, y, z) u_{\mu i} \times \\
 & \times (x, y, z) + \sum_{i=1}^{n_2} Y_{\sigma i}^{(p)}(F, x, y, z) \times \\
 & \times u_{\sigma i}(x, y, z) + \sum_{i=1}^{n_3} Y_{\tau i}^{(p)}(F, x, y, z) \times \\
 & \times u_{\tau i}(x, y, z) + \sum_{i=1}^{n_4} Y_{\pi i}(F, x, y, z). \quad (6.25)
 \end{aligned}$$

В уравнении (6.25) в развернутом виде с учетом формул, указанных в табл. 6.9, учтены размеры всех звеньев несущей системы, посадки, материал, вид и качество обработки, внешние и внутренние силы, компоновка узлов станка.

На практике все входящие в выражение (6.25) исходные параметры необходимо учитывать как случайные, а не детерминированные. В качестве вероятностных показателей точности станков приняты математически ожидаемые нагрузочные $M[Y_F]$ и остаточные $M[Y_0]$ смещения и соответствующие им средние квадратические отклонения $\sigma[Y_F]$ и $\sigma[Y_0]$. Математически ожидаемое смещение несущей системы

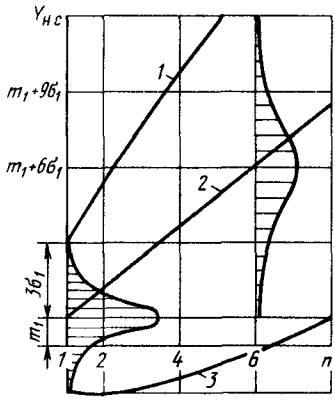


Рис. 6.18. Рассеяние смещений $Y_{н.с.}$ несущей системы станка с ростом числа типовых элементов n конструкции:
 1 — $Y_{н.с.} = nm_1 \pm 3\sigma_1\sqrt{n}$; 2 — $M[Y_{н.с.}] = nm_1$; 3 — $Y_{н.с.} = nm_1 - 3\sigma_1\sqrt{n}$

$M\{Y_n(x,y,z)\}$ определяют как сумму математически ожидаемых смещений m_{y_i} различных типовых элементов:

$$M\{Y_{nc}(x,y,z)\} = \sum_{i=1}^n m_{y_i}(F,x,y,z) u(x,y,z). \quad (6.26)$$

В качестве примера для несущей системы станка 2E450AMФ4, имеющей привод подач, на рис. 6.17 показаны рассчитанные по формуле (6.26) балансы нагрузочных $M\{Y_i\}$ (рис. 6.17, а) и остаточных $M\{Y_{io}\}$ (рис. 6.17, б) смещений и характеристик (рис. 6.17, в). Характеристики построены с учетом сил трения (кривая 1), без учета сил трения (кривая 3), кривая 2 — экспериментальная.

С увеличением числа типовых элементов n конструкции растут значение и рассеяние смещений. Если влияние всех составляющих звеньев принять одинаковым с математическим ожиданием m_1 и средним квадратическим отклонением σ_1 , то смещение несущей системы (рис. 6.18)

$$M\{Y_{nc}\} = m_1 n; \quad \sigma\{Y_{nc}\} = \sigma_1 \sqrt{n},$$

т. е. с увеличением числа элементов снижается точность обработки.

Список литературы

1. **Базров Б. М.** Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.

2. **Балакшин Б. С.** Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1969. 560 с.

3. **Дальский А. М., Кулешова З. Г.** Сборка высокоточных соединений в машиностроении. М.: Машиностроение, 1988. 304 с.

4. **Исследование точности силовых узлов подачи переналаживаемых автоматических линий/Б. И. Черпаков, В. Т. Портман и др.// Станки и инструмент.** № 6. 1988. С. 3—4.

5. **Корневиц Э. Ф., Эндер Г. В.** Формулы для расчета балок на упругом основании. М.: Госстройиздат, 1932. 347 с.

6. **Левина З. М., Решетов Д. Н.** Контактная жесткость машин. М.: Машиностроение, 1971. 267 с.

7. **Металлорежущие станки и автоматы/** Под ред. А. С. Проникова. М.: Машиностроение, 1981. 479 с.

8. **Решетов Д. Н., Портман В. Т.** Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. 335 с.

9. **Справочник технолога-машиностроителя.** М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 656 с. Т. 2. 496 с.

10. **Теория механизмов и машин/** Под ред. К. В. Фролова. М.: Наука, 1987. 365 с.

11. **Чернянский П. М.** Анализ точности технологических систем в условиях силового воздействия//Известия вузов. Машиностроение, 1984. № 4. С. 151—156.

12. **Weck M.** Werkzeugmaschinen Band 4 Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung, VDI Verlag, Düsseldorf. 1985. 248 s.

Глава 7

Тепловые деформации станков

7.1. Тепловые погрешности и их влияние на точность станка

Тепловые погрешности станка влияют на отклонения размеров, формы и расположения обрабатываемых поверхностей. Доля тепловых погрешностей прецизионных станков может составлять 40—70 % общей погрешности обработки.

Подводимая к станку энергия, не затрачиваемая на полезную работу, преобразуется в тепловую энергию. Источниками тепловыделения в станках могут быть электродвигатели, зубчатые и ременные передачи, подшипники, муфты, система смазывания и гидросистема, процесс резания и т. д. Теплота от этих источников передается деталям станка (рис. 7.1, а), перераспределяется между ними, частично идет на нагрев самих источников тепловыделения и частично отводится в окружающую среду.

Общий процесс переноса теплоты в станках может быть расчленен на элементарные процессы: теплопроводность — молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, вызванный разницей температур (распространение теплоты в деталях станка, подвижных и неподвижных соединениях через пятна фактического контакта, в газовых или жидкостных прослойках аэро- и гидростатических или гидродинамических направляющих и др.); конвекцию — перенос теплоты посредством макроскопических элементов среды при их перемещении, обусловленном неоднородным распределением температуры (теплообмен деталей станка со смазочной или охлаждающей жидкостью, окружающей средой, через жидкостную или газовую прослойку и т. д.); тепловое излучение — перенос теплоты электромагнитными волнами, обусловленный температурой и оптическими свойствами среды (теплообмен между деталями станка и окружающей средой).

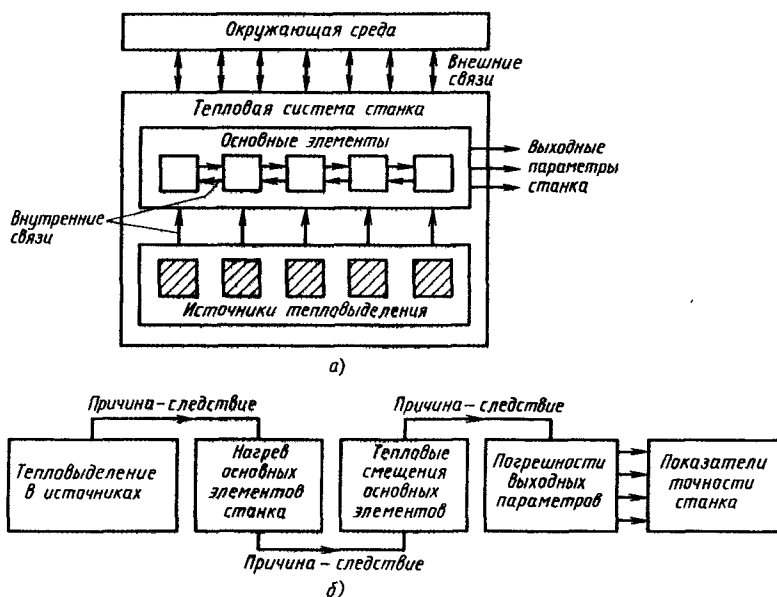


Рис. 7.1. Структурная схема (а) тепловой системы станка и схема (б) причинно-следственных связей механизма формирования тепловых погрешностей станка

Распространение теплоты в станках связано также с переносом самой СОЖ, перемещением формообразующих узлов станка, обрабатываемой заготовки, технологической оснастки, стружки.

Нагрев основных элементов станка (рис. 7.1, б) приводит к изменению их геометрических размеров и формы, что, в свою очередь, приводит к перемещениям и поворотам тех элементов станка, точность положения и движения которых характеризуют его точность.

Тепловым режимом станка называют совокупность всех факторов и процессов, определяющих теплофизическую обстановку в его элементах.

Теплоустойчивость — свойство станка сохранять в установленных пределах выходные параметры точности при различных тепловых воздействиях. Тепловые погрешности станка характеризуются отклонениями его выходных параметров точности при внешних и внутренних тепловых воздействиях.

Цель теплового расчета станка — оценка сопротивляемости станка и его основных элементов тепловым воздействиям и создание теплоустойчивой конструкции станка. В результате рассчитывают значения показателей для всех выходных параметров точности, а также определяют значения параметров элементов станка, их конструкцию и компоновку или назначают другие мероприятия, обеспечивающие достижение показателей точности станка в допустимых пределах.

Тепловой расчет станка выполняют в приведенной ниже последовательности.

1. Осуществляют теплофизический анализ конструкции и разработку расчетной схемы станка. На основе чертежей анализируют конструктивные особенности, компоновку и условия работы станка. В качестве основных элементов выбирают детали (узлы), которые имеют относительно большие линейные размеры, пло-

щадь теплоотдающей поверхности, массу, а также входят в размерную цепь, определяющую относительное положение узлов, несущих инструмент и заготовку. Такими элементами, как правило, являются базовые и корпусные детали, шпиндели и ходовые винты. Выясняют их форму, размеры, материал, из которого их изготавливают, поверхности закрепления и сопряжения, выявляют основные источники тепловыделения, анализируют способы передачи теплоты от основных источников к основным элементам станка, определяют поверхности подвода теплоты к основным элементам станка, анализируют условия теплообмена между основными элементами станка и окружающей средой, выясняют, какие поверхности обдуваемые и какие необдуваемые, анализируют требования, предъявляемые к точности станка и условиям его эксплуатации.

2. Выбирают показатели точности станка. Выходными параметрами станка являются характеристики траекторий движения формообразующих узлов [13]. Показатели точности оценивают отклонения реальных траекторий, вызванные нагреванием станка, от траекторий движения формообразующих узлов ненагретого станка. В качестве показателей точности станка могут быть выбраны линейные и угловые смещения формообразующих узлов или координатных систем инструмента $O_n X_n Y_n Z_n$ и обрабатываемой заготовки $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ (табл. 7.1), построенные на установочных базах формообразующих узлов и связанные с ними с помощью фиксированных точек, траектории движения которых являются выходными параметрами точности станка. Допустимые значения показателей точности назначают исходя из требований, предъявляемых к точности обработки, и той доли, которую могут занимать тепловые смещения элементов станка в общем балансе погрешности обработки (в среднем 20—30 %).

7.1. Показатели точности станков типовых компоновок

| № попор. | Эскиз компоновки | Направление движения рабочего органа | Фиксированные точки | Показатели точности |
|----------|------------------|--------------------------------------|---------------------|--|
| 1 | | Z | 1, 2 | $\alpha_n; \beta_n; \Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | X | 3—5 | $\alpha_3; \beta_3; \gamma_3; \Delta_{3x}; \Delta_{3y}; \Delta_{3z}$ |
| | | Y | 3—5 | $\alpha_3; \beta_3; \gamma_3; \Delta_{3x}; \Delta_{3y}; \Delta_{3z}$ |

| № по пор | Эскиз компоновки | Направление движения рабочего органа | Фиксированные точки | Показатели точности |
|----------|------------------|--------------------------------------|---------------------|---|
| 2 | | Y | 1, 2 | $\alpha_n; \beta_n;$ $\Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | Z | 1, 2 | $\alpha_n; \beta_n;$ $\Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | X | 3—5 | $\alpha_s; \beta_s; \gamma_s;$ $\Delta_{sx}; \Delta_{sy}; \Delta_{sz}$ |
| 3 | | Y | 1, 2 | $\alpha_n; \beta_n;$ $\Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | X | 3—5 | $\alpha_s; \beta_s; \gamma_s;$ $\Delta_{sx}; \Delta_{sy}; \Delta_{sz}$ |
| | | Z | 3—5 | $\alpha_s; \beta_s; \gamma_s;$ $\Delta_{sx}; \Delta_{sy}; \Delta_{sz}$ |
| 4 | | Z | 1, 2 | $\alpha_n; \beta_n;$ $\Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | Y | 1, 2 | $\alpha_n; \beta_n;$ $\Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | X | 3—5 | $\alpha_s; \beta_s; \gamma_s;$ $\Delta_{sx}; \Delta_{sy}; \Delta_{sz}$ |
| 5 | | Y | 1, 2 | $\alpha_n; \beta_n;$ $\Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | X | 3—5 | $\alpha_s; \beta_s; \gamma_s;$ $\Delta_{sx}; \Delta_{sy}; \Delta_{sz}$ |
| | | Z | 3—5 | $\alpha_s; \beta_s; \gamma_s;$ $\Delta_{sx}; \Delta_{sy}; \Delta_{sz}$ |
| 6 | | X | 3—5 | $\alpha_n; \beta_n; \gamma_n;$ $\Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | Z | 3—5 | $\alpha_n; \beta_n; \gamma_n;$ $\Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \Delta_{nz}$ |
| | | — | 1, 2 | $\alpha_s; \beta_s;$ $\Delta_{sx}; \Delta_{sy}; \Delta_{sz}$ |

При выборе показателей точности станка необходимо учитывать их связь с погрешностью обработки: $\Delta = W_3^T M_3^T [(r_n - r_3) + (\Delta_n - \Delta_3) + W_n M_n g_2] - g_1$, где $\Delta = \{\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z\}$ — погрешность обработки в системе координат $O_3 X_3 Y_3 Z_3$:

$$W_3 = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_3 & \beta_3 \\ \gamma_3 & 1 & -\alpha_3 \\ -\beta_3 & \alpha_3 & 1 \end{bmatrix};$$

$$W_n = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_n & \beta_n \\ \gamma_n & 1 & -\alpha_n \\ -\beta_n & \alpha_n & 1 \end{bmatrix} \text{ — матрицы}$$

угловых смещений координатных систем $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ и $O_n X_n Y_n Z_n$ в системе координат $OXYZ$; M_3^T, M_n — матрицы направляющих косинусов координатных систем $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ и $O_n X_n Y_n Z_n$ в системе координат $OXYZ$; $r_n = \{X_n, Y_n, Z_n\}^T, r_3 = \{X_3, Y_3, Z_3\}^T$ — радиус-векторы начала координатных систем $O_n X_n Y_n Z_n$ и $O_3 X_3 Y_3 Z_3$; $\Delta_n = \{\Delta_{nx}, \Delta_{ny}, \Delta_{nz}\}^T; \Delta_3 = \{\Delta_{3x}, \Delta_{3y}, \Delta_{3z}\}^T$ — векторы линейных погрешностей начала координатных систем $O_n X_n Y_n Z_n$ и $O_3 X_3 Y_3 Z_3$; $g_1 = \{X_1, Y_1, Z_1\}^T, g_2 = \{X_2, Y_2, Z_2\}^T$ — радиус-векторы формообразующей точки в системе координат соответственно $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ и $O_n X_n Y_n Z_n$.

Влияние показателей точности станка на возникновение погрешности обработки детали неравноценно и зависит от требований, предъявляемых к точности обрабатываемых деталей (табл. 7.2), класса точности станка (табл. 7.3) и метода формообразования (рис. 7.2).

3. Рассчитывают мощность тепловыделения в источниках. Мощность тепловыделения в источниках оценивают с помощью расчетных зависимостей (см. подразд. 7.2). Кроме того, могут использоваться измеренные температуры в зоне источников тепловыделения, по результатам экспериментальных исследований станков-аналогов, или предельно допустимые значения температур нагревания электродвигателей, масла в системах смазывания и гидросистеме, шпиндельных опор и пр. При сравнительных расчетах конкурирующих вариантов оценивают реакцию станка или его элементов на единичное тепловое воздействие. В этом случае мощность тепловыделения в источниках не рассчитывают. При работе станка на различных режимах тепловые расчеты проводят по средней мощности (Вт) $Q = \sum Q_i \beta_i$, где Q_i — мощность тепловыделения в источниках при работе в i -м режиме, Вт; β_i — относительная продолжительность работы в i -м режиме.

4. Выполняют анализ теплообмена в системе основных элементов станка. Для каждого основного элемента тепловой системы станка составляют уравнение теплового баланса (см.

7.2 Связь показателей точности токарного станка с параметрами точности цилиндрической поверхности

| Показатель точности | Отклонение размера | Отклонение формы |
|---------------------|--------------------|------------------|
| Δ_{3x} | | — |
| Δ_{3y} | | — |
| α_3 | | |
| β_3 | | |
| Δ_{ux} | | |
| Δ_{uy} | | |

подразд. 7.2). Левая часть этого уравнения содержит сумму тепловых потоков, идущих на нагрев основного элемента и отводимых от него в окружающую среду и сопряженные с ним детали, а правая часть — суммарный тепловой поток, подводимый к основному элементу от источников тепловыделения. От системы уравнений с неизвестными тепловыми потоками переходят к системе дифференциальных (нестационарный тепловой режим) или линейных (стационарный тепловой режим) уравнений с неизвестными средними температурами основных элементов станка. Решив полученную систему уравнений, находят неизвестные

7.3. Показатели точности токарных станков различных классов точности

| Класс точности станка | Показатели точности | Пример станка |
|-----------------------|---|---------------|
| Н | $\Delta_{3x}; \beta_3; \Delta_{nx}$ | 16К20 |
| П | $\Delta_{3x}; \beta_3; \Delta_{nx}$ | 16К20ПФ30 |
| В | $\Delta_{3x}; \Delta_{3y}; \beta_3; \alpha_3; \Delta_{nx}; \Delta_{ny}$ | 16К20ВФ1 |
| А | $\Delta_{3x}; \Delta_{3y}; \beta_3; \alpha_3; \Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \beta_n; \alpha_n$ | 16Б20А |
| С | $\Delta_{3x}; \Delta_{3y}; \beta_3; \beta_3; \Delta_{nx}; \Delta_{ny}; \beta_n; \gamma_n; \alpha_n$ | МК6501 |

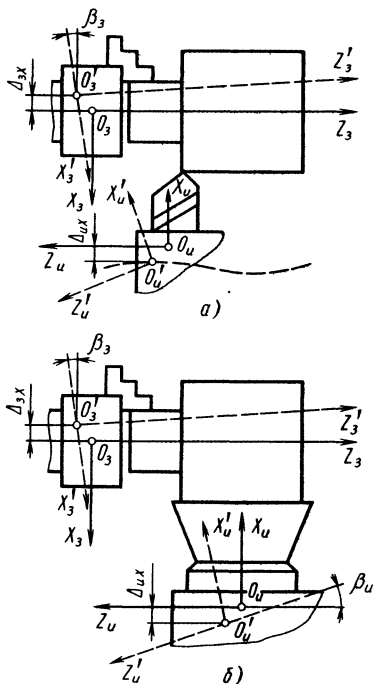


Рис. 7.2. Схемы, поясняющие влияние метода формообразования поверхности на выбор показателей точности станка:

а — метод обкатки — показатели Δ_{3x} , β_3 , Δ_{nx} , б — метод копирования — показатели Δ_{3x} , β_3 , Δ_{nx} , β_n

средние температуры, а затем с помощью законов теплообмена определяют и неизвестные тепловые потоки, которые используют в последующем при температурных расчетах деталей станка.

5. Рассчитывают температурное поле основных элементов станка. Формулы для расчета стационарных температурных полей и средних температур основных элементов станка (см. подразд. 7.3) приведены для базовых и корпусных деталей, шпинделей и ходовых винтов. Для каждой группы деталей приведены зависимости для двух случаев: 1) когда известна мощность тепловыделения в источниках, определенная расчетным путем; 2) когда известна температура в зоне действия источников тепловыделения, определенная по результатам экспериментальных исследований станков-аналогов.

6. Рассчитывают тепловые смещения формообразующих узлов станка. Полученные на предыдущем этапе результаты расчета температурных полей и средних температур основных элементов станка используют в качестве исходных данных для расчета тепловых смещений этих элементов (см. подразд. 7.4).

Формулы для расчета тепловых смещений приведены для базовых и корпусных деталей; шпинделей и ходовых винтов. Рассчитанные тепловые смещения основных элементов станка приводят к смещениям фиксированных точек (см. табл. 7.1) с помощью формул для расчета суммарных тепловых смещений станка.

7. Рассчитывают показатели точности станка. Приведенные в табл. 7.1 показатели точности станка выражаются через тепловые смещения фиксированных точек 1—5 с помощью приведенных ниже соотношений. Показатели точности, характеризующие линейные смещения формообразующих узлов станка, следующие: $\Delta_{3x} = \Delta_{3x}$; $\Delta_{3y} = \Delta_{3y}$; $\Delta_{3z} = \Delta_{3z}$; $\Delta_{nx} = \Delta_{1x}$; $\Delta_{ny} = \Delta_{1y}$; $\Delta_{nz} = \Delta_{1z}$, где Δ_{jk} — тепловые смещения j -й фиксированной точки вдоль k -й оси системы $OXYZ$ ($k = x, y, z$).

Показатели точности, характеризующие угловые смещения формообразующих узлов, для компоновки станков 1, 2 следующие:

$$\alpha_3 = (\Delta_{3z} - \Delta_{5z}) / L_{35}; \quad \beta_3 = (\Delta_{4z} - \Delta_{3z}) / L_{34};$$

$$\gamma_3 = (\Delta_{5x} - \Delta_{3x}) / L_{35}; \quad \alpha_n = (\Delta_{1y} - \Delta_{2y}) / L_{12};$$

$$\beta_n = (\Delta_{2x} - \Delta_{1x}) / L_{12},$$

где L_{ij} — расстояние между i -й и j -й фиксированными точками ($i, j = 1, \dots, 5$).

Для компоновки станков 3—5 $\alpha_3 = (\Delta_{5y} - \Delta_{3y}) / L_{35}$; $\beta_3 = (\Delta_{3x} - \Delta_{5x}) / L_{35}$; $\gamma_3 = (\Delta_{3y} - \Delta_{4y}) / L_{34}$; $\alpha_n = (\Delta_{1y} - \Delta_{2y}) / L_{12}$; $\beta_n = (\Delta_{2x} - \Delta_{1x}) / L_{12}$.

Для компоновки станка 6 $\Delta_{3x} = \Delta_{1x}$; $\Delta_{3y} = \Delta_{1y}$; $\Delta_{3z} = \Delta_{1z}$; $\Delta_{nx} = \Delta_{3x}$; $\Delta_{ny} = \Delta_{3y}$; $\Delta_{nz} = \Delta_{3z}$; $\alpha_3 = (\Delta_{2y} - \Delta_{1y}) / L_{12}$; $\beta_3 = (\Delta_{1x} - \Delta_{2x}) / L_{12}$; $\alpha_n = (\Delta_{4y} - \Delta_{3y}) / L_{34}$; $\beta_n = (\Delta_{3x} - \Delta_{4x}) / L_{34}$; $\gamma_n = (\Delta_{3y} - \Delta_{5y}) / L_{35}$.

8. Осуществляют анализ результатов расчета и разработку рекомендаций для повышения точности станка. Основой для выбора и разработки метода повышения теплостойкости станка являются результаты теплового расчета, когда рассчитанные значения показателей точности станка при внешних и внутренних тепловых воздействиях превышают их предельно допустимые значения. Параметрами воздействия для повышения теплостойкости металлорежущих станков могут быть (см. рис. 7.1) мощность тепловыделения в источниках или тепловой поток в элементах станка, температурное поле основных элементов станка, тепловые смещения основных элементов станка, показатели точности станка.

В первом случае стремятся снизить мощность тепловыделения в источниках, устранить количество теплоты, передаваемой основным элементам станка. Это может быть достигнуто с помощью следующих мероприятий:

выноса источников интенсивного тепловыделения (насосных установок, приводных двига-

телей, коробок скоростей и подач, масляных баков, гидроаппаратуры, станций СОЖ, шкафов с электрооборудованием за пределы станка; изоляции внутренних источников тепловыделения от основных элементов станка: экранирования электродвигателей; теплоизоляции каналов для отвода СОЖ; установления теплоизолирующей прокладки между шпинделем и внутренним кольцом подшипника; применения специальных теплоизолирующих кожухов, прокладок или экранов и направления потоков теплового воздуха, идущих от нагретых элементов к основным элементам станка;

использования механизмов с высоким КПД: уменьшения механических передач и трущихся поверхностей; правильного выбора смазочного материала и оптимального числа зубчатых пар, находящихся в зацеплении; перехода от полужидкостного смазывания к газовому или к трению качения; применения особо точных шпиндельных подшипников с минимальным натягом и специальным смазочным материалом; повышения качества трущихся поверхностей и т. д.;

выбора оптимальных режимов работы источников тепловыделения: электродвигателей, коробок скоростей и подач, скорости движения и подачи масла;

интенсификации отвода теплоты из зоны тепловыделения путем принудительного воздушного, масляного или водяного охлаждения;

рационального размещения источников тепловыделения: расположения источников интенсивного тепловыделения по возможности в верхней части станка так, чтобы большая часть выделяемой ими теплоты передавалась верхним слоям воздуха, расположения источников тепловыделения там, где они вообще не влияют на тепловые смещения основных элементов станка;

изоляции внешних источников тепловыделения: экранирования стен и оконных проемов, изоляции фундамента, поддержания постоянного температурного режима в помещении.

Во втором случае, воздействуя на температурное поле основных элементов станка, стремятся снизить избыточную температуру, получить равномерное или симметричное распределение температурного поля, стабилизировать температуру нагревания основных элементов. Это достигается проведением следующих мероприятий:

интенсификации отвода теплоты от основных элементов станка, например, путем увеличения площади теплоотдающей поверхности или улучшения условий теплоотдачи посредством принудительной внешней или внутренней конвекции: обрешения наружных поверхностей теплоотдачи; разбрызгивания масла на внутренней поверхности шпиндельной коробки; охлаж-

дения внутренней поверхности станины СОЖ; применения охлаждающих устройств — компрессорных холодильников, термоэлектрических батарей, полупроводниковых охлаждающих устройств;

тепловой изоляции основных элементов станка: размещения между передней бабкой и станиной, шпинделем и его опорами теплоизолирующих прокладок; закрепления прокладок из теплоизолирующего материала, охватывающих весь контур поперечного сечения направляющих;

равномерного распределения источников тепловыделения по всему объему: направления горячего воздуха, идущего от электродвигателя, с помощью отражающих плит на более холодные стенки; выравнивания температурного поля в грунте цеха, специальный подогрев фундаментов; направленного нагревания или охлаждения основных элементов станка с помощью единичных нагревателей или тепловых труб;

применения дополнительных источников теплоты для сокращения времени стабилизации температуры, выравнивания температурного поля, например использования дополнительного источника теплоты для быстрого нагревания масла в баке системы смазывания до температуры его стабилизации;

равномерного распределения масс металла для выравнивания неравномерной теплоемкости, а следовательно, и неравномерного температурного поля в нестационарном режиме;

подбора материалов основных элементов станка с учетом их теплопроводности: применения материалов с высоким коэффициентом теплопроводности для деталей, расположенных в непосредственной близости к источникам тепловыделения, во избежание высоких температурных градиентов.

В третьем случае стремятся снизить тепловые смещения основных элементов станка путем следующих мероприятий:

сокращения длины деталей, размеры которых непосредственно влияют на показатели точности станка: ограничения вылета шпинделя до упорного подшипника, ограничения расстояния от оси шпинделя до направляющих и т. д.;

подбора материалов основных элементов станка с учетом их термомеханических характеристик: применения материалов с низким коэффициентом линейного расширения типа инвара, кварца, чугуна высоколегированного никелем (36 %); учета разности коэффициентов линейного расширения и модулей упругости сопрягаемых деталей (например, подбора для фундаментов материалов с коэффициентом линейного расширения таким же, как и чугуна); изготовления элементов станка ползунов, каре-

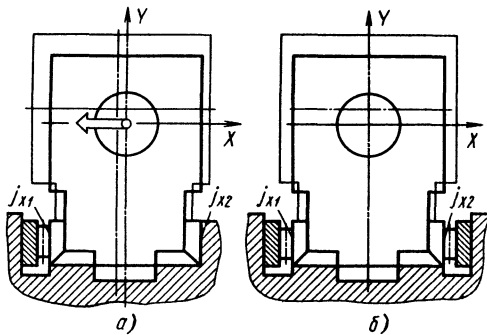


Рис. 7.3. Смещение оси шпинделя нагретого ползуна при различной жесткости направляющих j_{x1} и j_{x2} :
 а — $j_{x1} < j_{x2}$; б — $j_{x1} = j_{x2}$

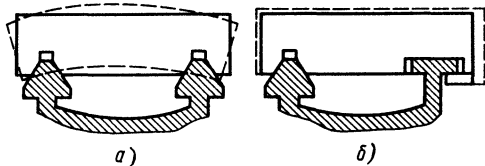


Рис. 7.4. Тепловые деформации стола при наличии (а) и отсутствии (б) избыточных связей

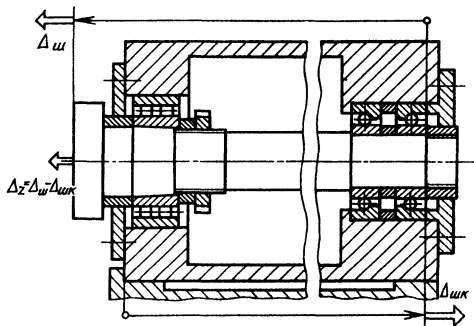


Рис. 7.5. Шпиндельный узел с взаимной компенсацией тепловых смещений шпинделя $\Delta_{ш}$ и шпиндельной коробки $\Delta_{шк}$ (стрелками показаны направления тепловых смещений)

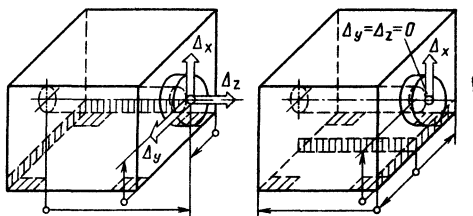


Рис. 7.6. Тепловые смещения оси шпинделя Δ_x , Δ_y , Δ_z при различном положении плоскостей базирования шпиндельной коробки

ток, стоек, станин, столов, шпинделей из керамики на основе Al_2O_3 или нитрида кремния;

рационального выбора жесткости поверхностей сопряжения и соединения основных элементов станка (рис. 7.3);

уменьшения числа избыточных связей (рис. 7.4), являющихся источником дополнительных температурных напряжений: выбора соответствующего расположения фиксирующих элементов, например упорных подшипников на шпинделе, мест закрепления шпиндельной бабки; установки продольно-обрабатывающих тяжелых станков на регулируемых башмаках; установки точных станков с жесткой станиной на трех точках;

равномерного распределения масс металла, обеспечивающих малые температурные напряжения и изгиб, и придание деталям форм, способствующих равномерным тепловым смещениям;

создания предварительных упругих смещений деталям, направленных в сторону, противоположную тепловым смещениям, например, компенсация тепловых смещений ходовых винтов предварительным растяжением. Винт выполняют с постоянной коррекцией шага, обеспечивающей номинальный шаг в растянутом состоянии винта. При нагревании винта уменьшается сила начального растяжения, а шаг изменяется незначительно.

В четвертом случае минимизируют влияние теплового режима на показатели точности станка путем проведения следующих мероприятий:

взаимной компенсации тепловых смещений основных элементов станка; выбора компоновки и схем базирования основных элементов станка таким образом, чтобы тепловые смещения взаимно уничтожались. Например, точку закрепления шпиндельной коробки выбирают таким образом, чтобы она перемещалась назад на то же расстояние, что и шпиндель (рис. 7.5);

рационального выбора баз, схем базирования и крепления, направления тепловых смещений основных элементов станка так, чтобы это не влияло на показатели точности станка (рис. 7.6); создания термосимметричных конструкций с плоскостью симметрии, проходящей через ось шпинделя;

сокращения суммарной длины размерных цепей, определяющих относительное положение формообразующих узлов;

уменьшения числа составляющих размерной цепи, определяющей относительное положение формообразующих узлов.

Если с помощью перечисленных мероприятий не может быть обеспечена требуемая точность станка, используют методы компенсации тепло-

вых погрешностей, когда на основе информации об изменении показателей точности станка при тепловых воздействиях вносят корректирующее воздействие, направленное на изменение линейного, а в некоторых случаях и углового положения формообразующих узлов станка. Применяют методы компенсации по тепловым характеристикам, косвенно характеризующим показатели точности станка: мощности тепловыделения, температурному полю или тепловым смещениям основных элементов станка, частоте вращения шпинделя, погрешности обработки детали. Функциональная связь этих характеристик с показателями точности станка следует из схемы причинно-следственных связей, приведенной на рис. 7.1. Объектами компенсирующего воздействия могут быть программа управления, детали и узлы станка, элементы системы управления.

7.2. Расчет мощности тепловыделения в механизмах и системах станка

Тепловыделение в источниках характеризуется мощностью и плотностью теплового потока. Мощность тепловыделения (Вт) — количество теплоты, выделяющейся в единицу времени. Плотность теплового потока (Вт/м²) — количество теплоты, переносимой через поверхность в единицу времени.

Мощность тепловыделения в механизмах и узлах станка рассчитывается из предположения, что вся работа трения превращается в теплоту. Поэтому для оценки мощности тепловыделения в механизмах и узлах станка могут использоваться существующие зависимости для определения потерь механической энергии на трение [7.5—7.8].

Подшипники качения. Мощность тепловыделения (Вт) в подшипниках качения

$$Q = 1,047 \cdot 10^{-4} M_T n. \quad (7.1)$$

Здесь M_T — момент трения, Н·мм; $M_T = M_0 + M_1$, где M_0 — момент трения, зависящий от типа подшипника, Н·мм; M_1 — момент трения, зависящий от нагрузки на подшипник, Н·мм; n — частота вращения, мин⁻¹.

Момент M_0 достигает больших значений при высокой частоте вращения, когда при прочих равных условиях потери на трение в основном (на 90—95 %) зависят от условий смазывания и вязкости смазочного материала.

При $vn > 2000$ $M_0 = 10^{-7} f_0 (vn)^{2/3} d_{cp}^3$.

При $vn \leq 2000$ $M_0 = 160 \cdot 10^{-7} f_0 d_{cp}^3$.

Здесь v — кинематическая вязкость смазочного материала при рабочей температуре подшипника (табл. 7.4), при пластичном смазочном материале — вязкость базового масла, среднее

7.4. Основные характеристики масел

| Масло | Плотность, кг/м ³ | Кинематическая вязкость, мм ² /с, при 50 °С |
|-------------------|------------------------------|--|
| Индустриальное 20 | 890 | 17—23 |
| Индустриальное 30 | 900 | 27—33 |
| Индустриальное 45 | 890 | 38—52 |
| Индустриальное 50 | 920 | 42—58 |
| Велосит «Л» | 870 | 4,0 — 5,1 |

значение $v = 15$ мм²/с), мм²/с; f_0 — коэффициент, зависящий от типа подшипника и условий смазывания (табл. 7.5); d_{cp} — средний диаметр подшипника, мм.

Момент M_1 особенно велик при малой частоте вращения тяжело нагруженных подшипников [4], в остальных случаях его можно не учитывать.

Подшипники скольжения. Мощность тепловыделения (Вт) в подшипниках скольжения

$$Q = 17,3 \cdot 10^{-15} l d^3 \mu n^2 / \delta + P v f, \quad (7.2)$$

где l — длина рабочей поверхности подшипника в направлении оси вала, мм; d — диаметр шейки вала, мм; $\mu = \nu \rho$ — динамическая вязкость масла при рабочей температуре подшипника, мПа·с; ρ — плотность масла (см. табл. 7.5), кг/м³; n — частота вращения вала, мин⁻¹; δ — диаметральный зазор, мм; P — нагрузка на подшипник, Н; v — окружная скорость на шейке вала, м/с; f — коэффициент трения.

Для подшипников, работающих в условиях жидкостного трения, вторым слагаемым в формуле (7.2) можно пренебречь. Для тяжело нагруженных подшипников, работающих в условиях смешанного трения, среднее значение $f_{cp} = 0,03 \dots 0,06$.

Гидростатические подшипники. Мощность тепловыделения (Вт) в радиальных гидростатических подшипниках $Q = 72 \cdot 10^{-16} d^4 n^2 \mu / \delta + 3,65 \rho^2 \delta^3 / \mu$, где d — диаметр шейки вала, мм; n — частота вращения вала, мин⁻¹; δ — диаметральный зазор, мм; ρ_n — давление, создаваемое насосом, МПа.

Гидродинамические подшипники. Мощность тепловыделения (Вт) в многоклиновых гидродинамических подшипниках $Q = 7,4 \cdot 10^{-12} \mu n^2 d^3 z$, где n — частота вращения вала, мин⁻¹; d — диаметр шейки вала, мм; z — число башмаков (клиньев) в подшипнике.

Щелевые уплотнения. Мощность тепловыделения (Вт) в щелевых уплотнениях $Q = 1,7 \cdot 10^{-14} \mu L d^3 n^2 / \delta$, где L — длина уплотнения (уплотняющей щели) вдоль оси вала, мм; d — диаметр шейки вала, мм; n — частота вращения вала, мин⁻¹; δ — диаметральный зазор, мм.

7.5. Значения коэффициента f_0

| Тип подшипника | Смазывание | | |
|---|-----------------------|--|--|
| | масляным ту- маном | в масляной ванне пластичным сма- зочным материалом | в масляной ван- не впрыскива- нием |
| Шариковый радиальный однорядный и двухрядный сферический | 0,7 — 1 | 1,5 — 2 | 3 — 4 |
| Шариковый радиально-упорный: однорядный | 1 | 2 | 4 |
| двухрядный | 2 | 4 | 8 |
| Роликовый радиальный: с цилиндрическими роликами иглочатый: | 1 — 1,5 | 2 — 3 | 4 — 6 |
| однорядный | 3 — 6 | 6 — 12 | 12 — 24 |
| двухрядный | 6 — 10 | 12 — 20 | 24 — 40 |
| двухрядный сферический | 2 — 3 | 4 — 6 | 8 — 12 |
| Роликовый радиально-упорный конический | 1,5 — 2 | 3 — 4 | 6 — 8 |
| Шариковый упорный | 0,7 — 1 | 1,5 — 2 | 3 — 4 |
| Роликовый упорный: с цилиндрическими роликами | — | 2 | 4 |
| сферический | — | 3 — 4 | 6 — 8 |

Примечание. Меньшие значения f_0 даны для более легких серий.

Зубчатые передачи. Мощность тепловыделе-
ния (Вт) в зубчатых передачах

$$Q = v_k \left(C_{ок} b \sqrt{\mu v_k + 2mK_k f_k P_k / (d_k \cos^2 \beta)} \right). \quad (7.3)$$

Здесь v_k — окружная скорость колеса, м/с; $C_{ок}$ — коэффициент, зависящий от условий смазывания; b — ширина колеса, мм; m — модуль, мм; $K_k = \pi(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) / [2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]$; $K_k = 0,9...1,2$ для прямозубого зацепления, где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — коэффициенты перекрытия соответственно за полюсом и до полюса зацепления; $f_k = 0,08...0,1$ — условный коэффициент трения, причем $f_k = 0,08$ — для колес со шлифованными зубьями; P_k — окружная сила; N ; d_k — диаметр начальной окружности, мм; β — угол наклона зубьев, °.

Для отдельно расположенной передачи: при обильной подаче масла $C_{ок} = 0,6 \cdot 10^{-2}$; при погружении колеса на высоту зуба $C_{ок} = 10^{-2}$. В коробке скоростей с циркулирующим смазочным материалом: для колес, не находящихся в зацеплении, $C_{ок} = (1...1,5)10^{-2}$; для колес, находящихся в зацеплении, $C_{ок} = (2...3)10^{-2}$ (большие значения $C_{ок}$ для тяжелых и крупных станков при модуле колеса $m > 5$ мм).

Ременные передачи. Мощность тепловыделе-
ния (Вт) в ременных передачах

$$Q = C_0 z v_p \left(\frac{1}{d_{шк1}} + \frac{1}{d_{шк2}} \right) + 0,03 \varphi P_0 v_p,$$

где C_0 — коэффициент, зависящий от типа ремня и его скорости; z — число ремней или

ребер (для поликлиновых ремней); $z = 1$ для зубчатых ремней; v_p — скорость ремня, м/с; $d_{шк1}, d_{шк2}$ — соответственно диаметры ведущего и ведомого шкивов, см; φ — коэффициент тяги; для клиновых ременных передач $\varphi = 0,5$; для поликлиновых передач с ремнями сечений K, L, M соответственно φ равно 1,0; 0,8; 0,5; P_0 — передаваемая окружная сила, Н.

Для клиновых и поликлиновых ремней $C_0 = 10^3(K_1 + K_2 v_p)$.

Значения коэффициентов K_1 и K_2 для клиновых (сечений A, B, B) и поликлиновых (сечений K, L, M) ремней:

| Сече- ние | A | B | B | K | L | M |
|--------------|--------|--------|---------|--------|--------|-------|
| K_1 | 0,250 | 0,720 | 2,000 | 0,016 | 0,370 | 2,150 |
| K_2 | 0,0150 | 0,0110 | 0,00750 | 0,0040 | 0,0080 | 0,008 |

$$\text{Для зубчатых ремней } C_0 = K_3 b + K_4 v_p \sqrt{b},$$

где b — ширина ремня, мм.

| Модуль, мм | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
|------------|------|------|------|-----|------|------|------|
| K_3 | 0,40 | 0,90 | 2,30 | 4,0 | 21,0 | 35 | 100 |
| K_4 | 0,63 | 0,95 | 1,45 | 1,9 | 4,11 | 2,21 | 4,11 |

Для зубчатых ремней мощность тепловыделе-
ния под нагрузкой определяется в первом приближении, как для зубчатых передач $f_k = 0,35$.

Коробки скоростей и подач. Мощность тепло-
выделения (Вт) в коробках скоростей и подач

$$Q = K_m d_{ср} (\sum n_i + K_{ш} d_{ш} n_{ш} / d_{ср}), \quad (7.4)$$

где $K_m = (3...5)10^{-3}$ — коэффициент, меньшие значения при высоком качестве сборки, хорошей приработке; $d_{ср}$ — средний диаметр шеек

промежуточного вала, мм; n_i — частота вращения вала, мин^{-1} ; $K_{ш}$ — коэффициент, учитывающий дополнительные потери в шпindelных подшипниках: $K_{ш}=1,5$ для шпинделей на подшипниках качения; $K_{ш}=2$ для шпинделей на подшипниках скольжения; $d_{ш}$ — средний диаметр шеек шпинделя, мм; $n_{ш}$ — частота вращения шпинделя, мин^{-1} .

Формула (7.4) позволяет лишь ориентировочно оценить значение мощности тепловыделения в коробках скоростей и подач. Более точно мощность тепловыделения в коробке на каждой ступени частоты вращения рассчитывают путем суммирования потерь по каждой группе элементов: зубчатым колесам, подшипникам, муфтам и т. д. Суммарная мощность тепловыделения (Вт) в коробке $Q = Q_{хх} + Q_{ш} - Q_{м}$. Здесь $Q_{хх}$ — мощность тепловыделения на холостом ходу, Вт; $Q_{ш}$ — мощность тепловыделения под нагрузкой, Вт; $Q_{м}$ — мощность теплового потока, отводимого маслом, Вт, $Q_{м} = c\rho V_m(\theta_{м2} - \theta_{м1})$, где c — удельная теплоемкость масла [среднее значение $c = 1880 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$], $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; V_m — расход прокачиваемого масла, $\text{м}^3/\text{с}$; $\theta_{м2}$ — температура масла на выходе, $^\circ\text{C}$; $\theta_{м1}$ — температура масла на входе, $^\circ\text{C}$. Среднее значение $\theta_{м2} - \theta_{м1} = 2 \dots 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Передача винт—гайка качения. Мощность тепловыделения в передаче винт—гайка качения (ВГК) и опорах ходового винта рассчитывают по формуле (7.1). Для стандартных отечественных передач значения момента M_0 (Н·мм) (они определены при условии, что значение силы предварительного натяга составляет 25 % допустимой осевой статической нагрузки) приведены ниже.

| | | | | |
|--------------|---------|---------|----------|---------|
| $d \times t$ | 25 × 5 | 32 × 10 | 40 × 10 | 50 × 10 |
| M_0 | 260 | 410 | 630 | 1140 |
| | 63 × 10 | 80 × 10 | 100 × 10 | |
| | 1950 | 3210 | 5200 | |

Примечание. d — диаметр винта, мм; t — шаг, мм.

При практических расчетах момент M_1 , зависящий от внешней осевой нагрузки на винт и его опоры, можно не учитывать.

Для широко применяемых в опорах механизмов подачи станков с ЧПУ комбинированных подшипников типа 504700, 504900, содержащих один упорный и один радиальный роликовый подшипник, в табл. 7.6 приведены значения момента трения при холостом ходе.

Направляющие скольжения. Мощность тепловыделения (Вт) в направляющих скольжения $Q = pSvf$, где p — давление в направляющих, МПа; S — площадь рабочей поверхности, мм^2 ; v — скорость скольжения, м/с; f — коэффициент трения скольжения.

7.6. Момент трения холостого хода комбинированных упорно-радиальных роликовых подшипников

| Обозначение подшипника | Размеры подшипника, мм | Момент трения холостого хода, Н·мм |
|------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 504705 | 25 × 57 | 650 |
| 504905 | 25 × 72 | 2000 |
| 504706 | 30 × 62 | 850 |
| 504906 | 30 × 80 | 2950 |
| 504707 | 35 × 70 | 1300 |
| 504708 | 40 × 75 | 1500 |
| 504908 | 40 × 90 | 3900 |
| 504709 | 45 × 80 | 1750 |
| 504910 | 50 × 110 | 7000 |
| 504911 | 55 × 115 | 7600 |
| 504912 | 60 × 120 | 8600 |

Значения коэффициента трения со смазочным материалом для пары:

| Пара | Коэффициент |
|----------------------|-------------|
| Чугун — чугун | 0,15—0,17 |
| Сталь — чугун | 0,05—0,15 |
| Сталь — сталь | 0,05—0,10 |
| Сталь — бронза | 0,10—0,15 |
| Чугун — бронза | 0,15—0,17 |
| Чугун — текстолит | 0,17—0,20 |
| Чугун — фторопласт 4 | 0,02—0,03 |

Примечание. Значения f даны для следующих условий: давление 0,2 МПа, смазочный материал — масло «Индустриальное 45».

Направляющие качения. Мощность тепловыделения (Вт) в направляющих качения $Q = (nP_0 + f_k P / r_{пр})v$, где n — число граней направляющих; P_0 — начальная сила трения на одной грани направляющих, Н; для сепараторов всех конструкций — в среднем $P_0 = 4 \text{ Н}$; f_k — коэффициент трения качения; $f_k = 0,01$ мм для стальных закаленных направляющих, шариковых или роликовых; $f_k = 0,025$ мм для чугунных незакаленных направляющих; $r_{пр}$ — приведенный радиус тел качения, мм; P — нормальная нагрузка на одну направляющую, Н; v — скорость перемещения рабочего органа, м/с.

Шафы электрического и электронного оборудования, как правило, не находятся в непосредственном контакте с основными элементами станка, а передают им свою энергию путем конвективного и лучистого теплообмена. В этом случае тепловой поток к основным элементам станка незначителен, и его влиянием на тепловой режим станка можно пренебречь. В противном случае тепловой поток Q (Вт), передаваемый основным элементам станка от шкафов электрического и электронного оборудования, $Q = \Sigma W_s - \Sigma Q_i$, где ΣW_s — тепловой поток встроенного электрооборудования, Вт; ΣQ_i — тепловой поток, отводимый в окружающую среду, Вт.

7.7. Значения теплопроводности λ , плотности ρ , температурного коэффициента линейного расширения β , коэффициента Пуассона μ , модуля упругости E , удельной теплоемкости c различных материалов

| Материал | λ , Вт (м·°) | ρ , кг/м ³ | $\beta \cdot 10^6$, 1/°С | μ | $E \cdot 10^{-11}$, Па | c , Дж/(кг·°С) |
|-----------|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------|-------------------------|------------------|
| Сталь | 45 | 7900 | 11—12 | 0,24—0,28 | 2—2,1 | 460 |
| Чугун | 63 | 7220 | 10—11 | 0,23—0,27 | 1,2—1,6 | 500 |
| Бетон | 1,3 | 2300 | 10—14 | 0,16—0,18 | 0,2 | 1150 |
| Синтегран | 1,7 | 2500 | 12—14 | 0,25—0,40 | 0,35 | 920 |

Процесс резания. Мощность тепловыделения (Вт) в процессе резания $Q = \sum P_i v_i t_i / \sum t_i$, где P_i — сила резания, Н; v_i — скорость резания, м/с; t_i — время работы в i -м режиме, с.

Эта теплота распределяется между заготовкой, стружкой и охлаждающей жидкостью. При резании металлическим инструментом металлов с высокой теплопроводностью (углеродистые стали) в среднем 60—80 % теплоты уходит в стружку, а при шлифовании примерно столько же в заготовку. Другие составляющие теплоотвода достигают в среднем 5—15 %. Количество теплоты, отводимой в стружку и инструмент, растет с увеличением скорости резания и площади срезаемого слоя, а количество теплоты, отводимой в СОЖ, — с увеличением ее подачи и теплоемкости. При глубинном шлифовании в стружку может уходить до 75 % теплоты. При обработке металлическим инструментом материалов с низкой теплопроводностью (жаропрочные, титановые сплавы) 35—45 % всей теплоты переносится в заготовку, 20—40 % — в инструмент.

Система смазывания. Мощность тепловыделения (Вт) в системе смазывания $Q = p Q_n / (\eta_o \eta_{мех})$, где p — давление в гидросистеме, Па; Q_n — производительность насоса, м³/с; η_o — объемный КПД насоса; $\eta_{мех}$ — механический КПД насоса.

Расчет тепловых потоков в системе основных элементов станка. Уравнение теплового баланса i -го основного элемента

$$Q_i + Q_{ci} + \sum_{j=1, j \neq i}^n Q_{ij} = \Sigma Q_{ni}$$

Здесь Q_i — тепловой поток, идущий на нагрев основного элемента (аккумуляция тепловой энергии), Вт; Q_{ci} — тепловой поток, отводимый от элемента в окружающую среду, Вт; n — общее число основных элементов; Q_{ij} — тепловой поток в сопряжении между i -м и j -м элементами, Вт; ΣQ_{ni} — суммарный тепловой поток, подводимый к основному элементу станка от источников тепловыделения, Вт; $Q_i = c_i m_i \partial \theta_i / \partial t$, где c_i — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); m_i — масса элемента, кг; θ_i — средняя температура элемента, °С; t — время, с.

Тепловой поток

$$Q_{ci} = h_i S_i (\theta_i - \theta_{ci}), \quad (7.5)$$

где h_i — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, Вт/(м²·°С); S_i — площадь теплоотдающей поверхности, м²; θ_{ci} — температура окружающей среды, °С.

Тепловой поток

$$Q_{ij} = h_{ctij} S_{ctij} (\theta_i - \theta_j), \quad (7.6)$$

где h_{ctij} — коэффициент теплопередачи между i -м и j -м элементами, Вт/(м²·°С); S_{ctij} — площадь теплопередающей поверхности, м²; θ_i — средняя температура сопряженного элемента, °С.

Значения коэффициента теплопередачи [Вт/(м²·°С)] в затянутых стыках без смазочного материала (I) и со смазочным материалом (II) приведены ниже.

| Способ обработки сопрягаемых поверхностей | I | II |
|---|------|------|
| Шлифование + шлифование . . . | 1750 | 2700 |
| Шлифование + шабрение . . . | 2100 | 6000 |
| Шабрение + шабрение . . . | 2500 | 4400 |

Коэффициент теплопередачи [Вт/(м²·°С)] тонких тел (клиньев, планок, прокладок и пр.) $h_{ct} = [1/h_{ct1} + \delta/\lambda + 1/h_{ct2}]^{-1}$, где h_{ct1} , h_{ct2} — коэффициенты теплопередачи в стыках, Вт/(м²·°С); δ — толщина тела, м; λ — теплопроводность (табл. 7.7), Вт/(м·°С).

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С), плоской стенки $h_{ct} = [1/h_1 + \delta/\lambda + 1/h_2]$, где h_1 , h_2 — коэффициенты теплоотдачи соответственно на наружной и внутренней поверхностях стенки, Вт/(м²·°С); δ — толщина стенки, м.

Коэффициент теплопередачи [Вт/(м²·°С)] воздушной или жидкостной прослойки определяется в зависимости от комплекса:

$$\text{PrGr} = (g\beta/(va)) l^3 (\theta_i - \theta_j). \quad (7.7)$$

Здесь $g\beta/(va)$ — комплекс, зависящий от физических свойств среды (табл. 7.8); g — ускорение свободного падения, м/с²; β — температурный коэффициент линейного расширения, 1/°С; ν — кинематическая вязкость среды, м²/с; a — температуропроводность среды,

7.8. Значения комплекса $\{g\beta/(va)\} 10^{-8}$ для различных сред

| Среда | Определяющая температура $(\theta_i + \theta_j)/2, ^\circ\text{C}$ | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| Воздух | 1,039 | 0,884 | 0,761 | 0,658 | 0,571 |
| Вода | 124 | 262 | 377 | 505 | 656 |
| Масло | 40 | 63,7 | 94,8 | 134 | 183 |

m^2/c ; l — характерный линейный размер (толщина прослойки), м; $(\theta_i - \theta_j)$ — температурный напор, $^\circ\text{C}$.

При $\text{PrGr} \leq 1000$ $h = \lambda/L$.

При $\text{PrGr} > 1000$ для плоской прослойки

$$h_n = B \sqrt[4]{(\theta_i - \theta_j)/l};$$

для цилиндрической прослойки

$$h_u = B \frac{d_2 - d_1}{d_1 \ln(d_2/d_1)} \sqrt[4]{2(\theta_i - \theta_j)/(d_2 - d_1)},$$

где B — коэффициент; для воздуха $B=0,45$, для воды $B=43$, для масла $B=5,5$; d_1, d_2 — диаметр соответственно внутренней и наружной поверхностей прослойки, м.

Средняя температура ($^\circ\text{C}$) в неустановившемся режиме основных элементов тепловой системы станка может быть найдена путем решения системы

$$[c]\partial T/\partial t + [k][T] = [Q], \quad (7.8)$$

где $[c]$ — матрица теплоемкости конструкции; $T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ — матрица средних температур основных элементов; n — общее число основных элементов; $[k]$ — матрица теплопередачи конструкции; $[Q]$ — вектор тепловой нагрузки.

$$[c] = \begin{bmatrix} c_1 m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2 m_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_n m_n \end{bmatrix};$$

$$[k] = \begin{bmatrix} h_1 S_1 + \sum_{j=2}^n h_{cr1j} S_{cr1j} & h_{cr12} S_{cr12} & \dots & h_{cr1n} S_{cr1n} \\ h_{cr21} S_{cr21} & h_2 S_2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n h_{cr2j} S_{cr2j} & \dots & h_{cr2n} S_{cr2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{crn1} S_{crn1} & h_{crn2} S_{crn2} & \dots & h_n S_n + \sum_{j=1}^{n-1} h_{crnj} S_{crnj} \end{bmatrix};$$

Среднюю температуру ($^\circ\text{C}$) в установившемся режиме основных элементов тепловой системы станка определяют путем решения системы линейных уравнений

$$[k][T] = [Q], \quad (7.9)$$

Рассчитанные по формуле (7.8) или (7.9) средние температуры основных элементов используют для расчета тепловых потоков в тепловой системе станка по формулам (7.5), (7.6).

7.3. Расчет температурных полей основных элементов станка

Распространение теплоты в элементах станка, как в твердых телах, происходит посредством теплопроводности. Поэтому определение температурного состояния элементов станка относят к задачам теории теплопроводности.

Тепловое состояние твердого тела или системы тел количественно характеризуется температурным полем, которое является совокупностью значений температур во всех точках тела в рассматриваемый момент времени. Нестационарное поле изменяется во времени, стационарное — остается неизменным. Если температуры всех точек тела равны между собой в любой момент времени, то это поле температур называется равномерным. Температура, отсчитываемая относительно температуры окружающей среды, называется избыточной.

Шпиндельные узлы. Избыточную температуру (далее просто температура) шпинделя (рис. 7.7) рассчитывают исходя из критерия Био:

$$\text{Bi} = hL / (2\lambda), \quad (7.10)$$

где h — коэффициент теплоотдачи (методика расчета коэффициента теплоотдачи представлена ниже),

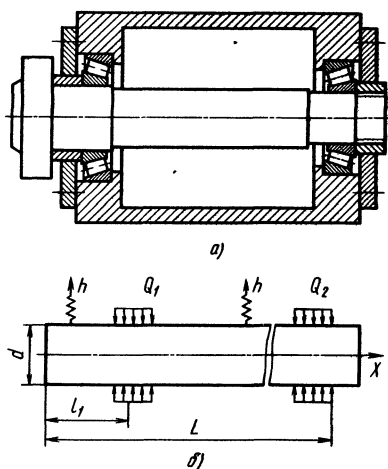


Рис. 7.7. Эскиз (а) шпиндельного узла и расчетная схема (б) шпинделя

Вт/(м²·°С); L — длина шпинделя, м; λ — теплопроводность (см. табл. 7.7), Вт/(м·°С).

Если $Bi \leq 0,1$, то рассчитывают среднюю температуру (°С) шпинделя:

$$\vartheta_{cp} = \Sigma Q_i (\Sigma h_i S_i), \quad (7.11)$$

где ΣQ_i — суммарный тепловой поток, поступающий в шпиндель (в среднем в шпиндель поступает 50 % теплоты, выделяющейся в опорах), Вт; h_i — коэффициент теплоотдачи с i -й поверхности шпинделя, Вт/(м²·°С); S_i — площадь теплоотдающей поверхности, м².

Если $Bi > 0,1$, то температурное поле (°С) шпинделя

при $0 \leq x \leq L_1$

$$\vartheta(x) = \frac{Q_1 B_2 + Q_2 B_3}{(B_1 + B_2) \sqrt{\lambda h A p}} \frac{\text{ch}(mx)}{\text{sh}(mL_1)}$$

при $L_1 < x \leq L$

$$\vartheta(x) = \frac{Q_1 B_1 - Q_2 B_3}{(B_1 + B_2) \sqrt{\lambda h A p}} \frac{\text{ch}[m(L-x)]}{\text{sh}[m(L-L_1)]} + \frac{Q_2}{\sqrt{\lambda h A p}} \frac{\text{ch}[m(x-L_1)]}{\text{sh}[m(L-L_1)]}$$

Здесь Q_1, Q_2 — тепловой поток, поступающий в шпиндель из опор, Вт; $A = \pi d^2/4$ — площадь поперечного сечения шпинделя, м²; $p = \pi d$ — периметр поперечного сечения шпинделя, м, где d — средний диаметр шпинделя, м; L_1 — длина консольной части шпинделя, м.

$$m = \sqrt{hp/(\lambda A)}; \quad B_1 = 1/\text{th}(mL_1);$$

$$B_2 = 1/\text{th}[m(L-L_1)]; \quad B_3 = 1/\text{sh}[m(L-L_1)];$$

$$\text{sh}(mx) = (e^{mx} - e^{-mx})/2; \quad \text{ch}(mx) = (e^{mx} + e^{-mx})/2,$$

$$\text{th}(mx) = \text{sh}(mx)/\text{ch}(mx). \quad (7.12)$$

При известной температуре ϑ_1, ϑ_2 (°С) опор температурное поле (°С) шпинделя при $0 \leq x \leq L$

$$\vartheta(x) = \vartheta_1 \text{ch}(mx)/\text{ch}(mL_1);$$

при $L_1 < x \leq L$

$$\vartheta(x) = \frac{\vartheta_1 \text{sh}[m(L-x)] + \vartheta_2 \text{sh}[m(x-L_1)]}{\text{sh}[m(L-L_1)]}$$

Шпиндельные коробки. При расчете температурного поля шпиндельных коробок различают два случая: тепловыделение происходит в основном в механизмах, заключенных внутри коробки, а ее стенки нагреваются примерно равномерно; тепловыделение в шпиндельных опорах интенсивно и полностью определяет температурное поле шпиндельной коробки.

В первом случае рассчитывают средневзвешенную температуру (°С) корпуса коробки с учетом теплового потока, отводимого в сопряженную деталь:

$$\vartheta_{cp} = \frac{\Sigma Q_i}{\Sigma h_i S_i + \frac{h_c S_c h_{cr} S_{cr}}{h_c S_c + h_{cr} S_{cr}}}$$

где ΣQ_i — суммарная мощность тепловыделения в шпиндельной коробке, Вт; h_i — коэффициент теплоотдачи с i -й наружной поверхности коробки, Вт/(м²·°С); S_i — площадь теплоотдающей поверхности коробки, м²; h_c — коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности сопряженной детали, Вт/(м²·°С); S_c — площадь теплоотдающей поверхности сопряженной детали, м²; h_{cr} — коэффициент теплопередачи стыка, Вт/(м²·°С); S_{cr} — площадь стыка, м².

Во втором случае температурное поле стенки шпиндельной коробки, несущей опору шпинделя с интенсивным тепловыделением, определяется как температурное поле круглой пластины с наружным диаметром, равным диаметру окружности, описанной из центра опоры шпинделя через наиболее удаленный угол стенки и имеющей концентрическое отверстие, равное диаметру расточки под опору шпинделя. При этом тепловой поток поступает из опоры на границе отверстия симметрично относительно его оси. Для такой расчетной схемы температурное поле (°С) стенки

$$\vartheta(r) = \frac{Q}{S \lambda m} \frac{K_1(mR_2) I_0(mr) + I_1(mR_2) \times K_1(mR_1) I_1(mR_2) - I_1(mR_1) \times K_0(mr)}{\times K_1(mR_2)}$$

Здесь $S = 2\pi R_1 \delta$ — площадь поверхности подвода теплоты, м²; $m = \sqrt{2h/(\lambda \delta)}$, где δ — толщина

стенки, м; R_2 — радиус окружности, описанной вокруг стенки из центра опоры, м;

R_1 — радиус расточки под опору, м; r — текущий радиус, м; I_0, K_0, K_1, I_1 — функции Бесселя мнимого аргумента (табл. 7.9).

При известной температуре опоры ϑ_1 (°C) температурное поле (°C) стенки

$$\vartheta(r) = \vartheta_1 \frac{K_1(mR_2)I_0(mr) + I_1(mR_2)K_0(mr)}{I_0(mR_1)K_1(mR_2) + I_2(mR_2)K_0(mR_1)}$$

Если тепловыделение в других опорах шпиндельной коробки соизмеримо с тепловыделением шпиндельных опор, то температурное поле рассчитывают указанным путем для каждого из источников тепловыделения с учетом тепловыделений соседних подшипников.

Ходовые винты. Нагревание ходовых винтов происходит в результате тепловыделений в паре винт—гайка, опорах ходового винта или в результате передачи теплоты из сопрягаемых деталей путем теплопроводности.

Температурное поле (°C) ходового винта (рис. 7.8) от теплоты, поступающей из опор (в среднем 50 %),

$$\vartheta(x) = \frac{Q_1}{\sqrt{\lambda h A p}} \frac{\text{ch}[m(L-x)]}{\text{sh}(mL)} + \frac{Q_2}{\sqrt{\lambda h A p}} \times \frac{\text{ch}(mx)}{\text{sh}(mL)},$$

где Q_1, Q_2 — тепловой поток, поступающий из опор в винт, Вт; h — коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности винта, Вт/(м²·°C); $A = \pi d^2/4$ — площадь поперечного сечения вин-

7.9. Значения функций Бесселя мнимого аргумента

| z | $I_0(z)$ | $K_0(z)$ | $I_1(z)$ | $K_1(z)$ |
|------|----------|----------|----------|----------|
| 0,00 | 1,000 | ∞ | 0,000 | ∞ |
| 0,10 | 1,003 | 2,427 | 0,050 | 9,854 |
| 0,20 | 1,010 | 1,753 | 0,101 | 4,776 |
| 0,30 | 1,023 | 1,372 | 0,152 | 3,056 |
| 0,40 | 1,040 | 1,115 | 0,204 | 2,184 |
| 0,50 | 1,063 | 0,924 | 0,258 | 1,656 |
| 0,60 | 1,092 | 0,778 | 0,314 | 1,303 |
| 0,70 | 1,126 | 0,661 | 0,372 | 1,050 |
| 0,80 | 1,167 | 0,565 | 0,433 | 0,862 |
| 0,90 | 1,213 | 0,487 | 0,497 | 0,717 |
| 1,00 | 1,266 | 0,421 | 0,565 | 0,602 |
| 1,20 | 1,394 | 0,319 | 0,715 | 0,435 |
| 1,40 | 1,553 | 0,244 | 0,886 | 0,321 |
| 1,60 | 1,750 | 0,188 | 1,085 | 0,241 |
| 1,80 | 1,990 | 0,146 | 1,317 | 0,183 |
| 2,00 | 2,280 | 0,114 | 1,591 | 0,140 |
| 2,50 | 3,290 | 0,062 | 2,517 | 0,074 |
| 3,00 | 4,881 | 0,035 | 3,953 | 0,040 |
| 3,50 | 7,378 | 0,020 | 6,206 | 0,022 |
| 4,00 | 11,302 | 0,011 | 9,759 | 0,012 |
| 4,50 | 17,481 | 0,006 | 15,389 | 0,007 |
| 5,00 | 27,240 | 0,004 | 24,336 | 0,004 |

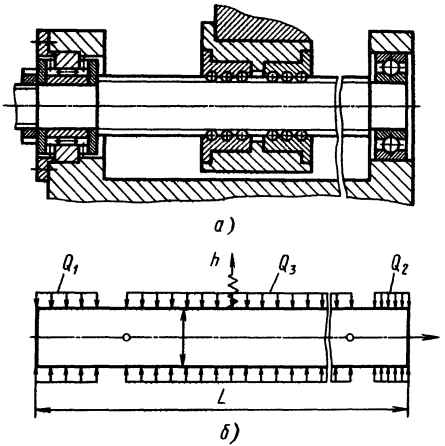


Рис. 7.8. Эскиз (а) передачи винт — гайка качения и расчетная схема (б) ходового винта

та, м²; d — средний диаметр винта, м; $p = \pi d$ — периметр поперечного сечения винта, м; $m = \sqrt{hp/\lambda A}$; L — длина винта, м

Температурное поле (°C) ходового винта, когда известна температура ϑ_{c1} и ϑ_{c2} (°C) более нагретых поверхностей, контактирующих с ходовым винтом в зоне его опор:

$$\vartheta(x) = \{\vartheta_1 \text{sh}[m(L-x)] + \vartheta_2 \text{sh}(mx)\} / \text{sh}(mL);$$

$$\vartheta_1 = \frac{h_{c1} S_{c1} \vartheta_{c1}}{h_{c1} S_{c1} + \lambda A m \text{th}(mL)},$$

$$\vartheta_2 = \frac{h_{c2} S_{c2} \vartheta_{c2}}{h_{c2} S_{c2} + \lambda A m \text{th}(mL)},$$

где h_{c1}, h_{c2} — коэффициенты теплопередачи стыков, Вт (м²·°C); S_{c1}, S_{c2} — площади поверхностей соприкосновения, м²; $S = \pi d L$ — площадь теплоотдающей поверхности винта, м².

Температура винта (°C) зависит от теплового потока Q_3 (Вт), поступающего из пары винт—гайка: $\vartheta_{cp} = Q_3/(\pi d L h)$.

Суммарное температурное поле ходового винта определяют путем сложения температурных полей, создаваемых в результате тепловыделений в опорах ходового винта и паре винт—гайка. Если для коротких ходовых винтов критерий $Bi \leq 0,1$ [см. (7.10)], то среднюю температуру ходового винта рассчитывают по формуле (7.11).

Станины, колонны, стойки. Средняя температура (°C) станин, колонн, стоек с учетом тепловых связей с другими элементами станка

$$\vartheta_{cp} = \frac{\sum Q_i}{\sum_{i=1}^n h_i S_i + \sum_{j=1}^m \frac{h_{c1j} S_{c1j} h_{c1j} S_{c1j}}{h_{c1j} S_{c1j} + h_{c1j} S_{c1j}}}$$

где ΣQ — суммарная мощность тепловыделений в станине, Вт; n — общее число теплоотдающих поверхностей станины; h_i — коэффициент теплоотдачи с i -й наружной поверхности станины, Вт/(м²·°C); S_i — площадь теплоотдающей поверхности станины, м²; m — число сопрягаемых со станиной деталей; $h_{сгj}$ — коэффициент теплопередачи стыка j -й сопряженной детали, Вт/(м²·°C); $S_{сгj}$ — площадь сопрягаемой поверхности, м²; $h_{сj}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности сопряженной детали, Вт/(м²·°C); $S_{сj}$ — площадь теплоотдающей поверхности сопряженной детали, м².

Если теплота поступает в станину на отдельном участке, размеры которого соизмеримы с общими размерами станины, в качестве расчетной схемы может быть принята пластина с размерами, равными длине и высоте станины, и тепловым потоком, поступающим в пластину на границе участка, соизмеримом с общими размерами пластины. Для практических расчетов, как правило, нужно определять не все температурное поле, а средние температуры в верхнем и нижнем сечении станины. Тогда участок между верхним и нижним сечениями станины можно рассматривать как ребро конечной длины. Зависимость для определения температуры (°C) имеет вид

$$\vartheta = \frac{Q}{\lambda S m} \frac{\operatorname{ch}[m(H-y)]}{\operatorname{sh}(mH)} \quad (7.13)$$

Здесь Q — тепловой поток, поступающий в станину, Вт; S — площадь поверхности теплоподвода, м²; $m = \sqrt{2h/(\lambda\delta)}$, где h — коэффициент

теплоотдачи, Вт/(м²·°C); δ , H — толщина и высота пластины, м; y — координата, в которой рассчитывается температура.

Нестационарный тепловой режим. Температура (°C) основных элементов станка в нестационарном режиме

$$\vartheta(t) = \vartheta_c(t) + [\vartheta_0 + \vartheta_{c0} - Q_0/(hS)] \times \exp[-B(t-t_0)] - \exp(-Bt) \int_{t_0}^t \exp(Bt) \times \frac{d[\vartheta_c(t) + Q(t)/(hS)]}{dt} dt.$$

Здесь $\vartheta_c(t)$ — температура среды, °C; ϑ_0 , ϑ_{c0} — температура детали и среды в начальный момент времени t_0 , °C; Q_0 , Q_t — тепловой поток соответственно при $t < t_0$ и при $t > t_0$, Вт; h — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); S — площадь теплоотдающей поверхности, м²; $B = hS/(ms)$ — темп нагревания (охлаждения) детали, 1/с, где m — масса детали, кг; s — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C).

Зависимости для определения нестационарных температур основных элементов станка приведены в табл. 7.10: 1 — при скачкообразном изменении температуры среды; 2, 3, 4 — при изменении температуры среды соответственно с постоянной скоростью, по экспоненциальному и по синусоидальному законам; 5, 6 — при постоянно действующем во времени источнике тепловыделения и постоянной температуре среды, когда температура заготовки в начальный момент времени равна (5) или не равна (6) температуре окружающей среды.

7.10. Формулы для определения функции $\vartheta = f(t)$ температурного поля элементов станка в нестационарном режиме

| № по пор. | Начальные условия | $\vartheta = f(t)$ |
|-----------|---|--|
| 1 | $Q=0$; $\vartheta_c = \text{const}$; $\vartheta_0 = \text{const}$; $\vartheta_0 \neq \vartheta_c$ | $\vartheta = \vartheta_c + (\vartheta_0 - \vartheta_c) \exp[-B(t-t_0)]$ |
| 2 | $Q=0$; $\vartheta_c = b(t-t_0) + \vartheta_{c0}$; $b = d\vartheta_c/dt = \text{const}$ | $\vartheta = \vartheta_c - b/B + (\vartheta_0 - \vartheta_{c0} + b/B) \exp[-B(t-t_0)]$ |
| 3 | $Q=0$; $\vartheta_0 = \text{const}$; $\vartheta_c = \vartheta_{c0} + (\vartheta_{cy} - \vartheta_{c0})(1 - \exp(-B_0 t))$; $\vartheta_{c0} = \text{const}$; $\vartheta_{cy}^* = \text{const}$ | $\vartheta = \vartheta_{c0} + (\vartheta_{cy} - \vartheta_{c0}) [1 - \exp(-B_c t)] + [B_c/(B_c + B)] \{ \exp(-B_c t) - \exp(-Bt) \} + (\vartheta_0 - \vartheta_{c0}) \exp[-B(t-t_0)]$ |
| 4 | $Q=0$; $\vartheta_0 = \text{const}$; $\vartheta_c = \vartheta_{cp} + A' \cos(\omega t)$; $\omega = 2\pi/t$; $\vartheta_{c0} = \text{const}$ | $\vartheta = \vartheta_c + [(\vartheta_0 - \vartheta_{c0}) - A_1 \sin(\omega t_0 - \beta)] \times \exp[-B(t-t_0)] + A_1 \sin(\omega t - \beta)$ где $\beta = \arctg(\omega/B)$; $A_1 = A' \omega / \sqrt{B^2 + \omega^2}$; при $t \rightarrow \infty$ $\vartheta = \vartheta_c + A_1 \cos \beta \cos(\omega t - \beta)$ |
| 5 | $Q = \text{const}$; $\vartheta_c = \text{const}$; $\vartheta_0 = \text{const}$; $\vartheta_0 \neq \vartheta_c$ | $\vartheta = \vartheta_c + (\vartheta_0 - \vartheta_c) \exp[-B(t-t_0)] + [Q/hS] \{1 - \exp[-B(t-t_0)]\}$ |
| 6 | $Q = \text{const}$; $\vartheta_c = \text{const}$; $\vartheta_0 = \text{const}$; $\vartheta \neq \vartheta_c$ | $\vartheta = \vartheta_c + (\vartheta_0 - \vartheta_c) \exp[-B(t-t_0)] + [Q/hS] \{1 - \exp[-B(t-t_0)]\}$ |

* ϑ_{cy} — установившаяся температура среды.

Если температура элементов станка изменяется по экспоненциальному закону, то $t_y = 4ct_m/(hS)$, где t_y — время достижения установившегося состояния (время, по истечении которого разность $(\theta - \theta_c)$ температур элементов станка и среды станет меньше заданного значения, например 2% от θ_c).

Расчет коэффициента теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C), характеризует условия теплообмена между поверхностью твердого тела и соприкасающимся с ней газом или жидкостью: $h = h_{нз} + h_k$. Здесь $h_{нз}$ — коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·°C); $h_{нз} = 0,04\epsilon c_0 [(\theta + 273) + (\theta_c + 273)]/200^3$, где ϵ — степень черноты теплоотдающей поверхности (табл. 7.11); $c_0 = 5,7$ Вт/(м²·°C) — коэффициент излучения абсолютно черного тела; θ — температура стенки, °C; θ_c — температура среды, °C; h_k — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°C).

Для обдуваемых поверхностей деталей станка коэффициент h_k [Вт/(м²·°C)] определяют в зависимости от значения комплекса $PrGr$ [см. (7.7)]. За определяющий линейный размер L (м) принимают для горизонтального цилиндра его длину, для вертикальной стенки и вертикального цилиндра — высоту, для горизонтальной пластины — ее наименьшую длину.

При $PrGr < 10^{-3}$ $h_k = 0,45\lambda/L$; при $10^{-3} < PrGr \leq 5 \cdot 10^2$ $h_k = B_1((\theta - \theta_c)/L^5)^{1/8}$; при $5 \cdot 10^2 < PrGr \leq 2 \cdot 10^7$ $h_k = B_2((\theta - \theta_c)/L)^{1/4}$, при $PrGr > 2 \cdot 10^7$ $h_k = B_3(\theta - \theta_c)^{1/3}$, где λ — тепло-

7.12. Средние значения B_1, B_2, B_3, λ при температуре 20 — 50 °C для различных охлаждающих сред

| Среда | B_1 | B_2 | B_3 | λ , Вт/(м·°C) |
|--------|-------|-------|-------|-----------------------|
| Воздух | 0,30 | 1,40 | 1,60 | 0,026 |
| Вода | 15 | 135 | 250 | 0,620 |
| Масло | 2,2 | 16,8 | 27,5 | 0,110 |

проводность охлаждающей среды (табл. 7.12), Вт/(м²·°C); B_1, B_2, B_3 — коэффициенты, зависящие от физических свойств охлаждающей среды.

Значение найденного коэффициента теплоотдачи для поверхностей, обращенных вверх, увеличивают на 30%, а для поверхностей, обращенных вниз, уменьшают на 30%.

Для обдуваемых поверхностей деталей станка коэффициент теплоотдачи h_k определяется в зависимости от критерия Рейнольдса Re .

При $Re < Re_{кр} = 10^5$ $h_k = 0,57\lambda Re^{0,5}/L$; при $Re > Re_{кр} = 10^5$ $h_k = 0,032\lambda Re^{0,8}/L$, $Re = vL/\nu$. Здесь v — скорость воздуха, м/с; L — характерный линейный размер (длина теплоотдающей стенки по направлению потока воздуха), м; ν — кинематическая вязкость воздуха, м²/с (при $\theta_c = 20$ °C, $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с).

Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности вращающихся шпинделей, ходовых винтов, валов, для которых $Re > 2500$ $h = 0,587n^{0,7}d^{0,4}$, где n — частота вращения вала, мин⁻¹; d — диаметр вала, м. $Re = vd/\nu$, где v — окружная скорость вала, м/с.

Условия теплоотдачи на каждой из стенок элементов станка различны, поэтому коэффициент теплоотдачи элемента станка представляет собой среднее значение коэффициентов теплоотдачи отдельных поверхностей: $h_{кр} = \Sigma h_i S_i / \Sigma S_i$, где h_i — коэффициент теплоотдачи с отдельной стенки, Вт/(м²·°C); S_i — площадь теплоотдающей поверхности стенки, м².

При работе станка на различных режимах рассчитывают средневзвешенный коэффициент теплоотдачи $h_{кр} = \Sigma h_i \beta_i$, где h_i — коэффициент теплоотдачи при работе в i -м режиме, Вт/(м²·°C); β_i — относительная продолжительность работы в i -м режиме.

7.11. Степени черноты различных поверхностей

| Материал | Температура поверхности, °C | Степень черноты |
|--|-----------------------------|-----------------|
| Сталь листовая, сильно окисленная | 25 | 0,8 — 0,82 |
| Краски эмалевые, лаки различных цветов | 20 — 100 | 0,92 |
| Краски матовые различных цветов | 100 | 0,92 — 0,96 |
| Краска защитная зеленая | 20 | 0,9 |
| Краска бронзовая | 100 | 0,51 |
| Оксиды металлов | — | 0,04 — 0,8 |
| Сталь листовая с плотным блестящим слоем оксида | 25 | 0,82 |
| Лак белый на железной пластине | 23 | 0,96 |
| Лак черный блестящий, распыленный на железной пластине | 25 | 0,875 |
| Чугун, сильно окисленный | 40 — 250 | 0,96 |
| Краски масляные | — | 0,81 |

7.4. Тепловые смещения формообразующих узлов станка

Шпиндельные узлы. Тепловые смещения шпинделя рассчитывают в зависимости от критерия Bi [см. (7.10)]. При $Bi \geq 0,1$ тепловые смещения Δ_x (м) переднего торца шпинделя от теплового потока Q_1, Q_2 (Вт), поступаю-

7.13. Формулы для расчета тепловых смещений переднего торца шпинделя при различных вариантах осевого закрепления

| № по пор. | Расчетная схема шпинделя | Δ_x , м |
|-----------|--------------------------|---|
| 1 | | $\Delta_x = \frac{Q_1 B_2 + Q_2 B_3}{B_1 + B_2} \frac{\beta}{\pi d h}$ |
| 2 | | $\Delta_x = \frac{\beta(Q_1 + Q_2)}{\pi d h}$ |
| 3 | | $\Delta_x = \frac{(Q_1 B_2 + Q_2 B_3)\beta}{(B_1 + B_2)\pi d h} + \frac{j_2 \beta}{j_1 \pi d h} \left[\frac{Q_1 B_1 - Q_2 B_3}{B_1 + B_2} + Q_2 \right]$ |

Обозначения: B_1, B_2, B_3 — коэффициенты [см. (7.12)]; d — средний диаметр шпинделя, м; L_1 — длина консольной части шпинделя, м; j_1 — осевая жесткость передней опоры шпинделя, Н/м; $j_2 = (1/j_1 + 1/j_2 + (L - L_1)/(EA))^{-1}$, где j_2 — осевая жесткость задней опоры шпинделя, Н/м; $A = \pi d^2/4$.

шего в шпиндель из передней и задней опор, рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 7.13, в зависимости от осевого закрепления шпинделя: 1, 2 — осевую нагрузку воспринимают соответственно передняя или задняя опоры шпинделя; 3 — двухопорный способ осевого закрепления шпинделя.

При $B_i < 0,1$ и одноопорном способе осевого закрепления тепловые смещения (м) переднего торца шпинделя $\Delta_x = \beta L \vartheta_{cp}$, где β — линейное расширение (см. табл. 7.7), $1/^\circ\text{C}$; L — расстояние от упорного подшипника до расчетного сечения, м; ϑ_{cp} — средняя температура шпинделя, $^\circ\text{C}$.

Для двухопорного способа осевого закрепления ($B_i < 0,1$) тепловые смещения (м)

$$\Delta_x = \beta L_1 \vartheta_{cp} + \frac{j_2}{j_1} \beta (L - L_1) \vartheta_{cp}.$$

Шпиндельные коробки. Тепловые смещения корпусов шпиндельных коробок, влияющие на показатели точности станка, в основном определяются температурой стенок коробки, входящих в размерную цепь станок — заготовка — инструмент. В шпиндельных коробках такими стенками являются стенки, несущие опоры шпинделей.

Если тепловыделение происходит в основном в механизмах, заключенных внутри коробки, а ее стенки нагреваются примерно равномерно до температуры ϑ_{cp} ($^\circ\text{C}$), то тепловые смещения (м) расчетного размера L (м) (например, расстояние от оси шпинделя до базирующей поверхности шпиндельной коробки)

$$\Delta = \beta L \vartheta_{cp}. \quad (7.14)$$

Если тепловыделение в шпиндельных опорах интенсивно и полностью определяет температурное поле шпиндельной коробки, то тепловые смещения $\Delta = f(r)$ могут быть определены, если стенку шпиндельной коробки считать круглым диском с внутренним радиусом, равным радиусу расточки под опору, и наружным радиусом, равным линейному размеру от оси шпинделя до поверхности закрепления коробки. Источник тепловыделения расположен в центре рассматриваемого диска, и теплота равномерно поступает в диск через поверхность внутренней расточки. При указанных допущениях тепловые смещения (м)

$$\Delta = \frac{\beta Q}{2\lambda \delta \pi R_1^2 m^2} \left\{ - (1 + \mu) \frac{r \psi(r)}{\psi(R_1)} + \frac{R_1^2 R_2}{R_2^2 - R_1^2} \left[(1 - \mu) \frac{r}{R_2} + (1 + \mu) \frac{R_2}{r} \right] \right\},$$

$$\psi = \frac{1}{mr} [K_1(mR_2) I_1(mr) - I_1(mR_2) K_1(mr)],$$

где $m = \sqrt{2h/(\lambda\delta)}$; r — текущий радиус, м; δ — толщина стенки, м; R_1 — радиус расточки под опору, м; R_2 — размер до поверхности закрепления, м; I_1 , K_1 — функции Бесселя (см. табл. 7.9).

Станины и основания. Тепловые смещения станины могут быть рассчитаны, если станину считать пластиной с размерами, равными размерам боковой стенки станины, входящей в размерную цепь, определяющую относительное положение инструмента и заготовки. Если стенки станины нагреваются примерно равномерно до температуры θ_{cp} (°C), то тепловые смещения (Δ) расчетного размера определяют по формуле (7.14).

При неравномерном нагревании станины ее суммарные тепловые смещения определяются линейными и угловыми смещениями. Линейные тепловые смещения обуславливаются средними избыточными температурами и определяются по формуле (7.14), а угловые смещения определяются неравномерностью распределения температуры по высоте станины и рассчитываются по формулам из табл. 7.14: 1 —

температура $\theta = f(y)$ изменяется по линейному закону по высоте станины; 2 — в общем случае, когда известно изменение температуры по высоте станины [см. (7.13)]; 3 — станина скреплена с фундаментом. В третьем случае станина и фундамент заменены двумя скрепленными балками с размерами, равными длине и высоте станины и фундамента и температурой, постоянной по высоте станины и фундамента.

Стойки и колонны. При расчете тепловых смещений (Δ) колонн и стоек исходят из предположения, что тепловые смещения колонны пропорциональны распределению средних температур $\Delta = \beta l \theta_{cp}$, где l — расстояние от точки закрепления или от нейтральной оси колонны до расчетной точки, м.

Искривление нейтральной оси колонны, вызванное неравномерностью температурного поля, может быть определено, если известна функция распределения температуры $\theta = f(x)$ по ширине колонны, а колонну рассматривать как балку, защемленную на одном конце (табл. 7.15).

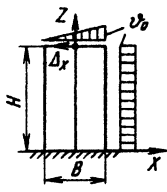
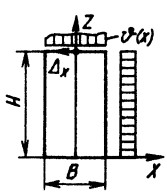
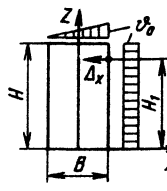
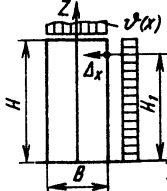
Ходовые винты. Тепловые смещения Δ_x (м) ходового винта в сечении с координатой x (м) от теплового потока Q_1 , Q_2 (Вт), поступающего из опор Q_1 , Q_2 и потока Q_3 , поступающего

7.14. Формулы для расчета максимального прогиба Δ_y станины, вызванного неравномерным распределением температуры

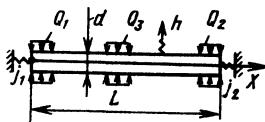

| № по пор. | Расчетная схема станины | Δ_y , м |
|-----------|-------------------------|--|
| 1 | | $\Delta_y = \frac{\beta \theta_0 L^2}{8H}$ |
| 2 | | $\Delta_y = \frac{3L^2 \beta \int_{-H/2}^{H/2} \theta y dy}{4H^3}$ |
| 3 | | $\Delta_y = \frac{L^2(a+H)(\beta_{ст}\theta_{ст} - \beta_{ф}\theta_{ф})}{16 \left[\frac{E_{ф}A_{ф}a^2}{12E_{ст}A_{ст}} + \frac{E_{ст}A_{ст}H^2}{12E_{ф}A_{ф}} + \left(\frac{H^2}{3} + \frac{a^2}{3} + \frac{aH}{2} \right) \right]}$ |

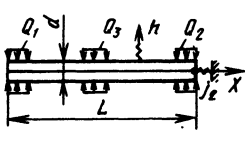
Обозначения: L , H — длина и высота станины, м; θ_0 — максимальная температура нагрева станины, °C; $\theta_{ст}$, $\theta_{ф}$ — средние температуры станины и фундамента, °C; $A_{ст}$, $A_{ф}$ — площадь поперечного сечения станины и фундамента, м²; a — высота фундамента, м; $E_{ст}$, $E_{ф}$ — модуль упругости материала соответственно станины и фундамента, Па.

7.15. Формулы для расчета тепловых смещений колонны

| № по пор. | Расчетная схема колонны | Δ_x , м |
|-----------|--|--|
| 1 |  | $\Delta_x = -\frac{\beta \theta_0 H^2}{2B}$ |
| 2 |  | $\Delta_x = -\frac{3H^2\beta \int_0^B \theta(x) dx}{4B^3}$ |
| 3 |  | $\Delta_x = -\frac{\beta \theta_0 H_1^2}{2B} + \frac{\beta \theta_{cp} B}{2}$ |
| 4 |  | $\Delta_x = -\frac{3H_1^2\beta \int_0^B \theta(x) dx}{4B^3} + \frac{\beta \theta_{cp} B}{2}$ |

7.16. Формулы для расчета тепловых смещений Δ_x ходового винта при различных вариантах осевого закрепления

| № по пор. | Расчетная схема ходового винта | Δ_x , м |
|-----------|---|---|
| 1 |  | $\Delta_x = \beta \theta_{cp} x - \frac{P_w x}{EA} - j_\Sigma \left(\Delta_l - \frac{P_w L}{EA} \right) \left(\frac{x}{EA} + \frac{1}{j_1} \right)$ |
| 2 |  | $\Delta_x = \beta \theta_{cp} x$ |

| № по пор. | Расчетная схема ходового винта | Δ_x , м |
|-----------|---|--|
| 3 |  | $\Delta_x = \beta \theta_{cp} (x - L)$ |

Обозначения: $\theta_{cp} = (Q_1 + Q_2 + Q_3) / (\pi d L h)$; d , L — средний диаметр и длина ходового винта, м; P_n — сила осевого натяга, Н; $A = \pi d^2 / 4$; $j_2 = (1/j_1 + 1/j_2 + L/(EA))^{-1}$, где j_1 , j_2 — осевая жесткость соответственно передней и задней опор винта, Н/м; $\Delta_i = \beta \theta_{cp} L$.

от передачи винт — гайка, рассчитываются по формулам, представленным в табл. 7.16: 1 — при двухопорном; 2, 3 — при одноопорном способах осевого закрепления винта.

Суммарные тепловые смещения станка. Если элементы станка нагреваются примерно равномерно, тепловые смещения их линейны (рис. 7.9, а), то суммарные тепловые смещения

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^p \Delta_i - \sum_{i=p+1}^n \Delta_i$$

где Δ_i — тепловые смещения i -го элемента (детали или ее участка) размерной цепи; p — число элементов размерной цепи, имеющих положительные смещения; n — общее число элементов размерной цепи.

Если элементы станка нагреваются неравномерно, имеют линейные и угловые смещения (рис. 7.9, б), то суммарные тепловые смещения

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^p \Delta_i + \sum_{j=1}^m h_j \varphi_j - \sum_{i=1+p}^n \Delta_i - \sum_{j=1+m}^n h_j \varphi_j$$

где m — число элементов размерной цепи, имеющих положительное смещение; h_j — линейный размер j -го элемента размерной цепи.

Суммарные угловые погрешности станка

$$\varphi_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m \varphi_j - \sum_{j=1+m}^n \varphi_j$$

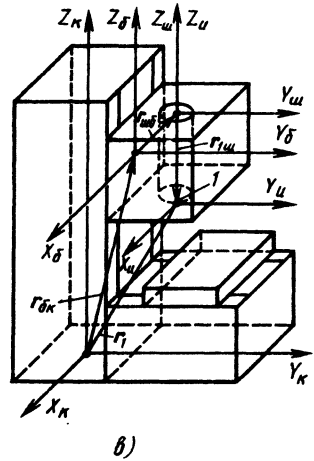
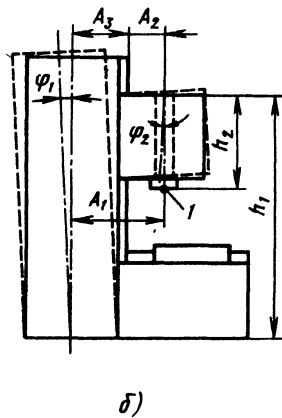
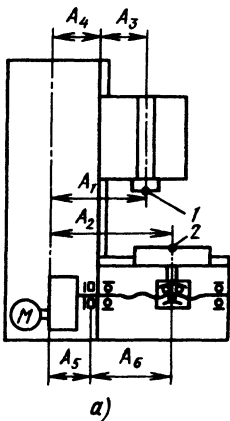


Рис. 7.9. Схемы для расчета суммарных тепловых смещений фиксированных точек 1, 2 вертикально-фрезерного станка:

а — с помощью линейных размерных цепей; б — с помощью плоских линейных и угловых размерных цепей; в — методы координатных систем с деформирующимися связями; r_{6k} — радиус-вектор системы координат бабки в системе координат колонны; r_{1u} — радиус-вектор системы координат шпинделя в системе координат бабки; r_{1s} — радиус-вектор Т.1 в системе координат шпинделя; r_1 — радиус-вектор Т.1 в системе координат колонны

Для расчета пространственных тепловых смещений узлов и деталей станка (рис 7.9, а) можно использовать метод координатных систем с деформирующимися связями, заключающийся в представлении основных элементов станка совокупностью координатных систем с наложенными на них связями и затем применять для расчета суммарной погрешности формулы перехода из одной координатной системы в другую. Линейные и угловые смещения координатных систем рассчитывают через смещения опорных точек, которые связаны с координатными системами. Для этого используют результаты тепловых смещений по приведенным выше формулам.

Список литературы

- 1 **Базров Б. М.** Расчет точности машин на ЭВМ М Машиностроение, 1984 256 с
- 2 **Бельзецкий А. И.** Методика выбора показателей точности для оценки влияния теплового режима на точность металлорежущих станков//Известия вузов, 1986, № 9 С 153—157
- 3 **Бельзецкий А. И.** Оценка влияния теплового режима на точность металлорежущих станков на стадии проектирования//Известия вузов, 1988 № 6 С 120—126
- 4 **Кондратьев Г. М.** Регулярный тепловой режим М Гостехиздат, 1954 408 с
- 5 **Кордыш Л. М., Марголин Л. В.** Тепловой расчет исполнительных механизмов приводов подачи станков с ЧПУ//Станки и инструмент 1983 № 5 С 22—24
- 6 **Кузнецов А. П., Иванов М. Г.** Методы воздействия на теплостойкость металлорежущих станков М ВНИИТЭМР, 1986 60 с
- 7 **Кутателадзе С. С., Боришанский В. М.** Справочник по теплопередаче М Госэнергоиздат, 1959 414 с
- 8 **Ладик В. Н., Соколов А. Л., Милова Л. М.** Расчет тепловых режимов в шкафах электро и электронного оборудования Методические рекомендации М ЭНИМС, 1987 18 с
- 9 **Левит Г. А.** Расчет потерь на трение в приводах главного вращательного движения металлорежущих станков М ЦБТИ ЭНИМС, 1956 72 с
- 10 **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи М Энергия, 1973 320 с
- 11 **Перель Л. Я.** Подшипники качения М Машиностроение, 1983 543 с
- 12 **Пратусевич Р. М., Литвак А. С.** Автоматизированный расчет энергетических потерь в приводах главного движения металлорежущих станков//Станки и инструмент 1986 № 5 С 21—23
- 13 **Проников А. С.** Программный метод испытания металлорежущих станков М Машиностроение, 1985 288 с
- 14 **Резников А. Н., Резников Л. А.** Тепловые процессы в технологических системах М Машиностроение, 1990 288 с
- 15 **Соколов Ю. Н.** Температурные расчеты в станкостроении М Машиностроение, 1968 78 с

Глава 8

Динамика станков

8.1. Анализ динамической системы станка

Динамические процессы оказывают существенное влияние на важнейшие характеристики станков: точность, производительность, надежность. Отклонения от заданных характеристик определяются в первую очередь устойчивостью формирующих и вспомогательных движений, а также реакцией системы на внешние воздействия.

Анализ конструкции как динамической системы должен выполняться конструктором на всех стадиях создания станка. Понимание основных особенностей динамической системы станка дает гарантию быстрого и правильного решения задач, возникающих в процессе конструирования, изготовления, испытания и серийного производства станков.

Динамическая система станка как рабочей машины включает в себя деформируемую упругую систему УС (станок, приспособление, инструмент, заготовка) и рабочие процессы в ее подвижных соединениях (процессы в двигателях ПД, процесс трения ПТ, процесс резания ПР, аэро- и гидродинамические процессы и т. п.). Динамическая система станка является замкнутой многоконтурной системой (рис. 8.1). Силовые воздействия, вызываемые рабочими процессами, деформируют упругую систему. При этом изменяется взаимное положение элементов, образующих соответствующее подвижное соединение. В результате изменяются условия протекания рабочего процесса и его силовое (или иное) воздействие. Например, сила резания, деформируя УС, изменяет взаимное положение инструмента и обрабатываемой заготовки. Соответственно изменяются сечение срезаемого слоя и сила резания, что приводит к изменению деформации УС. Цепь воздействий замыкается, образуя контур связи. При этом силовое воздействие содержит составляющую, являющуюся функцией ортогональной координаты: например, тангенциальная составляющая силы резания является функцией толщины или ширины срезаемого слоя и т. п. Кроме того, каждое силовое воздействие имеет

динамические особенности, определяемые спецификой соответствующих рабочих процессов (аэро- и гидродинамика, трение, резание и т. п.).

Основная задача анализа динамической системы станка — выявление прямых и обратных связей между упругой системой и рабочими процессами в подвижных соединениях. Прямые связи определяются силами, действующими в подвижном соединении и вызываемыми соответствующим рабочим процессом (силы трения, гидродинамические, электромагнитные силы и т. п.). Обратные связи определяются деформациями упругой системы, ведущими к относительному смещению тел, которые образуют подвижное соединение. В результате анализа выделяют смещение, в наибольшей степени влияющее на протекание рабочего процесса.

При решении ряда практических задач используют представление об эквивалентных динамических системах станка. На рис. 8.1 показана эквивалентная динамическая система станка, широко используемая при проектировании приводов станков. Выделяют элемент системы, условно названный «процессы в двигателе»

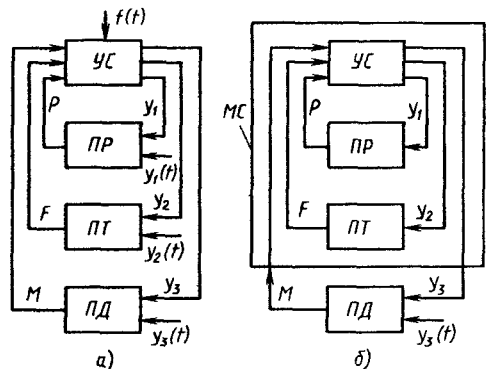


Рис. 8.1. Схемы замкнутой динамической системы станка (а) и ее эквивалентного представления (б): P — сила резания; F — сила трения; M — сила, создаваемая двигателем; y_i — деформация упругой системы в i -м подвижном соединении, изменяющая условия протекания i -го рабочего процесса; $f(t)$ — внешнее воздействие на упругую систему; $y_i(t)$ — внешнее воздействие на i -й рабочий процесс

(ПД). Остальную часть системы объединяют в элемент «механическая система» (МС), которая включает в себя упругую систему, а также процессы резания и трения. Связи между элементами ПД и МС определяются характеристикой рабочего процесса двигателя. Например, в подвижном соединении ротора и статора асинхронного электродвигателя протекает электродинамический рабочий процесс. Момент, развиваемый двигателем, вызывает деформирование упругой системы привода. При этом изменяется угловая скорость ротора как элемента упругой системы. Меняется скольжение электрического поля, от которого зависит движущий момент. В последующих разделах дается представление об эквивалентных динамических системах других типов.

При решении многих практических задач анализа динамических процессов в станках принимают, что динамическая система является детерминированной и линейной. Такое представление допустимо, поскольку рассматриваются весьма малые отклонения при наличии некоторых постоянных воздействий, исключающих существенные нелинейности, такие, например, как зазоры между элементами упругой системы. Малость отклонений позволяет пользоваться линеаризованными зависимостями. В необходимых случаях, главным образом при наличии существенных нелинейностей (разрывы функций или их производных), рассматривают задачи в нелинейной постановке.

Статистическая природа таких рабочих процессов, как резание, трение и другие, а также лишь вероятностная оценка многих параметров упругой системы (например, контактной жесткости стыков деталей станка, величины демпфирования и т. п.) вызывают необходимость анализа динамических процессов в станках методами статистической динамики. По существу, при детерминированном подходе анализ выполняют при некоторых вероятностных характеристиках процессов и параметрах системы. Наибольшее практическое применение статистические методы получили при экспериментальных исследованиях и при обработке их результатов.

При решении практических задач определяют: устойчивость заданных движений, отклонение тех или иных параметров от установленных значений, продолжительность и характер переходных процессов. Например, при анализе точности обработки определяют относительные смещения инструмента и заготовки в направлениях, определяющих ее размер, правильность формы поверхности или взаимное расположение поверхностей. При анализе процессов в приводе оценивают изменение напряжения или силы тока, давления в полостях гидроцилиндра и других параметров.

Оценка динамических процессов производится по показателям динамического качества станка. В детерминированной постановке задачи это следующие показатели:

степень устойчивости (по частотным составляющим собственных форм колебаний системы) или запас устойчивости в области изменения параметров системы или ее частотных характеристик;

отклонения параметров системы при внешних воздействиях стационарного и нестационарного типа;

продолжительность переходных процессов или иная оценка быстродействия системы при заданных внешних воздействиях.

Конкретные примеры использования системы показателей динамического качества станков даны в следующих подразделах главы.

При анализе динамических процессов в станках широко используют методы, принятые в теории автоматического регулирования. Основными являются частотные методы, отличающиеся удобством применения как при теоретическом, так и при экспериментальном исследовании. Сложность динамической системы станка требует от расчетчика и экспериментатора специальных знаний. Наличие программно-математического обеспечения позволяет выполнять на ЭВМ расчет динамической системы на стадии проектирования конструкции станка, приспособления, инструмента или технологического процесса обработки детали.

8.2. Расчет характеристик упругой системы станок — приспособление — инструмент — заготовка

При анализе динамических процессов в станках следует четко различать понятие упругой системы, аналогичной упругим системам строительных конструкций, и упругой системы работающего станка. Принципиальная разница заключается в том, что в работающем станке ряд деталей и узлов станка получают заданные движения. В соответствующих подвижных соединениях этих деталей и узлов развиваются рабочие процессы: различные виды кинетического трения, аэро- и гидродинамические и т. д. Движения могут быть неустойчивыми. Если они устойчивы, то демпфирование в этих подвижных соединениях определяется степенью устойчивости. Изменяется характеристика упругих свойств соединения по сравнению с характеристикой упругих свойств неподвижного соединения. В первую очередь это относится к опорам и направляющим скольжения, но касается в большой степени и других видов этих элементов, в частности опор и направляющих качения. Таким образом, строго говоря, упругой системой можно считать лишь те дета-

ли и узлы станка, которые в рассматриваемых условиях не имеют заданных перемещений в соединениях. Однако в практике расчетов учет подвижности соединений часто осуществляют приближенно с использованием соответствующих экспериментальных данных или опыта ранее выполненных расчетов. Пренебрежение подвижностью соединений элементов упругой системы при экспериментальном определении характеристик системы в целом может привести к грубым ошибкам.

Расчет упругой системы как элемента динамической системы станка сводится к определению ее собственной устойчивости и реакции на заданное внешнее воздействие. Как правило, при этом определяют деформацию системы с учетом ее влияния на устойчивость и на точность обработки. Требование обеспечения малых деформаций системы за счет высокой жесткости ее элементов приводит к созданию конструкций с большими запасами прочности. Поэтому расчеты на прочность в динамике станков занимают ограниченное место.

Собственную устойчивость элементов упругой системы (не имеющих подвижных соединений) оценивают по известным критериям устойчивости в форме критических нагрузок или частот вращения. Такую оценку выполняют при наличии в конструкции длинных стержней, работающих на сжатие, например длинного ходового винта, штока гидроцилиндра, а также тружин, пластин, оболочек, например тонкостенных обрабатываемых деталей. Данные о критических нагрузках приведены в справочниках для конструкторов.

Один из случаев возможной потери устойчивости упругой системой — вращение валов с критическими частотами, близкими к собственным частотам.

При конструировании станков за счет изменения размеров деталей, материала, способа закрепления, частоты вращения и т. п. добиваются устойчивости элементов упругой системы.

Характеристикой упругой системы называют ее реакцию на заданное воздействие. Заданное (входная координата) воздействие при оценке устойчивости и точности движений узлов станка соответствует силе (моменту), создаваемой в процессе резания, трения и т. п. При оценке вынужденных колебаний характеристика определяется воздействием на упругую систему соответствующей периодической силы (момента), например силы инерции неуравновешенного вращающегося ротора и т. п. Искомая реакция (выходная координата) системы зависит от решаемой задачи, и ее определяют на стадии анализа динамической системы станка. При оценке точности обработки находят относительное смещение инструмента и заго-

товки по нормали к обрабатываемой поверхности, при оценке устойчивости при резании — смещение по нормали к поверхности резания. В подразд. 8.3 приведены выходные координаты упругой системы при оценке точности и устойчивости вспомогательных и установочных перемещений.

Характеристика упругой системы может быть представлена в форме дифференциального уравнения, уравнения в операторной форме или в частотной форме. Частотная характеристика является решением дифференциального уравнения при заданном периодическом воздействии (при нулевых начальных условиях, соблюдаемых всегда при рассмотрении отклонений системы от заданного установившегося состояния). Расчет частотных характеристик упругой системы выполняют методами теории колебаний.

Расчетную схему упругой системы составляют путем перехода от распределенных параметров (массы, жесткости) к сосредоточенным с соответствующим ограничением числа степеней свободы. При расчете частотных характеристик это соответствует ограничению частотного диапазона областью рабочего диапазона частот. Рабочий диапазон частот определяют на основании опыта, имеющихся экспериментальных данных и характера решаемой задачи.

Расчетную схему упругой системы строят с максимальным использованием сведений о поведении системы станка. В частности, построение схемы значительно облегчается при наличии сведений о формах колебаний аналогичных конструкций в рассматриваемом диапазоне частот.

Детали, входящие в упругую систему, упрощают и укрупненно представляют как стержни, плиты, коробки и массивы. Принадлежность к тому или иному виду элемента определяется соотношением его размеров и соответственно характером деформирования. Широко используют переход к низким формам колебаний таких элементов, как стержни и плиты, и тем самым к описанию их как простейших колебательных систем с сосредоточенными параметрами. В необходимых случаях расчеты выполняют методом конечных элементов.

Составление расчетной схемы требует определенного опыта и квалификации от расчетчика. Связано это с необходимостью правильного выбора сложности схемы. Предпочтительен расчет по простой схеме динамической модели с небольшим числом степеней свободы, так как при этом меньше возникает вычислительных трудностей и меньше погрешностей. На рис. 8.2 показана расчетная схема консольно-фрезерного станка, состоящая из массивов и стержней с упруго-диссипативными связями (для рабочего диапазона частот 0—200 Гц). Однако упрощенная схема не всегда обеспечивает

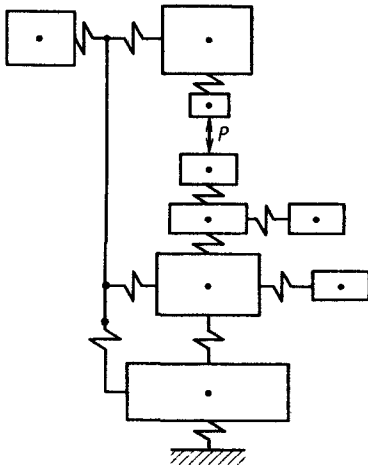


Рис. 8.2. Расчетная схема консольно-фрезерного станка

необходимую точность совпадения расчетных данных с экспериментальными. Как правило, число степеней свободы, учитываемое в расчетной схеме, должно превышать число собственных частот в рассматриваемом частотном диапазоне.

Расчет параметров (масс и моментов инерции, жесткости, демпфирования) выбранной динамической модели упругой системы при проекти-

ровании станка осуществляют по чертежам. При этом используют имеющиеся и освещенные в специальной литературе данные о плотности материалов, модулях упругости, методах упрощенной оценки параметров сложных деталей (коробок, стоек, станин, ступенчатых валов и т. п.), контактной жесткости стыков деталей, местных деформациях контактирующих деталей, демпфировании.

Обычно расчет параметров элементов упругой системы производят в процессе составления расчетной схемы, уточняя ее в соответствии с значимостью тех или иных параметров.

Составление уравнений движения сложных колебательных систем, которыми являются упругие системы станков, можно выполнять по разработанной расчетной схеме различными методами. Используют классические методы Лагранжа, Даламбера и другие, широко известные методы. В настоящее время разработаны методы, приспособленные для автоматизированного составления уравнений (метод графов, метод применения избыточных данных и др.). Организации и предприятия располагают значительным пакетом программ для расчета на ЭВМ частотных характеристик упругих систем.

Результаты расчета даются в виде амплитудно-частотной (АЧХ), фазово-частотной (ФЧХ), амплитудно-фазово-частотной (АФЧХ) характеристик или их разновидностей. Определяют форму колебаний, т. е. отношения амплитуд смещения отдельных масс на собственных частотах системы. При наличии экспериментально полученных характеристик для условий, принятых в расчетной схеме, можно уточнять расчетную схему и значения параметров. Прежде всего это касается уточнения степени демпфирования. Декременты колебания системы на собственных частотах определяют по ширине резонансных пиков или по затуханию свободных колебаний (эти значения определяют при модальном методе анализа колебательных систем). При слабом демпфировании форма колебаний системы мало изменяется при изменении декремента. Это позволяет пересчитывать полученные значения декрементов колебаний, приводя их к отдельным элементам системы.

Если путем уточнения параметров системы в пределах возможного разброса их значений не удастся получить взаимного соответствия расчетных и экспериментальных частотных характеристик или форм колебаний, то изменяют расчетную схему.

На рис. 8.3 показан пример амплитудно-фазово-частотной характеристики упругой системы и формы колебаний на собственных частотах консольно-фрезерного станка (см. рис. 8.2). Действительная и мнимая части —

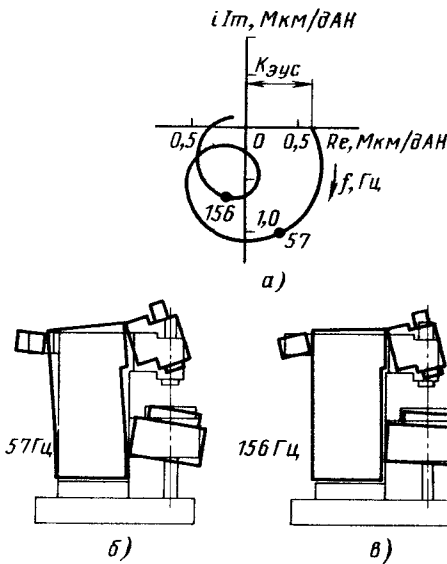


Рис. 8.3. Амплитудно-фазово-частотная характеристика (а) консольно-фрезерного станка и формы колебаний на собственных частотах: 57 Гц (б) и 156 Гц (в)

8.3. Расчет динамических процессов при установочных и вспомогательных движениях

При расчете динамических процессов во время установочных и вспомогательных движений станка определяют устойчивость движения и точность позиционирования. При этом используют эквивалентную одноконтурную систему (рис. 8.4). На практике обычно необходимо определить характер движения последних звеньев кинематических цепей привода подачи, главного движения и т. д. (например, столов, бабок, шпинделей). Поэтому в эквивалентной динамической системе выделенный элемент «процесс трения» в большинстве случаев означает физический процесс, происходящий в подвижном соединении указанных звеньев и их направляющих, опор и т. п. Остальную часть динамической системы представляют как эквивалентную упругую систему (ЭУС).

Стремясь упростить расчетную схему, обычно ограничиваются рассмотрением простейшей упругой системы с тем или иным числом масс и ориентировочным значением степени демпфирования. Тем не менее на практике встречаются случаи, когда необходимо более детальное рассмотрение системы с учетом подвижных соединений в кинематической цепи привода. Например, в тяжелых продольно-фрезерных станках, в которых используется червячно-реечный привод, возникают в некоторых случаях автоколебания, вызванные потерей устойчивости движения в червячной передаче. Они обычно имеют частоту более высокую, чем автоколебания массивного стола. Если частоты различаются существенно, то устойчивость движения стола и червяка оценивают независимо по соответствующим расчетным схемам. Таким же образом определяют необходимость учета процессов в двигателе при расчете характеристик эквивалентной упругой системы.

При трении скольжения на эквивалентную упругую систему воздействует сила трения. Обратное воздействие (связь) со стороны ЭУС на процесс трения проявляется в смещении трущихся тел перпендикулярно к поверхности скольжения вследствие того, что по закону Амонтона—Кулона сила трения пропорциональна нормальной нагрузке. Последняя соответствует нормальной контактной деформации поверхностей трения. Зависимость деформации от нагрузки выражается степенной функцией и при расчетах линеаризуется при некоторых исходных значениях нагрузки и деформации. Упругие свойства контакта учитывают при этом как параметр эквивалентной упругой системы.

В тех случаях, когда элементы пары трения конструктивно могут быть разделены, например

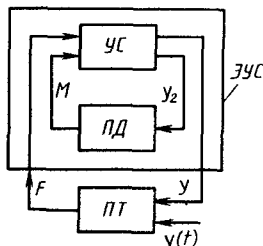


Рис. 8.4. Схема динамической системы станка при вспомогательном ходе

в тормозных устройствах, воздействие на ЭУС выражается полной силой реакции трения.

Аналогичным образом выявляют обратные связи между эквивалентной упругой системой и другими рабочими процессами, например при трении качения, при жидкостном трении (гидростатические и гидродинамические опоры и направляющие), при использовании газовых опор и направляющих. Эти связи определяются основными закономерностями соответствующих рабочих процессов.

Устойчивость замкнутой динамической системы станка при установочных и вспомогательных движениях определяют по критериям устойчивости (алгебраическим, частотным и т. п.). По критерию Найквиста систему размыкают по одной из связей и определяют частотную характеристику разомкнутой системы как произведение характеристик эквивалентной упругой системы (ЭУС) и процесса трения (ПТ).

Расчет характеристики ЭУС заключается в определении относительной деформации трущихся тел перпендикулярно поверхности трения под действием внешней силы, соответствующей силе трения, или полной реакции трения. Формируют расчетную схему с учетом изложенных выше рекомендаций. Методами теории колебаний выполняют расчет частотной характеристики ЭУС как расчет вынужденных колебаний системы под действием указанной внешней силы, изменяющейся во времени по гармоническому закону в пределах рабочего диапазона частот. При необходимости на собственных частотах системы строят формы колебаний.

На рис. 8.5 показаны примеры амплитудно-фазовых характеристик $W_{ЭУС}$ эквивалентной упругой системы с различными значениями статических характеристик $K_{ЭУС}$. Положительная статическая характеристика соответствует уменьшению нормальной контактной деформации поверхностей трения (нормальной нагрузки) при воздействии на ЭУС силы, соответствующей силе реакции трения. Отрицательная статическая характеристика означает сближение контактирующих тел пары трения, т. е. увели-

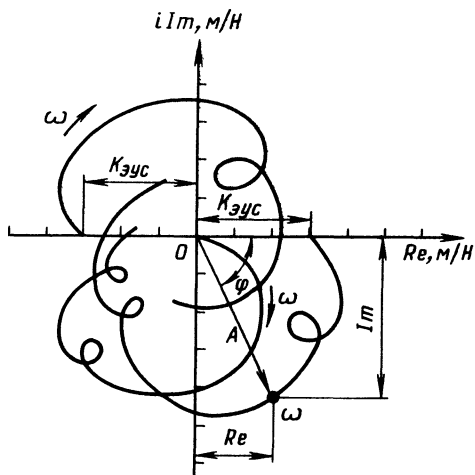


Рис. 8.5. Амплитудно-фазово-частотные характеристики ЭУС при различных статических характеристиках по связи с процессом трения

чение нормальной нагрузки. Возможно нулевое значение статической характеристики. Естественно, что такой подход приемлем, если контактирующие тела можно рассматривать как массивы, учитывая только их контактную деформацию. В более сложных случаях необходимо в той или иной форме учитывать распределенность действующих усилий и деформаций контактирующих тел.

Амплитудно-фазово-частотная характеристика ЭУС при условии, что воздействие принято в виде силы, имитирующей силу трения, имеет вид $W_{ЭУС}(i\omega) = y(i\omega)/F_T(i\omega)$, где $y(i\omega)$ — относительные колебания трущихся тел по нормали к поверхности трения, м; $F_T(i\omega)$ — периодическая сила, эквивалентная силе трения, Н; ω — круговая частота, c^{-1} .

Статическая характеристика (м/Н) ЭУС (при $\omega = 0$) $K_{ЭУС} = y/F_T$, где y и F_T представляют собой отклонения от некоторых заданных значений y_0 и F_{T0} .

Частотная характеристика может быть представлена в форме

$$W_{ЭУС}(i\omega) = A_{ЭУС}(i\omega) e^{-i\varphi_{ЭУС}(i\omega)}$$

$$W_{ЭУС}(i\omega) = Re_{ЭУС}(i\omega) - iIm_{ЭУС}(i\omega)$$

где $A_{ЭУС}(i\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика; $\varphi_{ЭУС}(i\omega)$ — фазово-частотная характеристика; $Re_{ЭУС}(i\omega)$ — вещественная частотная характеристика; $Im_{ЭУС}(i\omega)$ — мнимая частотная характеристика.

Значения этих характеристик при некоторой частоте ω показаны на АФЧХ системы, приведенной на рис. 8.5.

Трение скольжения, которое в отличие от жидкостного назовем контактным, представляет собой весьма сложный комплекс механических, физико-химических и иных явлений. По современным воззрениям контактное трение связано с деформированием тонкого поверхностного слоя трущихся тел, подверженного влиянию смазочных веществ, окружающей газовой среды, продуктов изнашивания, загрязнения. Этот слой иногда называют третьим телом. Развивается дислокационное представление о закономерностях деформирования этого слоя.

Собственная неустойчивость трения, как элемента фрикционной динамической системы, проявляется в явлениях схватывания и заедания. Схватывание соответствует горячему или так называемому холодному свариванию трущихся тел. Заедание проявляется в форме образования наростов на поверхности трения и соответствующего глубинного разрушения на другом теле. Оно может происходить и без возникновения схватывания. На рис. 8.6 показана схема возникновения нароста при трении. Теплота, образующаяся в деформируемом поверхностном слое, передается в упругодеформируемые более холодные слои (на рисунке — стрелками). Температура максимальна в средней части деформируемого слоя. При некоторой нагрузке, от которой зависит толщина деформируемого слоя, и скорости скольжения, определяющей интенсивность тепловыделения, максимальная температура превышает некоторое пороговое для данного материала значение (например, температуру рекристаллизации), при котором резко возрастает пластичность. Дальнейшее деформирование происходит по этим пластичным слоям. Часть слоя, примыкающая к более твердому, менее деформированному телу, остается на поверхности этого тела в виде нароста. Нижняя температурная граница наростообразования определяется указанным условием, верхняя — условием достижения поверхностной температурой упомянутого выше порогового значения. Возникновению описанного проявления собственной неустойчивости трения способствует рост коэффициента трения, например, при нарушении смазки поверхностей, а также высокие контактные нагрузки, в том числе локальные.

При проектировании станков, как правило, принимают меры (термообработка поверхностей

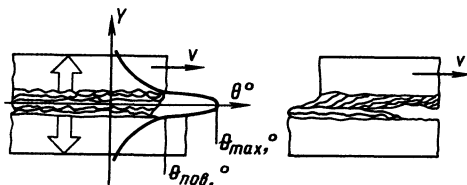


Рис. 8.6. Схема образования нароста при трении

трения, применение специальных смазочных материалов и т. п.), в нормальных условиях эксплуатации предотвращающего нарушение собственной устойчивости процесса трения.

Характеристика контактного трения скольжения определяется законом Амонтона — Кулона: $F_T = fN$, где F_T — сила трения, Н; f — коэффициент трения; N — нормальная нагрузка, Н.

При линеаризованной зависимости $N = C_k y$, где C_k — контактная жесткость, Н/м, y — изменение нормальной контактной деформации при изменении нагрузки N , м, статическая характеристика контактного трения имеет вид $K_T = F_T/y = C_k f$. Динамическая характеристика контактного трения определяется наличием предварительного смещения — смещения трущихся тел в плоскости скольжения на стадии начального (после приложения нагрузки) тангенциального деформирования поверхностного слоя. Аппроксимация зависимости сдвигающей силы от тангенциальной деформации экспоненциальной функцией дает следующую динамическую частотную характеристику контактного трения:

$$W_T(i\omega) = F_T(i\omega) / y(i\omega) = K_T / (iT_T\omega + 1),$$

где F_T и y — изменение силы трения и нормальной контактной деформации; T_T — постоянная времени трения, с.

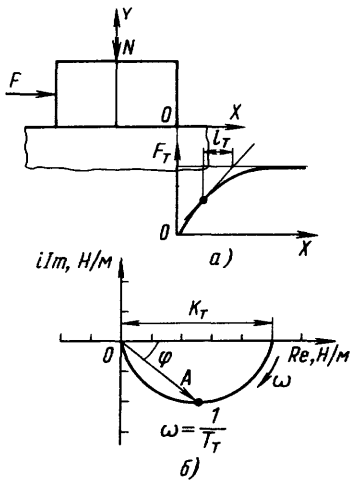


Рис. 8.7. Схема предварительного смещения трущегося тела под действием сдвигающей силы F (а) и амплитудно-фазово-частотная характеристика (б) трения скольжения (по нормальной контактной деформации)

При постоянной скорости смещения $T_T = l_T/v$, где l_T — постоянная экспоненты тангенциального смещения (по пути), м; v — скорость смещения, м/с.

На рис. 8.7 показана частотная характеристика трения. Практическое значение динами-

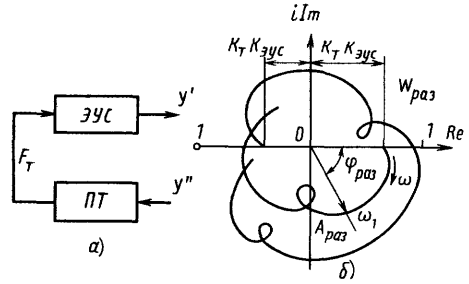


Рис. 8.8. Схема разомкнутой динамической системы станка (а) при вспомогательном ходе (фрикционной системы) и ее амплитудно-фазово-частотные характеристики (б) при положительном и отрицательном коэффициенте статической характеристики ЭУС

ческая характеристика трения имеет при весьма малых скоростях смещения, так как предварительное смещение измеряется микрометрами.

Оценку устойчивости динамической системы при перемещении узлов и деталей станка с трением скольжения выполняют по критерию Найквиста с использованием частотной характеристики разомкнутой системы $W_{раз}(i\omega) = W_{ЭУС}(i\omega) W_{ПТ}(i\omega)$, где $W_{раз}(i\omega)$ — характеристика разомкнутой системы.

На рис. 8.8 показана схема разомкнутой динамической системы и построение ее характеристики путем перемножения комплексных величин (фазы складываются, амплитуды перемножаются).

В простейшей форме критерия Найквиста система устойчива, если характеристика разомкнутой системы не охватывает точку «-1» на вещественной оси комплексной плоскости.

В зависимости от знака статической характеристики эквивалентная упругая система может иметь отрицательную, нулевую и положительную статическую характеристики. Потеря устойчивости замкнутой динамической фрикционной системой может носить статический и колебательный характер.

Статическая неустойчивость (заклинивание) выражается в неограниченном возрастании силы трения и соответствующей ей нормальной контактной деформации под действием сдвигающей силы. Перемещаемое тело — узел станка — при этом сместить не удастся. Узел станка «заклинивает». Это явление встречается редко в конструкциях, где сдвигающая сила увеличивает силу трения и при значительном коэффициенте трения. По критерию Найквиста условия статической потери устойчивости следующие: $K_{ЭУС} < 0$; $|K_T K_{ЭУС}| > 1$.

При этом характеристика разомкнутой системы охватывает точку «-1» на вещественной оси при частоте, равной нулю. Если второе условие не выполняется, то это означает не потерю устойчивости, а лишь дополнительное уве-

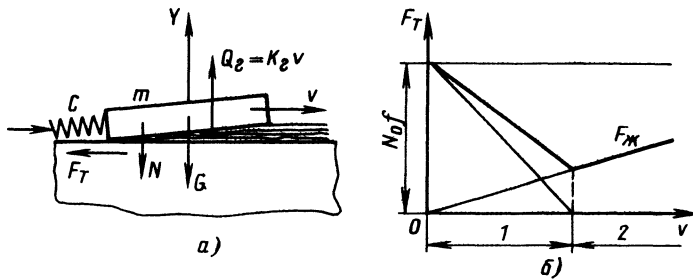


Рис. 8.9. Схема динамической системы при трении скольжения смазанных поверхностей (а) и статическая зависимость силы трения от скорости (б): Q_r — гидродинамическая подъемная сила; K_r — коэффициент; G — нагрузка; N — нагрузка на контакте трущихся тел ($N = G - Q_r$); N_0 — начальное значение нагрузки; C — приведенная жесткость упругой системы привода: 1 — область смешанного трения; 2 — область жидкостного трения; $F_{ж}$ — сила жидкостного трения

личение силы трения на контакте и соответственно увеличение сдвигающей силы. Устраняется заклинивание изменением конструкции привода, сводящим к нулю или уменьшающим отрицательный статический коэффициент, а также использованием средств, уменьшающих коэффициент трения.

Неустойчивость в форме нарастающих колебаний возникает при охвате точки «—1» на вещественной оси характеристической разомкнутой системы той или иной ее частотной частью. На близкой к ней частоте развиваются автоколебания. Физическая природа этих колебаний проявляется в том, что при движении колеблющегося тела в сторону действия силы трения оно сильнее прижимается к поверхности и сила трения возрастает. При колебательном движении (со скоростью, меньшей заданной скорости движения механизма) навстречу силе трения тело, наоборот, отжимается, т. е. давит на контакт с меньшей силой, и сила трения уменьшается. Движение происходит по эллиптической траектории. В устойчивой области параметров системы колебательное движение происходит также по эллиптической траектории, но в обратном направлении. Работа сил трения, меняющихся за цикл колебаний, определяет в этом случае рассеяние энергии колебаний, иначе говоря, демпфирующий эффект данного подвижного фрикционного соединения на соответствующей частоте.

Таким образом, при проектировании станков и механизмов следует уделять внимание выявлению и оценке связей, возникающих между тангенциальными сдвигами в паре трения и смещениями по нормали к поверхности скольжения. Чаще всего эта связь является упругой (координатной).

На практике важное значение имеет другой вид связи — скоростной, или связи по первой производной. Она возникает в парах трения при наличии смазочного слоя, не разделяющего полностью трущиеся поверхности, т. е. при смешанном трении. В этом случае в подвижном соединении кроме трения возникают гидродинамические процессы. Перетекание вязкого смазочного материала в клиновидном зазоре, образованном трущимися телами или их неровнос-

тями (при малых скоростях скольжения), сопровождается повышением давления в смазочном слое, появлением гидродинамической подъемной силы. Эта сила пропорциональна скорости скольжения, вязкости смазочного материала, немонотонно зависит от толщины слоя смазочного материала (зазора между поверхностями), угла взаимного наклона поверхностей. Гидродинамическая подъемная сила изменяет фактическую нагрузку на контакте трущихся тел, т. е. нормальную контактную деформацию их поверхностей. Между тангенциальными и нормальными смещениями трущихся тел возникает связь, определяемая скоростью тангенциальных перемещений. Эта связь выражается статической характеристикой смешанного трения — падающей зависимостью силы трения от скорости. Верхняя граница по скорости этого вида трения определяется равенством гидродинамической подъемной силы заданной нагрузке на подвижный элемент пары трения.

На рис. 8.9 показана схема подвижного соединения с гидродинамической связью, его статическая характеристика по скорости скольжения.

При быстром изменении скорости скольжения контактная деформация, а значит, и сила трения не изменяются сразу. Вследствие этого при колебаниях скорости изменение силы трения мало и не может практически вызвать потерю устойчивости и появление автоколебаний. Однако в переходных процессах роль гидродинамического эффекта значительна.

Кроме гармонических колебаний, связанных с потерей устойчивости движения, при малых скоростях скольжения, характерных для механизмов подачи в станках, возникают релаксационные автоколебания. Они характеризуются наличием остановок перемещаемого тела. Появление таких автоколебаний объясняется скачком силы трения при переходе от покоя к скольжению. Исследования показывают, что скачок определяется сложным взаимодействием упругой системы и трения. В модели релаксацион-

ных автоколебаний используется представление об упругой системе с одной степенью свободы. На рис. 8.10 показаны схема такой системы и принятая характеристика трения. Верхняя граница области автоколебаний по скорости — критическая скорость — определяется выражением

$$v_c = \Delta F_T / \sqrt{\psi C m}.$$

Здесь $\Delta F_T = F_{T0} - F_T = N \Delta f$ — скачок силы трения, где F_{T0} — сила статического трения; F_T — сила кинетического трения; N — нормальная нагрузка; Δf — разность коэффициентов трения при покое и движении; $\psi = 4\pi\theta$ — относительное рассеяние энергии при колебаниях, θ — коэффициент затухания колебаний; C — приведенная жесткость привода; m — масса перемещаемого тела.

Ориентировочные значения коэффициентов трения в направляющих станков приведены в табл. 8.1, а значения ψ приведены ниже.

| Соединение, узел | Относительное рассеяние энергии колебаний ψ |
|--|--|
| Неподвижный плоский стык | 0,15 |
| Неподвижное цилиндрическое соединение | 0,3 |
| Направляющие: | |
| скольжения | 0,8—1,0 |
| качения | 0,4—0,6 |
| гидростатические | 1,5—2,0 |
| Винт—гайка: | |
| скольжения | 0,5—0,8 |
| качения | 0,5—0,7 |
| гидростатические | 1,2—2,0 |
| Порные подшипники качения | 0,2—0,3 |
| Привод подачи узла на направляющих качения | 0,6—0,8 |

На практике удобен приближенный критерий Д. Б. Филиппова, определяющий условия отсутствия релаксационных автоколебаний. $n_s C < (1/n_s)[F_T/C]$. Здесь $n_s \approx 1,5$ — коэффициент запаса; $[F_T/C]$ — некоторое граничное значение F_T/C , мкм, где F_T — суммарная сила трения в направляющих, Н; C — приведенная жесткость привода, Н/мкм.

8.1. Коэффициенты трения в направляющих станков

| Материал пары трения | Коэффициент трения | |
|----------------------|--------------------|--------------|
| | покоя f_0 | движения f |
| Чугун — чугун | 0,27 — 0,3 | 0,18 — 0,22 |
| Сталь — чугун | 0,3 — 0,32 | 0,22 — 0,28 |
| Бронза — чугун | 0,18 — 0,2 | 0,16 — 0,18 |
| Текстолит — чугун | 0,33 — 0,37 | 0,2 — 0,26 |
| Фторопласт — чугун | 0,05 — 0,1 | 0,03 — 0,04 |

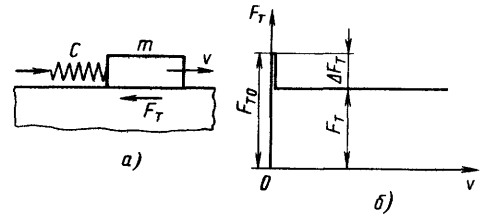


Рис. 8.10. Схема фрикционной системы с одной степенью свободы (а) и зависимость силы трения от скорости (б) со скачкообразным переходом от покоя к скольжению

Для пары трения чугун — чугун при смазывании маслом «Индустриальное-20» $[F_T/C] = 22 \dots 50$ мкм; для пары чугун — сталь — 20—30 мкм; для пары чугун — бронза — 130—200 мкм (меньшие значения при скорости движения порядка 0,1 мм/мин, большие — для пар чугун — чугун, чугун — сталь 80 мм/мин, для пары чугун — бронза 15 мм/мин). Критерий означает, что деформация привода, вызванная силой трения, не должна превышать некоторого заданного значения. При проектировании станков с узлами на сложных направляющих следует стремиться к такой их комбинации, которая дает минимальное значение равнодействующей сил трения.

Вынужденные колебания при установочных и вспомогательных движениях станков вызываются многочисленными воздействиями на упругую систему и рабочие процессы: сил инерции неуравновешенных вращающихся масс роторов электродвигателей, шпинделей, инструментов и т. п.; сил, возникающих при пересопрежении зубьев зубчатых колес или при несовпадении осей, соединенных в осевом направлении, валов; пульсации давления рабочей жидкости в гидросистемах; магнитной неуравновешенности ротора и статора электродвигателя; изменений жесткости и сил, возникающих в подшипниках качения, и т. д. Большую группу составляют воздействия, передаваемые через основание станка посторонними источниками. Наряду с воздействиями стационарного характера значительное место в спектре возмущений и вызываемых ими колебаний составляют нестационарные воздействия, например колебания на собственных частотах системы, порождаемые периодическими толчками или ударами. Многочисленность и сложность взаимодействия различных источников возмущений придают вынужденным колебаниям случайный характер.

Для выявления источников возмущений используют средства вибродиагностики, получающие в последнее время значительное развитие. Оценку вынужденных колебаний в станках осуществляют, как правило, по относительноному

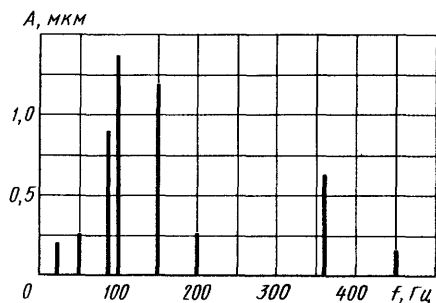


Рис. 8.11. Спектр колебаний при вспомогательном ходе шлифовального станка

смещению инструмента и заготовки перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Это связано с тем, что вынужденные колебания вызывают отклонение размеров и формы, ухудшают качество поверхности детали, а также снижают износостойкость инструмента. На практике в некоторых случаях, например на шлифовальных станках, оценку колебаний выполняют по колебаниям других деталей и узлов станка, характеризующим указанные относительные смещения инструмента и обрабатываемой заготовки.

На рис. 8.11 показан спектр колебаний шлифовального станка при вспомогательных и установочных движениях. В этом спектре выделяются колебания на частотах вращения ротора электродвигателя, шлифовального круга, на частоте и двойной частоте переменного тока, а также на более высоких собственных частотах системы. В подразд. 8.4 показана трансформация этих колебаний при резании и их роль в формировании волнистости и шероховатости поверхности.

При проектировании станков, включая оснастку, инструмент, электро- и гидроприводы, необходимо различными конструктивными и технологическими приемами насколько возможно устранить источники возмущений или снизить уровень вызываемых ими колебаний. При необходимости проектируют специальные фундаменты, предусматривают использование специальных виброизолирующих опор, балансировку, в том числе автоматическую, вращающихся масс. Применяют опоры и направляющие типа гидростатических, не создающие возмущений и хорошо демпфирующие колебания. Используют материалы, обладающие высокой демпфирующей способностью, для деталей, колебания которых существенно влияют на общий уровень колебаний в зоне обработки. К таким материалам относятся полимерные композиционные материалы типа синтетрана, высокомодульных углеродных волокон, а также специальные стали и сплавы.

230

Переходные процессы при вспомогательных и установочных движениях станка оказывают большое влияние на точность обработки и производительность станка. Особое значение качество этих процессов приобретает в автоматизированном оборудовании.

Оценку качества переходных процессов в соответствии с требованиями в каждом конкретном случае проектирования станка выполняют по максимальным динамическим отклонениям, по их превышению над статическими отклонениями, по колебательности процесса, по его продолжительности, характеризующей быстроту действия системы.

Оценка качества переходных процессов необходима, в первую очередь, при разработке систем пуска (разгон) и торможения (останов, позиционирование), систем реверсирования движения узлов станка. В значительной мере это специальные задачи разработки электрических, гидравлических или иных приводов, что выходит за рамки данного подраздела. Однако при решении этих задач должны быть учтены особенности механической системы.

При разгоне, торможении, позиционировании и реверсе столов, стоек, бабок и других узлов, перемещаемых по направляющим скольжения со смазкой, существенное влияние на качество переходных процессов оказывают особенности динамической системы (см. рис. 8.9). Смещение перемещаемого узла перпендикулярно к поверхности скольжения определяет зависимость силы трения от скорости, связанную с изменением нормальной контактной деформации трущихся тел. Инерционность всплывания (или оседания) определяется инерцией смещаемой массы и вязким сопротивлением смазочного материала, всасываемого или вытесняемого из щелевого зазора между трущимися телами. На рис. 8.12 показан переходный процесс при разгоне (скачкообразном увеличении скорости) стола. В терминологии теории автоматического регулирования он соответствует реакции инерционного звена второго порядка. В тех достаточно распространенных случаях, когда влияние инерционной

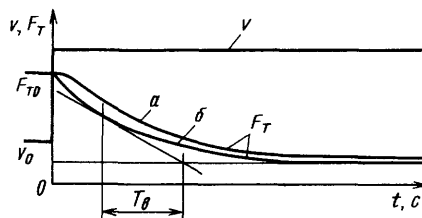


Рис. 8.12. Переходный процесс при разгоне стола на направляющих скольжения со смазкой:

a — при большой массе стола; *b* — при малой массе стола; $T_{в}$ — постоянная времени всплывания; F_{T0} — сила трения до разгона; F_T — сила трения при разгоне стола от скорости v_0 до v

составляющей мало, процесс соответствует поведению аperiodического звена первого порядка. При этом кривая разгона является экспонентой.

На рис. 8.12 показано построение для определения постоянной экспоненты — постоянной времени всплытия перемещаемого узла. Всплытие можно считать законченным и соответственно считать установившимся новое положение стола и значение силы трения через время, равное 3—5 постоянным времени всплытия. Постоянную времени определяют экспериментально.

При проектировании станков необходимо учитывать продолжительность переходного процесса и необходимый для его завершения путь: перебег при реверсе, участок замедленного перемещения при позиционировании. Стабилизация силы трения по завершении переходного процесса позиционирования определяет постоянство деформации упругой системы привода и соответственно постоянство заданного положения узла.

Наличие «скачка» силы при трогании с места вызывает затруднения при позиционировании малыми перемещениями, так как такое перемещение сопровождается самопроизвольным скачком узла.

При малом затухании предельная длина (m) скачка S перемещения $S = 2\Delta F_T / C$. При перемещении узлов со скоростями, превышающими критическое значение, соответствующее границе области автоколебаний, возникает колебательный переходный процесс. Время затухания этих колебаний тем меньше, чем выше устойчивость системы. Время переходного процесса определяется путем решения нелинейного уравнения. В практике конструирования станков нужное быстроедействие системы обеспечивается созданием условий достаточного удаления рабочих скоростей от критического значения.

8.4. Расчет динамических процессов при резании и их влияние на точность обработки

Расчетная схема станка при резании охватывает замкнутую динамическую систему полностью. Однако для анализа удобно представить динамическую систему в виде эквивалентной одноконтурной системы (рис. 8.13). Эквивалентной упругой системой в этом случае является динамическая система станка при вспомогательных и установочных движениях.

Прямая связь в динамической системе при резании выражается силой резания, деформирующей эквивалентную упругую систему. Обратная связь реализуется через изменение толщины срезаемого слоя (при обработке с тол-

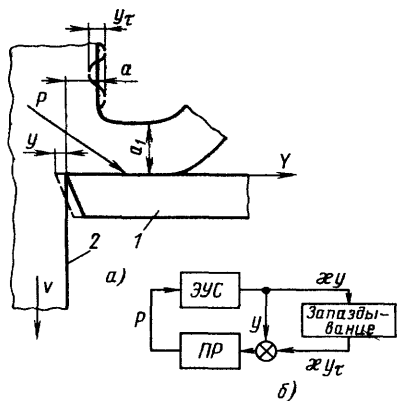


Рис. 8.13. Схема смещений y реза (1) и заготовки (2) при резании (а) и эквивалентная динамическая система станка при резании (б):

y — изменение толщины срезаемого слоя, равное смещению реза и заготовки при предыдущем рабочем ходе; κ — коэффициент перекрытия следа по ширине срезаемого слоя

щиной срезаемого слоя существенно меньше, чем его ширина) при деформировании системы. Обратная связь складывается из двух составляющих: одна совпадает во времени с деформированием, другая проявляется с некоторым запаздыванием во времени. Вторую составляющую называют регенеративной связью. Сущность ее заключается в том, что при относительном смещении инструмента и обрабатываемой заготовки на поверхности заготовки (или инструмента, например шлифовального круга вследствие его изнашивания) остается след в форме переменного припуска. При повторном проходе этот припуск входит в зону резания как «закрепленная» на поверхности заготовки деформация, происшедшая во время предшествующего рабочего хода. Время между рабочими ходами определяет время запаздывания. Иногда говорят, что первая составляющая обратной связи проявляется при резании «по чистому», а обе составляющие — при резании «по следу».

В зависимости от отношения ширины повторного срезаемого слоя к ширине исходного судят о коэффициенте κ перекрытия, который может изменяться от нуля (при резании по чистому) до единицы при полном перекрытии, например при врезном точении или шлифовании.

Характеристика эквивалентной упругой системы станка (по связи с резанием) определяется в простейшем случае, достаточно широко распространенном, отношением изменения деформации (перпендикулярно поверхности резания) к внешней силе, соответствующей силе резания. Это модельное представление удобно при экспериментальном определении характеристики. При проектных расчетах характери-

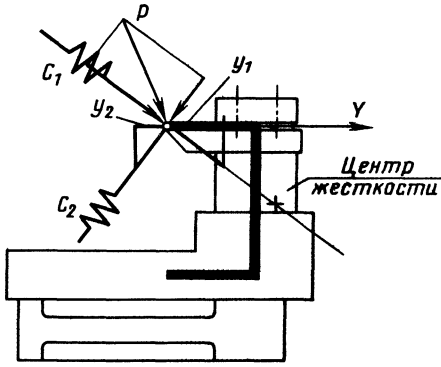


Рис. 8.14. Схема упрощенной модели эквивалентной упругой системы токарного станка

ки системы нет необходимости в замене сложной схемы сил резания одной силой.

На рис. 8.14 показана схема упрощенной модели ЭУС токарного станка при врезном поперечном точении. Модель ЭУС принята плоской для простоты анализа. При этом обрабатываемая заготовка вращается, суппорт перемещается. Перемещение вершины резца под действием силы резания определяется деформацией суппорта как упругой системы, жесткость которой в двух перпендикулярных направлениях различна. Ось максимальной жесткости направлена через центр жесткости суппорта.

Статическая характеристика (м/Н) эквивалентной упругой системы $K_{ЭУС} = y/P$. Здесь y — изменение смещения вершины резца по оси Y , перпендикулярной к поверхности резания; $y = y_1 - y_2$, где y_1, y_2 — проекции деформаций по осям жесткости на ось Y ; P — изменение силы, соответствующей силе резания.

В зависимости от знака смещения вершины резца (положительное смещение — от заготовки) возможны три случая: 1) $y_1 > y_2$; $y > 0$; $K_{ЭУС} > 0$; 2) $y_1 = y_2$; $y = 0$; $K_{ЭУС} = 0$; 3) $y_1 < y_2$; $y < 0$; $K_{ЭУС} < 0$.

Наличие таких характеристик в сложных пространственных упругих системах отмечалось в подразд. 8.3. Изложенное модельное представление необходимо для выявления принципиальных особенностей динамических процессов в станках. При проектном расчете эквивалентной упругой системы, имеющей более сложную расчетную схему, переход к такой модели не нужен.

Частотная характеристика системы в рассматриваемом случае является суммой частотных (комплексных) характеристик независимых (нормальных — по терминологии теории колебаний) колебательных систем с одной степенью свободы. На рис. 8.15 показан пример сложения характеристик этих систем, одна из которых

имеет отрицательный статический коэффициент. Принципиально важной особенностью динамической частотной характеристики описанной модели упругой системы является охват ею всех квадрантов комплексной плоскости. Колебательная система с одной степенью свободы или цепная система с многими степенями свободы имеют частотные характеристики, лежащие в одной полуплоскости комплексной системы координат.

Экспериментально характеристики определяют, используя нагружающие устройства в виде вибраторов различных типов и измерительных преобразователей для фиксирования смещений между обрабатываемой заготовкой и инструментом. Изменяя частоту колебаний силы, создаваемой вибратором в рабочем диапазоне частот, определяют соотношение амплитуд и фазу смещения системы. Можно экспериментально определять частотные характеристики при других формах возмущающего воздействия, в частности при ударе. Полученные сигналы измерительных преобразователей силы и смещения подвергают математической обработке с помощью ЭВМ.

На практике определяют характеристики системы при резании на режимах, сопровождающихся появлением вибрации. Информация получается более полной, если используется безынерционный динамометр для фиксирования силы резания. В этом случае при математической обработке сигналов методами статистической динамики определяют отношение деформации ЭУС к силе резания. Преимущество этого метода — наиболее близкое соответствие получаемой информации реальным условиям работы станка. Однако практически при этом, как правило, оказывается ограниченным частотный диапазон получаемой характеристики.

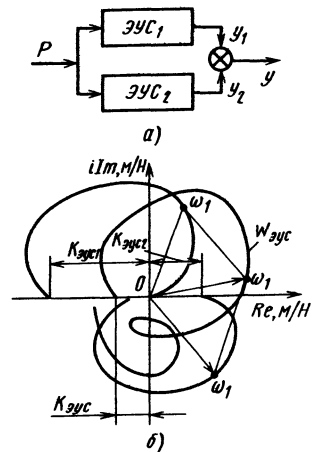


Рис. 8.15. Схема (а) и амплитудно-фазово-частотная характеристика (б) упрощенной модели эквивалентной упругой системы по главным осям жесткости (по нормальным координатам)

Данные, получаемые при экспериментальном исследовании прототипа станка, используют при необходимости для уточнения параметров расчетной схемы, а также при составлении расчетных схем станков аналогичной конструкции.

В подвижном соединении инструмента и обрабатываемой заготовки реализуется рабочий процесс — резание. Основным параметром, определяющим связь деформации эквивалентной упругой системы с процессом резания, является изменение толщины срезаемого слоя. Резание как процесс упругопластического деформирования содержит сложные внутренние связи между напряженным состоянием, деформациями, тепловыми процессами и свойствами обрабатываемого материала. В зависимости от условий резания (режима обработки, геометрических параметров и материала режущего инструмента; материала заготовки и т. п.) резание может быть собственно устойчивым и неустойчивым. Устойчивому процессу соответствует образование сливной стружки, неустойчивому — стружки надлома, элементной, суставчатой, стружки со срывающимся наростом. В областях собственной неустойчивости резания возникает автоколебательный процесс стружкообразования. Примерное постоянство объемов формирующихся элементов стружки или срывающегося нароста определяет зависимость частоты автоколебательного процесса от скорости резания: частота растет с увеличением скорости.

Статическая и динамическая характеристики резания могут быть определены только для собственно устойчивого стружкообразования, т. е. при формировании сливной стружки. Характеристики выражают зависимость силы резания от толщины срезаемого слоя.

Линеаризуя известные эмпирические зависимости, определяющие силу резания, можно представить статическую характеристику (Н/м) в следующем виде: $K_p = P/y = P_{ya}b$. Здесь K_p — статическая характеристика резания как элемента замкнутой динамической системы станка; P — изменение (отклонение) силы резания; y — изменение (отклонение) толщины срезаемого слоя; $P_{ya} = \sigma_0 \xi$ — удельная сила резания, Н/м², где σ_0 — некоторое условное напряжение типа временного сопротивления обрабатываемого материала; ξ — усадка стружки, являющаяся характеристикой степени пластического деформирования материала; $\xi = a_1/a$ (a_1 — толщина стружки; a — толщина срезаемого слоя), b — ширина срезаемого слоя.

Динамическую характеристику резания определяют отдельно для сил на передней и на задней поверхностях резца (режущего элемента). Частотная характеристика резания для силы на передней поверхности режущего элемента $W_{p_n}(i\omega) = P_{p_n}(i\omega)/y(i\omega) = K_p/(iT_p\omega + 1)$, где P_{p_n} — изменение силы резания на перед-

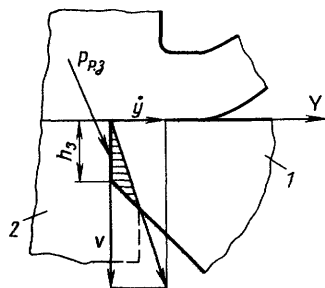


Рис. 8.16. Схема контактной деформации на задней поверхности резца при его смещениях: 1—резец, 2—заготовка

ней поверхности; T_p — постоянная времени резания (стружкообразования).

Величину T_p (с) определяют расчетным путем или экспериментально, она характеризует отставание изменения силы резания от изменения толщины срезаемого слоя: $T_p = ka_0\xi_0/v = l_p/v$, где $k = 1...1,5$ — коэффициент; a_0 — заданная толщина срезаемого слоя; ξ_0 — заданное (установившееся) значение усадки стружки, l_p — длина пути резания за время T_p , постоянная пути резания; v — скорость резания.

Изменение силы на задней поверхности режущего элемента определяется значением контактной деформации резцом обработанной поверхности.

На рис. 8.16 показана схема формирования контактной деформации при смещении инструмента. При малых смещениях и постоянной высоте контактной площадки в первом приближении частотная характеристика резания по силе на задней поверхности имеет вид

$$W_{p_s}(i\omega) = P_{p_s}(i\omega)/y(i\omega) = iH_s h_s^2 b_s \omega / (2v),$$

где P_{p_s} — изменение силы на задней поверхности резца; H_s — контактная жесткость (твердость материала обрабатываемой заготовки); h_s — высота контактной площадки (фаска, площадка износа); b_s — ширина контактной площадки (как правило, $b_s > b$ за счет контакта вспомогательной поверхности).

Сила на задней поверхности пропорциональна первой производной координаты смещения или скорости колебаний. Изменение силы опережает во времени изменение толщины срезаемого слоя при смещении инструмента (но не изменения припуска). Указанная линейная зависимость силы на задней поверхности резца от скорости колебаний (скорости врезания в заготовку) является приближенной и используется при условии $A_y \ll (tg\alpha/2)(v/\omega)$, где A_y — амплитуда колебаний в направлении, перпендикулярном к поверхности резания; α — задний угол резца.

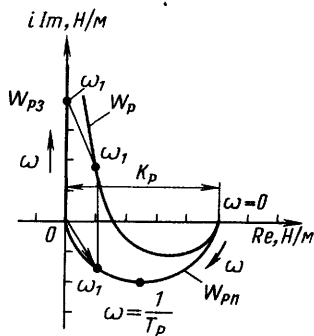


Рис. 8.17. Амплитудно-фазово-частотная характеристика процесса резания

На рис. 8.17 показаны частотные характеристики резания применительно к передней и задней поверхностям. Там же показана суммарная характеристика первого приближения, основанная на допущении, что силы на передней и задней поверхностях действуют по одной прямой

$$W_p(i\omega) = P(i\omega) / y(i\omega) = \\ = K_p (1 / (iT_p \omega + 1) + iK_3 T_a \omega).$$

Здесь $K_3 = b_3/b$, T_a — постоянная времени заднего угла (формирования сил на задней поверхности реза), с; $T_a = H_3 h_3^2 / (2vP_{yд}) = l_a/v$, где l_a — длина пути резания за время T_a .

Характеристика показывает, что в зависимости от режимов резания, материала заготовки, геометрических параметров и материала режущего инструмента, частоты колебаний сила резания может отставать или опережать по фазе смещение инструмента. При обработке пластичных материалов (медь, алюминий, электротехническая сталь и т. п.) влияние сил на задней поверхности мало (мало H_3). При резании твердых или закаленных материалов изменения этих сил играют значительную роль в динамических процессах.

8.2. Коэффициенты динамической характеристики процесса резания

| Обрабатываемый материал | Твердость НВ | $P_{yд}$, даН/мм ² | l_p , мм | l_{a1} , мм |
|-------------------------|--------------|--------------------------------|------------|---------------|
| Сталь 10 | 85 | 325 | 0,47 | 0,01 |
| Сталь 35 | 140 | 190 | 0,15 | 0,02 |
| Сталь 45 | 205 | 160 | 0,20 | 0,03 |
| 2Х13 | 200 | 150 | 0,19 | 0,01 |
| Д16АТ | 115 | 220 | 0,24 | 0,03 |
| Д1Х18Н10Т | 190 | 250 | 0,24 | 0,04 |
| 30ХГСА | 225 | 380 | 0,18 | 0,05 |
| У8 | 220 | 270 | 0,19 | 0,02 |
| У10 | 150 | 210 | 0,20 | 0,03 |

Существенное значение имеет состояние режущей кромки (радиус закругления, фаска износа и т. п.). Многообразие условий резания, изменение параметров режущего лезвия по мере его изнашивания определяют соответствующее многообразие значений параметров динамической характеристики резания. Например, при изменении скорости резания стали от 20—30 м/мин до 100—150 м/мин усадка изменяется в 1,5—2 раза. При изменении радиуса скругления режущей кромки от значения, близкого к нулю, до 1 мм усадка изменяется также в 1,5—2 раза.

Для расчетов используют значения параметров, типичные для рассматриваемых условий обработки. В табл. 8.2 приведены экспериментально полученные средние значения удельной силы $P_{yд}$ и постоянные пути резания l_p и l_a при обработке различных материалов острозаточенным резцом. Условия обработки: скорость резания 10—160 м/мин; заданная средняя толщина срезаемого слоя 0,08 мм; передний угол реза 10° ; задний угол 8° ; материал реза Т15К6; $K_3 \approx 1$.

Инструменты цилиндрической формы (шлифовальные круги, цилиндрические фрезы и т. п.) в процессе обработки срезают слой, имеющий переменное сечение (типа «запятой» и т. п.). Динамическая характеристика резания в этом случае имеет составляющую, определяемую скоростью внедрения, так как врезание изменяет форму срезаемого слоя. Создается опережение силы по фазе относительно изменения толщины срезаемого слоя.

Устойчивость динамической системы станка при резании оценивается по частотному критерию Найквиста. Применение этого критерия по отношению к системе с запаздывающей связью, возникающей вследствие образования регенеративного эффекта при резании по следу, имеет свою особенность. Она заключается в формировании разомкнутой системы разрывом только связей, включающих элемент запаздывания.

Система устойчива, если характеристика разомкнутой системы (полученная без учета регенеративного эффекта) лежит справа от некоторой линии (окружности), семейство которых показано на рис. 8.18. Для предельных значений коэффициента перекрытия получают прямую Im_5 , параллельную мнимой оси и проходящую через точку «—0,5» на вещественной оси, при коэффициенте перекрытия, равном единице, или точку «—1» на вещественной оси при коэффициенте перекрытия, равном нулю (резание «по чистому»). В последнем случае динамическая система станка устойчива, если характеристика разомкнутой системы не охватывает точку «—1». На рис. 8.19 показана схема разомкнутой системы при

резании «по чистому». Там же показаны характеристики разомкнутой системы при положительном и отрицательном статическом коэффициенте эквивалентной упругой системы: $W_{раз}(\omega) = W_{ЭУС}(i\omega)W_p(i\omega)$. При этом $A_{раз}(i\omega) = A_{ЭУС}(i\omega)A_p(i\omega)$, $\varphi_{раз}(i\omega) = \varphi_{ЭУС}(i\omega) + \varphi_p(i\omega)$.

Анализируя возможные модификации характеристики разомкнутой системы, можно оценить влияние параметров эквивалентной упругой системы и процесса резания на устойчивость динамической системы станка при резании. Увеличение коэффициента K_p резания при увеличении ширины срезаемой стружки ведет к снижению запаса устойчивости. При некотором значении ширины стружки характеристика разомкнутой системы достигает границы, определяемой критерием устойчивости. Такое предельное значение ширины срезаемого слоя получило название «предельной стружки» и является удобным параметром для оценки качества станка по устойчивости при проектировании и при испытаниях прототипов или серийно выпускаемых станков.

Необходимые изменения в конструкции станка, влияющие на повышение устойчивости при резании, оценивают путем анализа формы колебаний на собственной частоте, определяемой по той части характеристики разомкнутой системы, которая достигает границы устойчивости.

После выбора возможных конструктивных решений (повышения жесткости, демпфирования, изменения конфигурации деталей и т. п.) выполняют повторный расчет характеристик. Повторный расчет необходим вследствие значительного влияния связанности колебаний отдельных форм между собой в сложных колебательных системах. Улучшив характеристику данной формы колебаний, произведенные конструктивные изменения могут сделать потенциально неустойчивой другую частотную составляющую. Это справедливо для всех элементов динамической системы. Например, можно достигнуть увеличения демпфирования колебаний токарного станка на низкой частоте, соответствующей интенсивным колебаниям шпиндельного узла и обрабатываемой заготовки, путем усиления эффекта, оказываемого задней поверхностью реза (создание виброгасящей фаски, расширение зоны контакта вспомогательной задней поверхности и т. п.).

В этом случае динамическая характеристика резания показывает увеличение составляющей фазового опережения изменения силы резания по отношению к изменению толщины срезаемого слоя. Однако эта фазовая составляющая расширяет высокочастотную составляющую характеристики разомкнутой системы и вызывает появление интенсивных высокочастотных колебаний инструмента. В таких случаях может

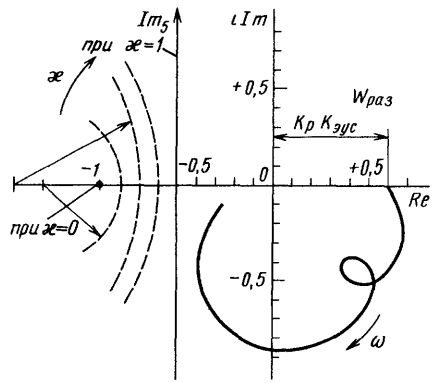


Рис. 8.18. Схема оценки устойчивости динамической системы станка при резании

быть найдено некоторое компромиссное решение.

Статическая неустойчивость встречается при резании достаточно часто и носит название «подрывание» инструмента. Она возникает в тех случаях, когда характеристика разомкнутой системы охватывает точку «-1» на вещественной оси при нулевой частоте.

При этом происходит интенсивно нарастающее самопроизвольное врезание инструмента в обрабатываемую заготовку.

Условия потери статической устойчивости или условия подрывания следующие: $K_{ЭУС} < 0$; $|K_p K_{ЭУС}| > 1$.

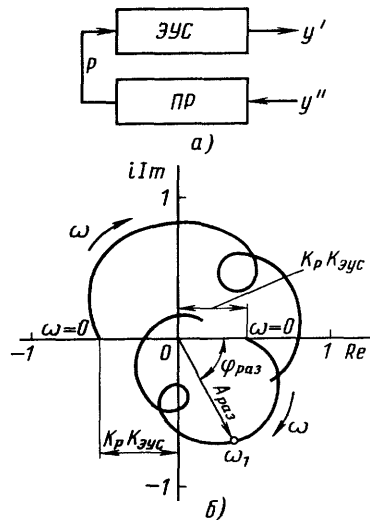


Рис. 8.19. Схема (а) разомкнутой динамической системы станка при резании «по чистому» и ее частотные характеристики (б) при положительном и отрицательном коэффициенте статической характеристики ЭУС

Исключение этих условий достигается путем такой перекомпоновки системы, при которой статическая характеристика эквивалентной упругой системы станет положительной. Возможно уменьшение ширины стружки и соответственно коэффициента резания, а также повышение жесткости, т. е. уменьшение статического коэффициента эквивалентной упругой системы.

На токарных станках, особенно на операциях отрезания или врезной обработки широким резцом, условия статической потери устойчивости встречаются часто. Это объясняется спецификой характеристики упругой системы суппортной группы таких станков как одного из случаев реализации статической связи между пространственными деформациями системы.

При формировании элементной стружки или неустойчивого нароста, т. е. при автоколебательном стружкообразовании, сила резания периодически изменяется. В этом случае возникает задача оценки колебаний динамической системы станка, вызванных периодически изменяющейся силой резания. Задача формулируется как задача взаимодействия автоколебательной системы с пассивной колебательной упругой системой. На рис. 8.20 показана схема динамической системы при резании в условиях наростообразования. Связь наростообразования и деформаций упругой системы определяется зависимостью размера нароста от толщины срезаемого слоя, а обратная связь — изменением толщины срезаемого слоя, выступающей перед режущей кромкой частью нароста. В результате анализа такой системы установлена возможность существования двух режимов колебаний, граница между которыми определяется примерным соотношением $K_p K_{ЭУС} = 1$.

В случае малой ширины срезаемого слоя и жесткой эквивалентной упругой системы, т. е. при указанном соотношении, меньшем единицы, возникают колебания малой амплитуды с частотой «срыва» нароста, возрастающей с ростом скорости резания. Они напоминают

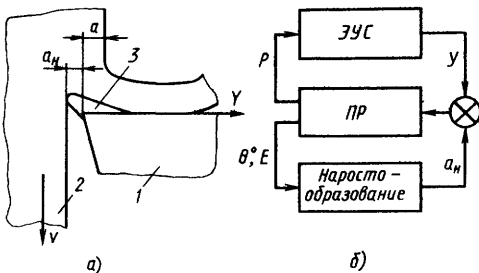


Рис. 8.20. Схема зоны резания (а) и динамической системы станка (б) при резании с неустойчивым наростом:

1— резец; 2— заготовка; 3— нарост

обычные вынужденные колебания. При большой ширине срезаемого слоя и малой жесткости, т. е. при соотношении, большем единицы, интенсивность колебаний значительно возрастет, достигая максимума при некоторой скорости резания, а затем убывая. Частота колебаний близка к собственной частоте колебаний упругой системы и остается постоянной при изменении скорости резания. Нарост срывается с этой же частотой. Скорость резания, при которой амплитуда колебаний максимальна, соответствует условию совпадения частоты естественного формирования нароста с собственной частотой системы.

При проектировании станков следует добиваться исключения условий появления автоколебаний второго типа.

Реакция устойчивой динамической системы станка при резании на внешние воздействия зависит от вида внешнего воздействия и характеристики системы. Представляет практический интерес оценка этой реакции по параметру, определяющему точность обработки. Следует различать воздействия, оказываемые на эквивалентную упругую систему и на процесс резания. Реакция замкнутой системы в ее простейшем эквивалентном виде одноконтурной системы определяется выражениями

$$y(i\omega) = y(i\omega)W_{\text{pas}}(i\omega)/(1 + W_{\text{pas}}(i\omega)); \quad (8.1)$$

$$y(i\omega) = f(i\omega)W_{\text{ЭУС}}(i\omega)/(1 + W_{\text{pas}}(i\omega)), \quad (8.2)$$

где $y(i\omega)$ — отклонения заданного положения инструмента перпендикулярно поверхности резания; $y(i\omega) = \Delta(i\omega)$ — заданное изменение толщины срезаемого слоя (припуска); $f(i\omega)$ — заданное внешнее воздействие на эквивалентную упругую систему; $W_{\text{ЭУС}}(i\omega)$ — характеристика эквивалентной упругой системы по смещению в направлении нормали к поверхности резания при заданном воздействии $f(i)$.

Статическое отклонение при воздействии на процесс резания реализуется при срезании постоянного припуска. Отклонение системы, определяющее статическую погрешность размера заготовки, обрабатываемой на токарном станке, определяется в соответствии с формулой (8.1) при $\omega = 0$: $y = \delta = \mp \Delta K_p K_{\text{ЭУС}} / (1 \mp \mp K_p K_{\text{ЭУС}})$, где δ — отклонение радиуса обрабатываемой заготовки; Δ — заданный постоянный припуск (настройка системы).

Знаки погрешности соответствуют плюсу или минусу статической характеристики эквивалентной упругой системы. При отрицательной характеристике размер детали будет меньше заданного. Кроме того, при равенстве нулю знаменателя (что соответствует условию статической неустойчивости — «подрыванию инструмента») отклонение возрастает теоретически до бесконечности.

Вынужденные колебания при обработке возникают при периодических внешних воздействиях. Следует различать внешние воздействия на процесс резания и на эквивалентную упругую систему. Распространена ошибка оценки вынужденных колебаний при периодическом изменении толщины срезаемого слоя, например при фрезеровании как обычных вынужденных колебаний упругой системы под действием периодически изменяющейся силы резания. В действительности закономерности этих колебаний иные. Как правило, амплитуды вынужденных колебаний в станках малы, и можно ограничиться линейным приближением.

При срезании припуска переменной толщины из выражения (8.1) с учетом правил умножения и деления комплексных величин следует: $A_y = A_{\Delta} A_{\text{раз}} / A_{\text{зн}}$, где A_y — амплитуда колебаний системы (амплитуда следа на поверхности заготовки при резании острым резцом); A_{Δ} — заданная амплитуда колебаний толщины срезаемого слоя при заданной частоте; $A_{\text{раз}}$ — амплитуда характеристики разомкнутой системы при заданной частоте колебаний; $A_{\text{зн}}$ — амплитуда частотной характеристики, стоящей в знаменателе выражений (8.1), (8.2), определяющих реакцию системы на внешние воздействия; берут по характеристике разомкнутой системы со смещением начала координат в точку «-1» на вещественной оси (рис. 8.21).

На рис. 8.21 показано построение, необходимое для определения вынужденных колебаний при резании. Амплитуда колебаний системы и следа на обработанной поверхности будет меньше заданной амплитуды колебаний толщины срезаемого слоя, если $A_{\text{раз}} < A_{\text{зн}}$. Для частот воздействия, соответствующих определенным точкам характеристики разомкнутой системы, это соотношение не превысит единицы при условии расположения точек справа от прямой Im_5 . Эта прямая ограничивает область устойчивости системы при резании по следу при коэффициенте перекрытия, равном единице.

Особенность такого вида вынужденных колебаний заключается в том, что путем повышения динамической жесткости и уменьшения ширины срезаемого слоя, т. е. повышения устойчивости системы (уменьшения радиусавектора $A_{\text{раз}}$), можно практически устранить вынужденные колебания, например при фрезеровании, даже в случае резания на резонансных режимах.

При анализе вынужденных колебаний, вызванных воздействием на эквивалентную упругую систему, необходимо расчетным путем или экспериментально определить амплитуду колебаний станка при вспомогательных движениях под воздействием $f(t)$ и при соответствующей частотной характеристике $W_{f_{\text{эуС}}}$. При неизвестных воздействиях, как показано в подразд. 8.3, оце-

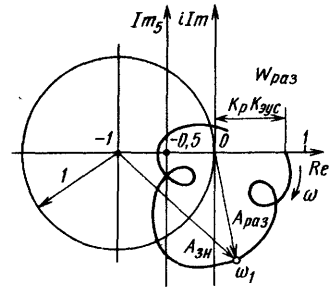


Рис. 8.21. Схема для определения параметров частотных характеристик для оценки вынужденных колебаний при внешних воздействиях на процесс резания и на эквивалентную упругую систему

нивают спектр колебаний при вспомогательных движениях. Резание изменяет амплитуды колебаний при вспомогательном ходе: $A_f = A_{в х} (1 / A_{\text{зн}})$, где A_f — амплитуда вынужденных колебаний системы при резании, т. е. волны на обработанной поверхности при резании острым резцом; $A_{в х}$ — амплитуда вынужденных колебаний при вспомогательном ходе на данной частоте воздействия (или спектральной составляющей).

Из приведенного выражения следует, что при резании амплитуды колебаний уменьшаются по сравнению с амплитудами колебаний при вспомогательном ходе на частотах, соответствующих точкам характеристики разомкнутой системы, лежащим за пределами единичной окружности с центром в точке «-1» вещественной оси. На частотах, лежащих внутри окружности, амплитуды колебаний при резании увеличиваются. Если характеристика разомкнутой системы пройдет через точку «-1», то амплитуда на этой частоте возрастет теоретически до бесконечности. Это соответствует границе устойчивости системы при резании «по чистому». Особенность этих вынужденных колебаний (на частотах в пределах единичной окружности) заключается в том, что путем повышения устойчивости системы, например уменьшая ширину срезаемого слоя, колебания нельзя устранить. Их можно уменьшить только до уровня колебаний при вспомогательном ходе.

В связи с этим, как указано в предыдущем подразделе, при проектировании и изготовлении станков необходимо принимать меры по устранению или уменьшению колебаний станка при вспомогательном ходе.

Отклонения системы при переходных процессах оцениваются главным образом при работе на автоматизированных станках при обработке сложных поверхностей с меняющимся сечением срезаемого слоя. Во многих случаях отклонения системы таковы, что необходимо

учитывать нелинейность характеристик. При решении конкретных задач следует учитывать изложенные в данной главе закономерности, характеризующие особенности динамической системы станка.

Список литературы

- 1 **Автоматизированный** расчет колебаний машин (В—К В Аугустайтис В—К В, Г—ПК Мозура Ю Ф Сливинскас, Э—ЭР Ставякене Л) Машиностроение 1988 104 с
- 2 **Бидерман В. Л.** Прикладная теория механических колебаний М Высшая школа, 1980 408 с
- 3 **Вибрации** в технике Справочник В 6 т Т 3 Колебания машин, конструкций и их элементов /Э Л Айрапетов, И А Биргер, В Л Вейц и др. Под ред Ф М Диментберга, К С Колесникова М Машиностроение, 1980 544 с
- 4 **Детали** и механизмы металлорежущих станков /Д И Решетов, В В Каминская, А С Лапидус и др Т 1 Под ред Д Н Решетова М Машиностроение, 1972 664 с
- 5 **Добрынин С. А., Фельдман М. С., Фирсов Г. И.** Методы автоматизированного исследования вибрации машин М Машиностроение, 1987 224 с
- 6 **Зорев Н. Н.** Вопросы механики процесса резания металлов М Машгиз, 1956, 368 с
- 7 **Каминская В. В.** Расчеты на виброустойчивость в станкостроении М Машиностроение, 1985 56 с
- 8 **Крагельский И. В., Гитис Н. В.** Фрикционные автоколебания М Наука, 1987 183 с
- 9 **Крон Г.** Исследование сложных систем по частям — диаоптика Пер с англ М Наука, 1972 544 с
- 10 **Кудинов В. А.** Динамика станков М Машиностроение, 1967 359 с
- 11 **Методика** расчета узлов металлорежущих станков на плавность медленных перемещений /В А Кудиков, Н А Кочин, М И Ерухимович и др М ОНТИ ЭНИМС, 1972 21 с
- 12 **Пуш В. Э.** Малые перемещения в станках М Машгиз, 1961 123 с
- 13 **Соколовский А. П.** Жесткость в технологии машиностроения М—Л Машгиз, 1946
- 14 **Трение, изнашивание и смазка** Справочник В 2-х кн Кн 1 /В В Алисин, А Я Алябьев, А М Архаров и др М Машиностроение, 1978 400 с
- 15 **Трение, изнашивание и смазка** Справочник В 2-х кн Под ред И В Крагельского и В В Алисина Кн 2/В В Алисин, Б М Асташевич, Э Д Браун и др М Машиностроение, 1979 358 с
- 16 **Филипов Д. Б.** Расчет плавности перемещения узлов подачи станков Экспресс информация Сер «Автоматические линии и металлорежущие станки» 1969 № 37 С 4—6

Надежность станков

9.1. Основные показатели надежности станков и их нормирование

Надежность является одной из основных характеристик качества металлорежущих станков и станочных систем, так же, как и многих других машин и технических устройств

Надежность характеризует свойство данного изделия сохранять требуемые показатели качества в течение всего периода эксплуатации

Для оборудования особое значение имеет обеспечение его технологической надежности, которая непосредственно связана с качеством в первую очередь с точностью, выпускаемой продукции Поэтому надежность станков следует рассматривать как надежность машины, когда оцениваются все виды отказов, и как надежность компонента технологической системы, когда учитываются лишь те отказы, которые связаны с качеством выпускаемой продукции

Основными источниками отказов станка и станочных комплексов являются собственно станок (его механика и гидросистемы), электрические — электронные системы и система управления (ЧПУ) Для механических узлов по сравнению с электротехническими и электронными устройствами характерно меньшее число отказов но большая продолжительность устранения их последствий

При проектировании станка необходимо так рассчитать и сконструировать станок и его основные узлы, чтобы они удовлетворяли установленным требованиям надежности, в первую очередь с точки зрения длительного сохранения показателей точности

Основные термины и определения в области надежности (ГОСТ 27 002—83) опираются на понятие работоспособности (см раздел 6.1)

Надежность — свойство объекта сохранять во времени свою работоспособность Это сложное свойство, которое в зависимости от требований к длительности работы объекта, условий его применения и эксплуатации характеризуется в основном безотказностью и долговечностью

Период времени, в течение которого работает данный объект (станок, механизм или узел), исчисляются либо в отработанных, либо в календарных часах (табл. 9.1)

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять свою работоспособность в течение некоторого времени (или наработки) В этом случае рассматривается такой период работы станка, когда не осуществляются мероприятия для поддержания его работоспособности (ремонт, смазывание, проверка состояния, регулировка и т. д.)

Долговечность — свойство объекта сохранять свою работоспособность в течение всего периода эксплуатации (до предельного состояния) при установленной системе технического обслуживания и ремонта При оценке долговечности учитываются те перерывы в работе станка, которые осуществляются в соответствии с системой планово-предупредительного ремонта (ППР) или при осуществлении ремонта по состоянию (ремонт на основе диагностирования фактического состояния станка)

Период эксплуатации станка связан в основном с экономическими факторами, которые обуславливают предельное состояние объекта Эксплуатация включает работу объекта (основной период), а также периоды простоев, транспортирования, хранения, ремонта и техни-

9.1. Оценка длительности работы объекта

| Время работы | Время работы до отказа (случайная величина) | Регламентированное время работы (детерминированная величина) |
|------------------------------------|---|--|
| В отработанных часах (наработка) | T — наработка до отказа | T_p — ресурс (установленный) |
| В календарных часах (время работы) | T — срок службы до отказа | $T_{сл}$ — срок службы (установленный) |

ческого обслуживания, переналадки, монтажа.

Предельное состояние — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.

Продолжительность эксплуатации станков связана как с их моральным (появление более эффективных моделей), так и с физическим (возрастание затрат на их эксплуатацию и ремонт) изнашиванием. Для современных станков средних размеров это обычно 8—10 лет эксплуатации и для более сложных и тяжелых станков 15—20 лет и выше. Конкретный срок службы до снятия с эксплуатации для каждого станка устанавливают на основании экономических расчетов. Эти расчеты опираются на сравнение затрат на изготовление станка Q_n и его эксплуатацию Q_3 с той прибылью Q_n , которую дает станок при его использовании (рис. 9.1). Суммарная эффективность станка Q зависит от времени t и имеет экстремум

$$Q(t) = Q_n(t) - [Q_n + Q_3(t)]. \quad (9.1)$$

Она связана с надежностью, так как с течением времени возрастают затраты на ремонт и техническое обслуживание станка из-за его физического изнашивания, а связанные с этим простои снижают положительный эффект от использования станка по назначению. Поэтому имеет место нелинейная зависимость Q_3 и Q_n от времени. Срок окупаемости нового станка $T_{ок}$ наступит при $Q_n + Q_3(t) = Q_n(t)$, и с этого момента станок начнет давать прибыль. После достижения максимума $Q(t)$ при $t = T_{max}$ эффективность станка начинает снижаться из-за возрастания эксплуатационных потерь, и когда прибыль и потери сравняются при $t = T_{пр}$, наступит предельное состояние станка.

Экономически целесообразная длительность эксплуатации станка T_3 находится в пределах $T_{max} \leq T_3 < T_{пр}$. Чем выше надежность станка, тем выше экономический эффект от его использования и тем продолжительнее период его рациональной эксплуатации.

Причины, определяющие надежность изделия, связаны со случайными явлениями, поэтому показатели, применяемые для оценки надежности, имеют вероятностную природу.

Основным показателем надежности является *вероятность безотказной работы* $P(t)$ — вероятность того, что в заданном интервале времени $t = T$ (или в пределах заданной наработки) отказ объекта не возникнет. Допустимая величина $P(t)$ характеризует степень опасности отказа, и поэтому чем выше ее значение, тем, при прочих равных условиях, машина будет работать более надежно. Спряженным показателем является *вероятность отказа* $F(t) = 1 - P(t)$. При использовании $P(t)$ или $F(t)$

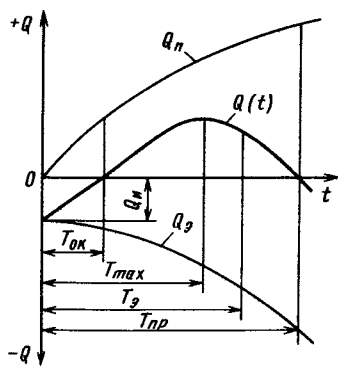


Рис. 9.1. Изменение экономической эффективности станка во времени

необходимо указывать период времени $t = T$, в течение которого рассматривается работа изделия, поскольку P и t связаны функциональной зависимостью

$$P(t) = \int_{t=T}^{\infty} f(t) dt, \quad (9.2)$$

где $f(t)$ — дифференциальный закон распределения (плотность вероятности) для срока службы (или наработки) изделия по данному выходному параметру.

На рис. 9.2, а показана схема формирования закона распределения наработки до отказа $f(t)$ при протекании процесса, изменяющего выходной параметр X во времени t . Достижение каждой реализацией $X_i(t)$ случайного процесса $X(t)$ своего предельно допустимого значения X_{max} приводит к отказу через соответствующий период времени T . Совокупность реализаций формирует массив T_1, T_2, \dots, T_n , который определяет гистограмму, а следовательно, и закон распределения $f(t)$. Этот закон, выраженный в интегральной форме $F(t)$, изображен на рис. 9.2, б.

Закон распределения наработки до отказа в дифференциальной $f(t)$ или интегральной $F(t)$, или $P(t)$ формах является полной характеристикой надежности данного объекта и позволяет получить все необходимые показатели.

Рассеяние времени работы до отказа связано с тем, что процессы, приводящие к изменению выходного параметра X (точности, КПД, производительности, несущей способности и т. д.), проявляются как случайные функции, поскольку на данный процесс действует большое число случайных факторов (режимы работы, вариации начального уровня качества и др.).

Закон $f(t)$ получают, как правило, статистически на основе испытаний или эксплуатационных наблюдений, хотя желательно полу-

чение этого закона на стадии проектирования (см. п. 9.4).

Наиболее распространенные теоретические законы распределения, которые рассматриваются в теории вероятностей и в математической статистике [2, 10], представлены в табл. 9.2.

При использовании этих законов для решения задач надежности следует иметь в виду, что аргумент t всегда положителен, поэтому при применении нормального закона распределения необходимо вводить нормирующий множитель и рассматривать усеченное распределение. Для отказов характерны асимметричные законы для положительных значений аргумента (Вейбулла, нормально-логарифмический и др.).

Экспоненциальный закон характерен для отказов, причина возникновения которых во внешних воздействиях, не связанных с состоянием объекта (внезапные отказы). Для характеристики возможности возникновения внезапных отказов применяют показатель интенсивности отказов λ — условная плотность возникновения отказов: $\lambda = f(t)/P(t)$. Значение λ — это вероятность возникновения отказа в единицу времени при условии, что до этого момента времени отказ не возник. Для внезапных отказов $\lambda = \text{const}$. Если экспериментально получена гистограмма распределения, то соответствующий теоретический закон подбирают с применением критериев согласия [10].

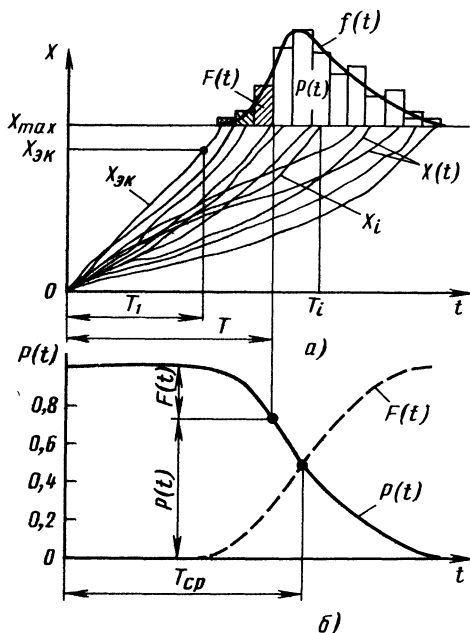
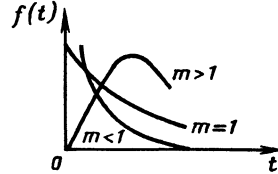
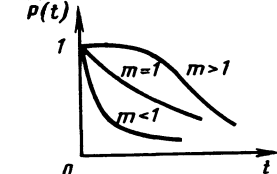
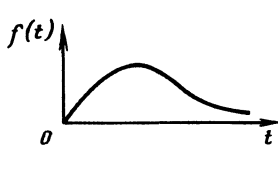
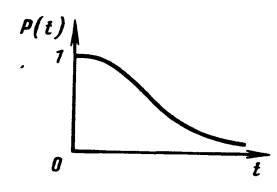
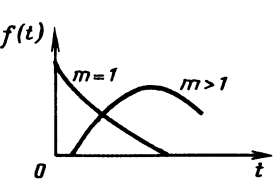
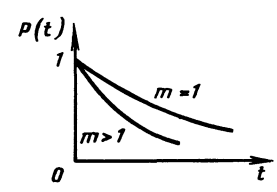
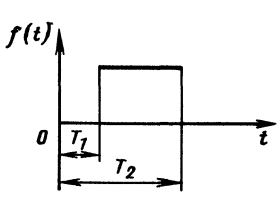
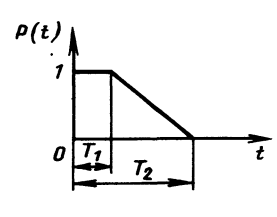


Рис. 9.2. Формирование закона распределения наработки (срока службы) до отказа

9.2. Законы распределения, применяемые для оценки надежности

| Закон | $f(t)$ | $P(t)$ |
|--|--------|--------|
| <p>Нормальный (Гаусса)</p> $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[t-M(t)]^2}{2\sigma^2}}$ $P(t) = \Phi\left[\frac{t-M(t)}{\sigma}\right]$ | | |
| <p>Логарифмически нормальный</p> $f(t) = \frac{1}{t\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \ln T_1)^2}{2\sigma_1^2}}$ $P(t) = \Phi\left(\frac{\ln t - \ln T_1}{\sigma_1}\right)$ | | |
| <p>Экспоненциальный</p> $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ $P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/T}$ | | |

| Закон | $f(t)$ | $P(t)$ |
|---|---|--|
| Вейбулла $f(t) = \frac{m t^{m-1}}{T_1} e^{-t^m/T_1}$ $P(t) = e^{-t^m/T_1}$ |  |  |
| Релея $f(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-t^2/2\sigma^2}$ $P(t) = e^{-t^2/2\sigma^2}$ |  |  |
| Гамма-распределение $f(t) = \frac{t^{m-1}}{T_1^m \Gamma(m)} e^{-t/T_1}$ $P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$ |  |  |
| Равномерное распределение при $T_1 \leq t \leq T_2$ $f(t) = \frac{1}{T_2 - T_1}$ $P(t) = \frac{T_2 - t}{T_2 - T_1}$ |  |  |

Обозначения: t — время (аргумент); $M(t)$ — математическое ожидание; σ — среднее квадратическое отклонение; Φ — функция Лапласа ($0,5 \leq \Phi \leq 1$); λ — интенсивность отказов; $\Gamma(m)$ гамма-функция [12]; T_1, T_2, σ_1, m — параметры законов распределения.

При известном законе распределения для заданного периода времени $t=T$ можно определить вероятность безотказной работы $P(t)$ [см. (9.2)] или, задаваясь значением $P(t)$, определить $t=T$. Численно значения $F(t)$ и $P(t)$ равны соответственно части площади под кривой распределения $f(t)$ до и после значения $t=T$ (см. рис. 9.2).

Показатель надежности выбирают одним из следующих способов [см. (9.2)].

1. При высоких требованиях к надежности изделия (станка или его элементов и механизмов) задают допустимое значение $P(t)=\gamma, \%$, и определяют время работы изделия $t=T_\gamma$, соответствующее данной регламентированной вероятности безотказной работы. Значение T_γ называют гамма-процентным ресурсом и по нему судят о большей или меньшей надежности изделия.

2. При обычных требованиях к надежности (когда отказ не приводит к тяжелым последствиям) задают ресурс изделия $t=T_p$, например, из условия необходимости проведения планового ремонта станка. В этом случае о надежности изделия судят непосредственно по значению $P(t)$.

Вероятность безотказной работы изделия $P(t)$ за соответствующий период его функционирования $t=T$ является основным показателем надежности. Однако при определенных условиях этот показатель не выполняет своих функций, и требуется привлечение следующих дополнительных показателей надежности.

1. Если в течение данного периода времени отказы, как правило, возникают (например, легко устранимые отказы, связанные с застреванием заготовки в транспортном лотке автоматической линии), т. е. $P(t) \rightarrow 0$, то харак-

9.3. Показатели безотказности работы объекта

| Наличие отказов за рассматриваемый промежуток времени | Значение $P(t)$ | Показатель безотказности |
|--|--|---|
| Как правило, имеют место Могут быть или нет (редкое событие) Недопустимы | $P(t) \rightarrow 0$ $0 < P(t) < 1$ $P(t) \rightarrow 1$ | ω — параметр потока отказов $P(t)$ — вероятность безотказной работы K_n — запас надежности |

характеристикой безотказности будет служить среднее число отказов $\Omega(t)$ в данном интервале времени от 0 до T (так называемая ведущая функция) или *параметр потока отказов*

$$\omega = d\Omega/dt = 1/T_0, \quad (9.3)$$

где T_0 — наработка на отказ (средняя продолжительность работы изделия между отказами)

Параметр потока отказов характеризует среднее число отказов изделия в единицу времени

2 Если за рассматриваемый промежуток времени отказы недопустимы, т. е. $P(t) \rightarrow 1$, то для оценки безотказности следует принять показатель запаса надежности K_n по отношению к заданному выходному параметру станка X . Для определения запаса надежности объекта в данный момент времени $t = T_1$ необходимо установить наибольшее (экстремальное) значение $X_{эк}$ выходного параметра X , которое он может принимать (см. рис. 9.2) при работе станка во всем диапазоне допустимых условий и режимов эксплуатации.

Если предельно допустимое значение параметра $X_{макс} > X_{эк}$, то запас надежности по данному параметру X

$$K_n = X_{макс}/X_{эк} > 1 \quad (9.4)$$

Запас надежности можно подсчитать так же, как отношение $X_{макс}$ к такому значению параметра X_γ , при котором с вероятностью γ параметр не выйдет за данные пределы, т. е.

$$K_n = X_{макс}/X_\gamma \quad (9.5)$$

Запас надежности по выходному параметру точности является одним из основных показателей при оценке надежности прецизионных станков. Указанные показатели безотказности сведены в табл. 9.3

Показатели долговечности связаны с оценкой ресурса станка по показателю точности с учетом затрат времени на восстановление утрачиваемой при эксплуатации работоспособности. Для характеристики этих затрат применяют коэффициент технического использования $K_{тн}$, который определяет долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно рассматриваемой продолжительности эксплуатации

$$K_{тн} = T_{раб}/(T_{раб} + T_{рем}), \quad (9.6)$$

где $T_{раб}$ и $T_{рем}$ — соответственно суммарная продолжительность работы станка за период его эксплуатации и суммарные простои в ремонте и техническом обслуживании

Если известны сроки службы (наработки) до ремонта или технического обслуживания всех основных узлов станка T_1, T_2, \dots, T_n , ч, и соответствующие трудоемкости их ремонта $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, ч, то значение $K_{тн}$ можно подсчитать на стадии проектирования

$$K_{тн} = 1 + \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{\tau_i} \quad (9.7)$$

Значения трудоемкости τ_i берут из нормативов по ремонту и техническому обслуживанию станков, а сроки службы T_i рассчитывают в зависимости от причин отказа (изнашивания (см. п. 9.3), усталостной прочности и др.)

Трудоемкость ремонта связана с понятием *ремонтоспособности*, которое заключается в приспособленности объекта к обнаружению, предупреждению и устранению отказов и повреждений путем проведения ремонтов и технического обслуживания. Ремонтоспособность является составной частью долговечности. Из формулы (9.7) следует, что основные методы повышения долговечности станка связаны с повышением сроков службы его деталей и узлов и сокращением трудоемкости их ремонта и технического обслуживания. Коэффициент готовности K_g можно определить по формуле (9.6), если учитывать все простои, кроме плановых, т. е. непредусмотренные отказы, возникшие в процессе работы оборудования. Значение K_g определяет вероятность того, что станок окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, для которого предусмотрено его использование по назначению.

Для оценки надежности можно применять достаточно широкую номенклатуру показателей, которая для различных изделий машиностроения предусмотрена ГОСТ 27 002—83. Для оценки надежности станков целесообразно применять показатели, указанные в табл. 9.4

Ресурс станка связан с потерей станком точности (ресурс станка по точности) и либо назначается (T_p), либо определяется при заданном значении $\gamma = P(t)$, %, — гамма-процентный ресурс (T_γ)

9.4. Номенклатура показателей для оценки надежности станков

| Показатель | Обозначение | Примечание |
|---|-------------|---|
| Вероятность безотказной работы | $P(t)$ | При установленном значении $P(t) = \gamma$, %, продолжительность работы $t = T_\gamma$ — гамма-процентный ресурс |
| Ресурс (установленный) | T_p | Определяется периодом работы до капитального (среднего) ремонта или назначения |
| Запас надежности по выходному параметру | K_n | Оценивает потенциальные возможности станка по сохранению работоспособности |
| Коэффициент технического использования | $K_{т.и}$ | Допустимые значения $K_{т.и}$ определены нормативами системы ремонта и технического обслуживания |
| Наработка на отказ (средняя) | T_o | Значение T_o определяет параметр потока отказов ω |
| Коэффициент готовности | K_r | Оценивают на основе эксплуатационных данных |

Ресурс по точности T_p определяют: а) на стадии проектирования расчетом станка на надежность (см. п. 9.4); б) для опытного образца станка на основе испытания и прогнозирования (см. п. 17.3); в) для станков, находящихся в эксплуатации, оценивают фактическое значение T_p с использованием средств контроля, диагностики и статистических методов [5, 10].

Запас надежности K_n сначала устанавливают или определяют для нового станка по выходным параметрам точности (см. п. 2.2); он показывает, насколько фактические параметры, определяющие точность станка, отличаются от заданных предельных значений, при которых наступит отказ по точности. При работе станка запас надежности уменьшается и при $K_n = 1$ наступает отказ по точности. Чем больше K_n , тем выше потенциальные возможности станка по сохранению своей работоспособности.

Запас надежности K_n определяется при программном методе испытания станков (см. п. 17.3), и его оценка не связана с длительностью работы станка, как это имеет место для всех других показателей надежности.

Коэффициент технического использования $K_{т.и}$ задает изготовитель; $K_{т.и}$ зависит от времени, необходимого для проведения профилактических, диагностических и ремонтных работ, предусмотренных системой ремонта и технического обслуживания, для поддержания оборудования в работоспособном состоянии.

Коэффициент технического использования может быть определен на стадии проектирования на основании расчета на долговечность узлов и элементов станка, а трудоемкость ремонта и технического обслуживания назначают в соответствии с нормативами системы ППР. При эксплуатации станка $K_{т.и}$ определяют по фактическим затратам времени на ремонт и техническое обслуживание.

Наработка на отказ T_o — средняя продолжительность работы станка между отказами характеризует способность к непрерывной работе станка, его комплектующих изделий и системы управления. Нормативы для T_o устанавливает изготовитель станка для различных категорий отказов в зависимости от сложности восстановления и последствий отказа (согласно принятой предприятием или отраслью классификации) и отдельно для механической части станка, его электрических и электронных устройств и системы управления. Фактические значения наработки на отказ определяют по статистическим данным, полученным при эксплуатации станка.

Если известны наработка на отказ T_o и среднее время восстановления T_b утраченной работоспособности станка в период его работы, то коэффициент готовности

$$K_r = T_o / (T_o + T_b). \quad (9.8)$$

Показатели надежности нормируют с учетом достигнутого уровня и выявленных тенденций повышения надежности отечественных и зарубежных аналогов, результатов исследований и опытно-конструкторских разработок, а также технико-экономических возможностей промышленности. Нормирование показателей надежности связано, в первую очередь, с анализом отказов станка и с оценкой тех последствий, к которым они приводят. Отказы, возникающие при работе станка, весьма разнообразны по своей природе и последствиям. В первую очередь их следует подразделять на постепенные (износные) и внезапные.

Постепенные отказы возникают в результате протекания того или иного процесса старения, ухудшающего начальные параметры изделия. Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени

9.5. Классы надежности

| Класс надежности | Допустимое значение $P(t)$ | Последствие отказа | Пример |
|------------------|----------------------------|---|--|
| 0 | $<0,9$ | Без значительных последствий | Элементы станка, не влияющие на качество и производительность |
| 1 | $\geq 0,9$ | Экономические потери | Станки нормальной и повышенной точности |
| 2 | $\geq 0,99$ | Значительный экономический ущерб | Прецизионные станки для финишной обработки Станки или станочные модули в автоматических станочных системах |
| 3 | $\geq 0,999$ | | |
| 4 | $\geq 0,9999$ | Катастрофические (изготовление ответственной детали с дефектом) | Станки или станочные модули в автоматических станочных системах для изготовления прецизионных деталей |
| 5 | 1 | | |

зависит от длительности предыдущей работы изделия. Чем дольше эксплуатировалось изделие, тем выше вероятность возникновения отказа, т.е. $F(t_2) > F(t_1)$, если $t_2 > t_1$. К этому виду относятся большинство отказов станка, поскольку они связаны с изнашиванием, коррозией, усталостью, короблением, ползучестью и другими процессами разрушения и деформирования материалов, из которых создан станок.

Внезапные отказы — это те, причина которых заключается в сочетании неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, преобладающих возможности изделия к их восприятию. Основным признаком внезапного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени не зависит от длительности предыдущей работы изделия.

Деление на постепенные и внезапные отказы определяется природой их возникновения, а не тем, установлена или нет причина отказа. Внезапность отказа при эксплуатации машины в силу скрытности процесса разрушения еще не означает, что отказ относится к категории внезапных. Критерием является зависимость $F(t)$ от времени предыдущей работы станка. Для станков внезапные отказы играют второстепенную роль и связаны обычно с недопустимыми методами эксплуатации. Деление на отказы функционирования и параметрические отказы см. п. 6.1.

При нормировании показателей надежности в первую очередь назначают допустимую вероятность безотказной работы $P(t)$ как для станка в целом, так и для основных его узлов и механизмов. Принятое значение $P(t)$ зависит от последствий отказа, от оценки того экономического (а в ряде случаев и социального) ущерба, который будет иметь место при выходе

станка из строя. При этом для одного изделия (станка или его узла) все элементы, определяющие его надежность, должны быть разбиты на категории по последствиям отказов. Например, для прецизионного станка, предназначенного для обработки ответственных деталей, к формообразующим узлам предъявляют высокие требования безотказности, в то время как к элементам, не связанным непосредственно с точностью обработки, таких требований нет. Следует, однако, иметь в виду, что станочные фирмы с позиций авторитета стремятся создавать надежные конструкции для всех элементов станка.

В табл. 9.5 приведена градация изделий на классы (категории) надежности в зависимости от последствий отказов. Для станка в целом эти значения относятся к его параметрической надежности по показателю точности, т.е. когда отказ означает обработку на станке детали с недопустимым значением любого из заданных показателей качества (точности размера и формы, волнистости, шероховатости или дефектности обработанной поверхности).

Ресурс по точности T_p , который определяет продолжительность работы станка до среднего или капитального ремонта, когда требуется восстановление координат станка и первоначальных траекторий перемещения формообразующих узлов, колеблется в достаточно широких пределах и зависит от конструкции и качества изготовления станка.

В табл. 9.6 приведены нормы надежности, разработанные в отечественном станкостроении (руководящий технический материал РТМ2 Н00—14—80 Нормы надежности) для значений ресурса по точности T_p и наработки на отказ T_0 . Назначаемые показатели должны быть не ниже указанных.

Для станков с ЧПУ $K_{тн} = 0,8, 0,9$ особенно

9.6. Нормы надежности универсальных станков

| Станки | Класс точности | Масса станка т | T_p , тыс ч | T_o , тыс ч |
|---|----------------|---------------------|---------------|---------------|
| Токарные, револьверные, фрезерные, сверлильные, расточные | Н, П | ≤ 10 | 46 | 1,0 |
| | | > 10 | 50 | 1,1 |
| | В, А, С | ≤ 10 | 46 | 1,1 |
| | | > 10 | 50 | 1,2 |
| Шлифовальные | П, В, А | ≤ 10 > 10 | 43 46 | 0,9 |

для станков, работающих в автоматизированных станочных системах. Типичным режимом для ГПС является 20 ч работы в автоматизированном режиме и 4 ч на техническое обслуживание ($K_{тн}=0,83$).

Значения $K_{тн}$ для универсальных станков с ЧПУ, не включенных в автоматические системы, рекомендуется иметь не ниже указанных (при двухсменной работе) для универсальных станков $K_{тн}=0,96$, для одношпиндельных автоматов $K_{тн}=0,97$, для многошпиндельных автоматов $K_{тн}=0,87$.

Для того чтобы обеспечить установленные показатели надежности, необходимо выявить основные причины, приводящие к потере станком работоспособности, знать их закономерности и применять методы расчета и проектирования, обеспечивающие требуемый уровень надежности станка и его компонентов.

9.2. Причины потери станком работоспособности

В процессе эксплуатации на станок действуют все виды энергии, что может привести к изменению параметров отдельных элементов, механизмов и станка в целом. Имеются следующие источники воздействий на станок:

действие энергии окружающей среды, включая человека, исполняющего функции оператора или ремонтника (энергия при ремонтных работах),

внутренние источники энергии, связанные как с рабочими процессами, протекающими в станке (процесс резания), так и с функционированием отдельных механизмов,

потенциальная энергия, которая накоплена в материалах и деталях станка в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливке, монтажные напряжения).

Различные виды энергии, действующие на станок, вызывают в его узлах и деталях процессы, изменяющие (снижающие) его начальные характеристики. Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими яв-

лениями и приводят к деформации, износу, поломке, коррозии и другим видам повреждений.

Повреждение — это отклонение контролируемых свойств материала или элемента изделия (включая геометрические размеры) от начальных, полученных при изготовлении объекта. Возникновение повреждений влечет за собой изменение выходных параметров изделий, что может привести к отказу.

На рис. 9.3 показана схема формирования показателей надежности сложной системы — станка, станочного модуля, станочной системы Энергия, проявляясь в механической, тепловой, химической, электромагнитной и других видах, определяет условия работы станка и его элементов и возникающие нагрузки, напряжения, температуры, скорости и ускорения, химические воздействия, давления, электромагнитные силы и др. Данные воздействия являются причиной возникновения в станке изнашивания, коррозии, деформации, ползучести и др., которые приводят к повреждениям отдельных элементов U_1, U_2, \dots, U_k . Эти повреждения вызывают изменения выходных параметров отдельных элементов, узлов и подсистем, что, в свою очередь, приводит к изменению во времени выходных параметров всей системы $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$. Опасность выхода этих параметров за установленные пределы и формирует показатели надежности всей системы (станка).

Процессы, возникающие в станке, различаются по скорости их протекания (см п. 6.1) и по характеру влияния на выходные параметры.

Обратимые процессы временно изменяют параметры деталей, узлов и всей системы в некоторых пределах без тенденций прогрессивного ухудшения. Наиболее характерные примеры таких процессов — упругие и тепловые деформации узлов и деталей.

Необратимые процессы приводят к ухудшению технических характеристик объекта с течением времени. Эти процессы называют процессами старения, и они являются основной причиной постепенной потери станком, как и любой машиной, работоспособности, тем определяют его надежность.

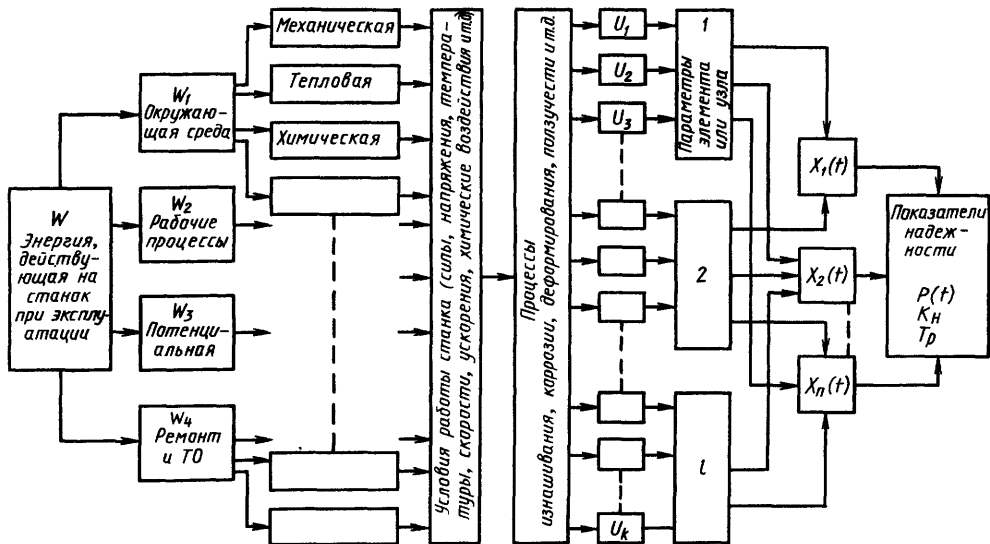


Рис. 9.3. Формирование показателей надежности сложной системы (станка)

В табл. 9.7 приведена классификация процессов старения по их внешнему проявлению (результату процесса), указаны основные разновидности процессов и даны их примеры. Деталь может подвергаться разрушению, деформироваться, а также могут изменяться свойства материала детали. Разрушение является наиболее опасным проявлением процессов старения и в станках не допускается.

Наиболее часто процессы старения протекают в поверхностных слоях. При этом поверхность детали может подвергаться температурным, химическим, механическим или иным воздействиям внешней среды. В результате могут происходить явления, связанные с потерей (отделением) материала с поверхности в результате коррозии, эрозии, кавитации и дру-

гих процессов, которые объединены одним термином разьедание. На поверхности могут протекать и такие процессы, как адгезия, абсорбция и др. Эти процессы называют наростом. В результате внешних воздействий возможно также изменение свойств поверхностного слоя.

Специфические процессы протекают при контакте двух сопряженных поверхностей, что наиболее характерно для механизмов и элементов станков. В этом случае в подвижных соединениях возникают такие процессы изнашивания, как истирание поверхности, усталость поверхностных слоев и ее пластическое деформирование (смятие).

Для подвижных и неподвижных соединений может произойти изменение условий контакта, что приводит, как правило, к изменению

9.7. Классификация процессов старения (необратимых процессов)

| Объект | Результат процесса (вид повреждения) | Разновидности процесса | Примеры |
|---------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Деталь (объемные явления) | Разрушение | Хрупкое разрушение, вязкое разрушение | Усталостное разрушение валов, зубьев зубчатых колес (недопустимые явления) |
| | Деформация | Пластическая деформация, ползучесть, коробление | Коробление станин и корпусных деталей |
| | Изменение свойств материала | Изменение структуры материала, механических свойств, химического состава, загрязнение жидкости | Изменение объема прецизионных деталей станка в связи с распадом мартенсита. Загрязнение смазочного материала |

| Объект | Результат процесса (вид повреждения) | Разновидности процесса | Примеры |
|--|---------------------------------------|---|--|
| Поверхность (поверхностные явления): детали | Разъедание | Коррозия, эрозия, кавитация, прогар, трещинообразование | Коррозия станка при транспортировании (недопустимо). Кавитация в гидронасосах |
| | Нарост | Налипание (адгезия, когезия, адсорбция, диффузия), нагар, облитерация (заращивание) | Наростообразование в режущем инструменте. Облитерация каналов гидросистем |
| пары | Изменение свойств поверхностного слоя | Изменение параметров шероховатости, твердости, напряженного состояния | Изменение напряженного состояния прецизионных деталей станка |
| | Износ | Изнашивание (истирание), усталость поверхностных слоев, смятие, перенос материала | Изнашивание направляющих, ходовых винтов, фрикционных муфт. Усталость подшипников и направляющих качения |
| | Изменение условий контакта | Изменение площади контакта, сплошности смазывания, коэффициента трения | Изменение параметров шероховатости и коэффициента трения в процессе приработки направляющих скольжения |

жесткости, коэффициента трения и других параметров сопряжения.

Для того чтобы оценить запас надежности детали, необходимо численно определить степень ее повреждения. Существуют два основных метода оценки степени повреждения.

При первом методе выбирают численные критерии для непосредственного измерения величины повреждения изделия, например, деформации, линейного или весового износа, глубины и размеров каверн при локальном разрушении поверхности и т. п. Однако во многих случаях, особенно при локальных видах повреждения, бывает трудно непосредственно оценить степень повреждения.

В этом случае применяют второй метод, когда о повреждениях судят по изменению выходных параметров или характеристик изделия. Например, при местных повреждениях тела детали или при возникновении пластических зон о степени повреждения судят по потере несущей способности (прочности); о локальных повреждениях золотника гидросистемы судят по падению давления и т. п. Показатели, которые применяют для определения степени повреждения материала изделия, приведены в табл. 9.8.

Законы старения, характеризующие измененные степени повреждения материала в функ-

ции времени, являются основой для решения задач надежности. Они позволяют прогнозировать ход процесса старения, оценивать возможные его реализации и выявлять наиболее существенные факторы, влияющие на интенсивность процесса. Типичным примером таких зависимостей являются законы изнашивания материалов, которые на основе раскрытия физической картины взаимодействия поверхностей дают методы расчета интенсивности процесса изнашивания или износа в функции времени и позволяют оценить факторы, влияющие на ход процесса [3, 11].

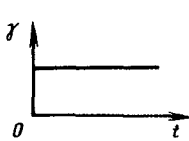
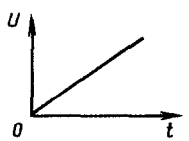

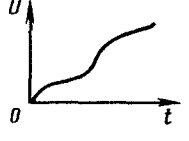


Для расчета надежности необходимо знать скорость протекания процесса повреждения $\gamma(t)$ или степень данного повреждения $U(t)$ в функции времени. Такие зависимости могут быть получены на основе рассмотрения физики процесса или экспериментальным путем. Знание аналитического выражения для закона старения и рассмотрение его как функции случайных аргументов — основа при расчете надежности.



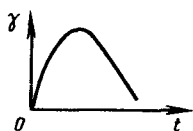





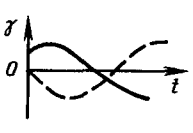
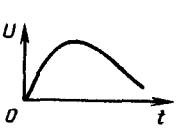
В табл. 9.9 представлены типовые закономерности протекания процессов старения во времени. Они относятся к одностадийным процессам, когда в течение рассматриваемого периода времени не происходит изменение физико-химической картины процесса.

9.8. Показатели степени повреждения материала изделия

| Повреждение | Метод оценки степени повреждения | | |
|----------------|---|---|--|
| | интегральный | дифференциальный | по выходным параметрам или характеристикам изделия |
| Глубинное | Ослабление сечения трещинами (фактическая площадь сечения). Суммарная деформация детали. Число дислокаций в опасном сечении | Размер трещин и их распределение. Эпюра деформаций. Распределение дислокаций по объему детали | Потеря несущей способности детали |
| Поверхностное: | | | |
| полное | Весовой износ. Средний линейный износ. Объемный показатель коррозии | Линейный износ поверхности. Глубинный показатель коррозии. Изменение твердости по поверхности | Изменение нагрузок, закона перемещения ведомого звена, температуры, коэффициента трения, утечек, плотности, давления, вибраций |
| локальное | Суммарная площадь повреждения. Число дефектов на единицу площади. Размеры наибольшего повреждения | Законы распределения параметров, характеризующих отдельные повреждения. Плотность повреждения на отдельных участках поверхности | |

9.9. Типовые закономерности протекания во времени процессов старения

| Процессы (по γ -характеристике) | $\gamma(t) = \frac{dU}{dt}$ | $U(t)$ | Процесс |
|--|---|---|--|
| Стационарные: | | | |
| постоянные |  |  | Изнашивание |
| псевдостационарные |  |  | Изнашивание при переменных режимах |
| Монотонные: | | | |
| возрастающие |  |  | Изнашивание при засорении поверхностей |

| Процессы (по γ -характеристике) | $\gamma(t) = \frac{dU}{dt}$ | $U(t)$ | Процесс |
|--|---|---|--|
| убывающие |  |  | Изнашивание в период приработки Распад мартенсита |
| Экстремальные | | | |
| с максимумом |  |  | Коробление Коррозия |
| с минимумом |  |  | Изнашивание инструмента Коррозия Ползучесть |
| С запаздыванием |  |  | Усталость Хрупкое разрушение |
| Знакопеременные |  |  | Изменение механических характеристик |

Для станков основной причиной потери работоспособности является износ. Изнашивание характерно для таких ответственных сопряжений станков, как направляющие скольжения, ходовые винты и гайки, кулачковые механизмы, фрикционные муфты и др.

В станках для большинства сопряжений можно применять следующую закономерность для линейного износа U и скорости изнашивания γ материалов

$$U = kp^m vt, \quad \gamma = U/t = kp^m v, \quad (9.9)$$

где k — коэффициент износа, p — давление на поверхности трения, Па, v — скорость относительного скольжения, м/с, t — время работы

сопряжения, m — коэффициент, $m=1$ для абразивного и усталостного видов изнашивания.

Применяют также показатель интенсивности изнашивания j , определяемый как отношение износа U к пути трения s , который прошла одна пара сопряжения по отношению к другой за рассматриваемый промежуток времени

$$j = U/s = kp^m \quad (9.10)$$

Интенсивность изнашивания является безразмерной величиной и связана со скоростью изнашивания соотношением $\gamma = jv$.

Выражение (9.9) характеризует установившийся процесс изнашивания после окончания периода приработки. В период приработки,

9.10. Показатели изнашивания материалов тихоходных пар трения

| Номер пары | Сочетание материалов пары | Первая деталь | | Вторая деталь | | $\rho_{\text{кр}}$, МПа | Смазочный материал |
|------------|---------------------------|----------------------|-------|----------------------|-------|--------------------------|--------------------|
| | | k_1 | m_1 | k_2 | m_2 | | |
| 1 | а—б | $3,1 \cdot 10^{-13}$ | 1,97 | $3 \cdot 10^{-13}$ | 1,66 | 20 | А |
| 2 | б—г | $3,1 \cdot 10^{-14}$ | 1,85 | $2,7 \cdot 10^{-13}$ | 1,52 | 40 | А |
| 3 | в—б* | $1,1 \cdot 10^{-15}$ | 2,38 | $3,6 \cdot 10^{-15}$ | 2,26 | 40 | А |
| 4 | в—б | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 1,58 | $2,6 \cdot 10^{-12}$ | 1,23 | 40 | А |
| 5 | а—г | 10^{-13} | 1,76 | $9,5 \cdot 10^{-12}$ | 1 | 40 | А |
| 6 | а—д | $2,2 \cdot 10^{-14}$ | 3,15 | $1,6 \cdot 10^{-13}$ | 2,71 | 5 | А |
| 7 | г—д | $3,3 \cdot 10^{-12}$ | 1,5 | $2,1 \cdot 10^{-11}$ | 1,42 | 7,5 | А |
| 8 | б—е | $4,6 \cdot 10^{-12}$ | 1,58 | $1,3 \cdot 10^{-13}$ | 1,77 | 15 | А |
| 9 | б*—е | $1,9 \cdot 10^{-12}$ | 1,47 | $1,6 \cdot 10^{-13}$ | 1,42 | 15 | А |
| 10 | б—ж | $2,9 \cdot 10^{-13}$ | 1,26 | $5,5 \cdot 10^{-11}$ | 1,26 | 7,5 | А |
| 11 | а—б | $5,3 \cdot 10^{-15}$ | 2,29 | $2 \cdot 10^{-13}$ | 1,5 | 40 | Б |
| 12 | а—б | $8,3 \cdot 10^{-16}$ | 3,02 | $3,6 \cdot 10^{-16}$ | 3,1 | 20 | В |
| 13 | б—г | $5,2 \cdot 10^{-16}$ | 2,5 | $8,3 \cdot 10^{-15}$ | 2,14 | 40 | В |

Обозначения: а — сталь 45, НРС, 38—43; б — сталь 20Х (цементирована или нитроцементирована*), НРС, 60—62; в — сталь ШХ15, НРС, 60—62; г — сталь 38ХМЮА (азотиrowана), НРС, 60; д — чугуи СЧ20; е — БрОФ10-1; ж — БрАЖ9-4; А — солидол ГОСТ 4366—76; Б — солидол и 10 % меди; В — ЦИАТИМ-201 ГОСТ 6267—74.

когда происходит монотонное убывание скорости изнашивания, зависимость $U(t)$ может быть аппроксимирована либо параболой, либо кривой вида

$$U = A(1 - e^{-\alpha t}),$$

где A и α — коэффициенты, характеризующие соответственно износ за период приработки и интенсивность приработки.

Период приработки стремится свести к минимуму за счет точного изготовления сопряженных поверхностей и применения метода обкатки новых изделий (технологический прогон станка).

При возрастании интенсивности изнашивания во времени, например, вследствие засорения поверхностей трения зависимость $U(t)$ может иметь вид

$$U = A(e^{\alpha t} - 1).$$

Данный процесс изнашивания характеризует, как правило, недопустимые условия эксплуатации станка или неэффективные методы защиты от загрязнения ответственных сопряжений. Поэтому основной формулой для расчета на износ является зависимость (9.9). В ней выделены силовые и кинематические факторы (ρ, v), которые связаны с конструкцией станка, а коэффициент износа k зависит от материалов и условий трения сопряженных поверхностей. Этот коэффициент, как правило, изменяется в широких пределах и проявляется как случайная величина. Теория изнашивания материалов в настоящее время позволяет лишь ориентировочно и то не для всех случаев, определить скорость изнашивания.

Применительно к сопряжениям станков мож-

но использовать следующие источники информации для оценки коэффициента износа k .

1. Иметь банк данных по скростям изнашивания аналогичных сопряжений у эксплуатируемых станков. Для этого необходимо проводить регулярные наблюдения и измерения в процессе эксплуатации и ремонта станков и обрабатывать полученную информацию по специальной программе.

2. Проводить сравнительные расчеты, определяя, во сколько раз повысится износостойкость данной пары по отношению к прототипу или при сравнении нескольких вариантов конструкции.

3. Проводить нормирование скорости или интенсивности изнашивания, назначая определенный класс износостойкости, и ставить условие перед технологами и эксплуатационниками о необходимости подбора таких пар трения и создания таких условий эксплуатации, чтобы скорость их изнашивания находилась в установленных пределах.

4. Проводить испытание образцов сопряженных материалов, используя эти данные для расчета сопряжений.

Для сопряжений, работающих в режиме граничной смазки при малых скоростях скольжения (до 0,1 м/с), когда температура на поверхности трения не влияет на процесс изнашивания, значения коэффициентов износа k_1 и k_2 для сопряженных деталей приведены в табл. 9.10. В таблице указаны также показатель степени m [см. формулу (9.9)] и критические значения давления $\rho_{\text{кр}}$, при превышении которых закономерности изнашивания изменяются.

Приведенные значения коэффициентов k и

9.11. Классы износостойкости материалов по скорости их изнашивания

| Класс | γ , мкм/ч | Пример |
|-------|---------------------------|--|
| 0 | $\leq 5 \cdot 10^{-5}$ | Шпиндельные подшипники скольжения, гидрораспределители |
| 1 | $\leq 10^{-4}$ | |
| 2 | $\leq 2 \cdot 10^{-4}$ | Зубчатые передачи, кулачковые механизмы, ходовые винты и гайки качения |
| 3 | $\leq 4 \cdot 10^{-4}$ | |
| 4 | $\leq 8 \cdot 10^{-4}$ | Направляющие станков, ходовые винты скольжения |
| 5 | $\leq 1,6 \cdot 10^{-3}$ | |
| 6 | $\leq 3,2 \cdot 10^{-3}$ | Фрикционные муфты |
| 7 | $\leq 6,4 \cdot 10^{-3}$ | |
| 8 | $\leq 1,25 \cdot 10^{-2}$ | Режущий инструмент. В станках не допускается |
| 9 | $> 1,25 \cdot 10^{-2}$ | |

m являются средними и соответствуют размерностям v (м·с⁻¹) и p (даН·см⁻²). Рассчитанная по формуле (9.9) скорость изнашивания должна удовлетворять требованиям надежности.

При прогнозировании надежности и при предварительных расчетах износостойкости сопряжений целесообразно назначить класс износостойкости с последующим уточнением допустимых значений γ . Классы износостойкости по скорости изнашивания и примеры сопряжений станков приведены в табл. 9.11.

Знание закономерностей изнашивания является предпосылкой для расчета на износ сопряжений и механизмов станков на стадии проектирования и последующей оценки их надежности.

9.3. Расчеты на износ сопряжений станков

Основной характеристикой изнашивания детали является *линейный износ* U , который измеряется в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. Вследствие ряда причин (различные значения давлений и скоростей относительного скольжения на поверхности трения, неодинаковое попадание абразивов и т. д.) изнашивание детали может быть неравномерным.

Для полной характеристики износа детали необходимо знать его распределение по поверхности трения $U(x, y)$, т. е. форму изношенной поверхности (x и y — координаты поверхности трения).

В результате изнашивания сопряженных деталей происходит изменение их относительного положения, которое называют *износом сопряжения* U_{1-2} . Величину U_{1-2} измеряют геометрическими параметрами (одним или несколь-

кими), определяющими изменение относительного положения сопряженных деталей пары трения, происшедшее в результате износа их поверхностей [8].

Износ сопряжения является характеристикой, которая непосредственно связана с потерей работоспособности станком или механизмом. При решении задач, связанных с определением износа деталей, необходимо учитывать, что конструктивная схема сопряжения оказывает существенное влияние на распределение износа по поверхности трения и на характер взаимодействия изношенных поверхностей. Во многих случаях влияние конструктивных факторов на форму изношенной поверхности проявляется в большей степени, чем влияние закономерностей изнашивания материалов. При проектировании станков конструктор должен располагать методами расчета на износ различных сопряжений, чтобы обосновать выбор той или иной конструкции.

В табл. 9.12 приведена классификация сопряжений по условиям их изнашивания. В зависимости от характера возможного сближения деталей при износе их поверхностей все сопряжения подразделяются на два типа. У сопряжений типа I имеются дополнительные неизнашивающиеся или малознашивающиеся направляющие, которые обеспечивают сближение деталей при износе только в заданном направлении $X-X$. В сопряжениях типа II происходит самоустановка изношенных деталей, и их взаимное положение зависит от формы изношенной поверхности. В таких сопряжениях износ обычно более сильно сказывается на функциональных свойствах пары.

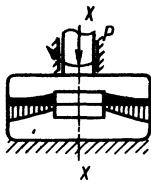
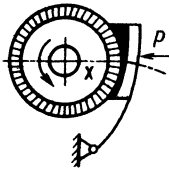
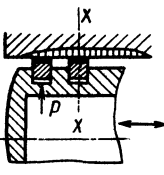
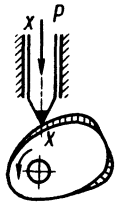
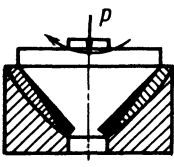
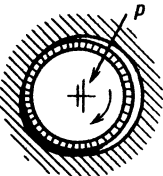
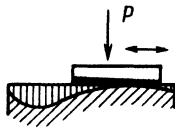
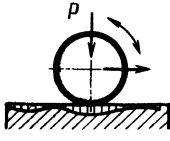
Кроме того, в классификации все сопряжения разделены на четыре группы в зависимости от постоянства условий трения и изнашивания для точек сопряженных поверхностей, расположенных на одной траектории.

У сопряжений первой группы точки, расположенные на одной траектории, имеют одинаковые условия изнашивания для каждого из тел. Поэтому их износ будет одинаков, и для определения формы изношенной поверхности достаточно рассмотреть осевое сечение.

Ко второй группе относятся сопряжения, у которых сохраняются постоянными условия изнашивания для всех точек, лежащих на данной траектории, для одного тела. Поэтому только одна поверхность имеет условия для равномерного изнашивания в данном сечении.

У сопряжений третьей и четвертой групп условия изнашивания не сохраняются постоянными для всех точек обоих тел, и здесь имеются большие возможности для возникновения неравномерного изнашивания поверхностей. К третьей группе отнесены сопряжения с низшими парами, к четвертой — с высшими.

9.12. Классификация сопряжений по условиям их изнашивания

| Тип | Группа | | | |
|-----|---|---|---|---|
| | Первая | Вторая | Третья | Четвертая |
| I |  |  |  |  |
| II |  |  |  |  |

Методы расчета на износ сопряжений различных типов позволяют определить форму изношенной поверхности и износ сопряжений в зависимости от применяемых материалов, условий изнашивания и режимов работы узла трения [8]. Методика расчета зависит от принадлежности сопряжений к данному типу и группе согласно классификации.

В табл. 9.13 приведены расчетные схемы и формулы для определения параметров изношенного сопряжения деталей 1 и 2: скорости изнашивания сопряжения $v_{1-2} = U_{1-2}/t$ в направлении действия силы, эпюры давлений p на поверхности трения и износа U_1 и U_2 сопряженных поверхностей при линейных законах изнашивания [в формуле (9.9) $m=1$]. Конические и дисковые (при $\alpha=0$) поверхности (схема а) используют в направляющих кругового движения, подпятниках скольжения, фрикционных муфтах и тормозах. Шаровые поверхности (схема б) применяют для шарниров и звеньев различных механизмов. Эти сопряжения относятся к первой группе классификации (см. табл. 9.12); цилиндрические поверхности (схема в) относятся ко второй группе сопряжений, и их используют в тормозных устройствах, подшипниках скольжения и опорах шпиндельных блоков (при $\alpha_0=90^\circ$).

Формулы показывают, что износ сопряжения зависит от износостойкости материалов пары (k_1 и k_2), режимов работы сопряжения (P , n), его размеров и конструктивных особенностей. Эпюра давлений p является функцией

законов изнашивания. Давления распределены по поверхности трения неравномерно.

Наибольшее влияние износа на потерю работоспособности оказывают сопряжения, для которых характерно неравномерное распределение износа по поверхности трения. К ним относятся сопряжения третьей-четвертой групп, среди которых для станков главную роль играют направляющие скольжения.

На рис. 9.4 приведена расчетная схема для определения износа направляющих скольжения по длине (форма изношенной поверхности) при условии, что износ материалов определяют по зависимости (9.9) при $m=1$, уравнение

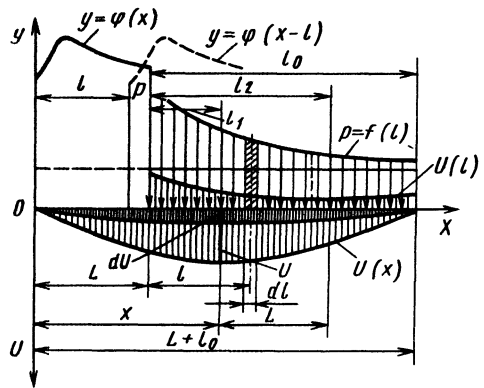
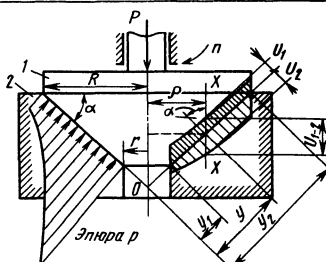
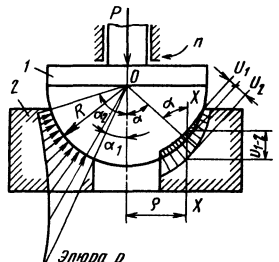
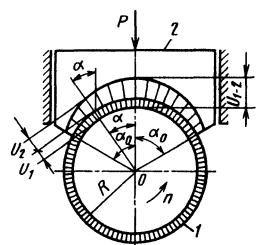


Рис. 9.4. Расчетная схема для определения износа направляющих скольжения

9.13. Параметры изношенных сопряжений

| Расчетная схема | Расчетные формулы для определения параметров | |
|--|--|--|
| | Скорость изнашивания сопряжения и давление | Износ поверхностей трения |
|  | $\gamma_{1-2} = \frac{(k_1 + k_2)Pn}{(R-r)\cos\alpha};$ $p = \frac{P}{2\pi(R-r)\cos\alpha} \frac{1}{y},$ <p>при $\alpha=0$ $y=\rho$ — дисковые поверхности</p> | $U_1 = k_1 \frac{Pn}{R-r} t;$ $U_2 = k_2 \frac{Pn}{R-r} t$ |
|  | $\gamma_{1-2} = \frac{4(k_1 + k_2)Pn}{R(\sin 2\alpha_2 + 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1 + 2\alpha_1)};$ $p = \frac{2P \operatorname{tg} \alpha}{\pi R^2(\sin 2\alpha_2 + 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1 - 2\alpha_1)}$ | $U_1 = \gamma_{1-2} \frac{k_1 \cos \alpha}{k_1 + k_2} t;$ $U_2 = \gamma_{1-2} \frac{k_2 \cos \alpha}{k_1 + k_2} t$ |
|  | $\gamma_{1-2} = \frac{2\pi k_2 P n}{l_0(0,5\sin 2\alpha_0 + \alpha_0 + a)};$ $p = \frac{\gamma_{1-2} \cos \alpha - \gamma_1}{k_2 v},$ <p>где l_0 — ширина цилиндра</p> | $U_1 = \gamma_{1-2} a t;$ $U_2 = \gamma_{1-2} (\cos \alpha - a) t,$ <p>где $a = \frac{k_1 \sin \alpha_0}{k_1 \alpha_0 + \pi k_2}$</p> |

эпюры давлений $p=f(l)$ известно, а ползун (суппорт) совершает по направляющим перемещения различной длины, которые характеризуются законом распределения $\varphi(x)$.

При расчете приняты следующие обозначения (рис. 9.4): $U(x)$ — искомая величина линейного износа направляющих станины на длине x при $0 \leq x \leq (L+l_0)$; $U(l)$ — искомая величина линейного износа направляющих стола (суппорта) по длине l при $0 \leq l \leq l_0$; L — максимальный ход стола; $p=f(l)$ — уравнение эпюры давлений; $y=\varphi(x)$ — кривая распределения общего пути трения (кривая условно отнесена к левой точке стола); s — путь трения, который проходит каждая точка направляющих стола за рассматриваемый промежуток времени; k — коэффициент износа (k_1 — стола; k_2 — станины).

Форма изношенной поверхности направляющих определяется в этом случае по формулам [8]:

для стола

$$U(l) = k_1 s f(l); \quad (9.11)$$

для станины

$$U(x) = k_2 s \int_{l_1}^{l_2} \varphi(x-l) f(l) dl. \quad (9.12)$$

Формула (9.12) является общей для различных случаев. При этом пределы интегрирования определяются в зависимости от того, какой участок эпюры давлений воздействует на данную точку станины с координатой x

9.14. Пределы интегрирования при расчете направляющих по формуле (9.12)

| L/l_0 | Участок | Пределы интегрирования | |
|---------|---|-------------------------|-----------------------|
| | | l_1 | l_2 |
| >1 | $0 \leq x \leq l_0$ $l_0 \leq x \leq L$ $L \leq x \leq l_0 + L$ | 0 0 $x - L$ | x l_0 l_0 |
| <1 | $0 \leq x \leq L$ $L \leq x \leq l_0$ $l \leq x \leq l_0 + L$ | 0 $x - L$ $x - L$ | x x l_0 |

(табл. 9.14). Расчетные формулы для определения $U(x)$ направляющих скольжения приведены во втором томе справочника, гл. 4.

В формуле (9.12) учтено влияние основных факторов на форму изношенной поверхности направляющих: k отражает износостойкость материалов и условия изнашивания, s — интенсивность работы станка во времени, так как $s = vt$; $p = f(l)$ отражает конструкцию суппорта (стола), расположение сил (характер эпюры давлений) и величину действующих сил; $\varphi(x)$ характеризует технологические процессы (размеры обрабатываемых деталей), осуществляемые на станке. Поэтому в каждом конкретном случае можно указать наиболее эффективные пути для уменьшения износа и получения более равномерной формы изношенной поверхности, которая непосредственно связана с точностью работы станка, виброустойчивостью конструкции и возможностью компенсации износа.

При расчете надежности станка необходимо устанавливать предельно допустимые износы U_{\max} , до которых можно допускать износ отдельных деталей и сопряжений.

Можно выделить три группы критериев, определяющих значение предельно допустимого износа.

1. В результате износа до величины U_{\max} происходит отказ функционирования станка (поломка детали, заклинивание механизма или невыполнение им своих функций); для станков это редко встречающийся случай.

2. Износ при значениях $U > U_{\max}$ приводит к попаданию станка и узлов в зону интенсивного выхода из строя (возникают удары, происходит интенсивное изнашивание поверхностей, вибрации, повышается температура узлов и т. п.).

3. В результате износа на величину $U > U_{\max}$ параметры станка выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (ухудшается качество продукции, понижается производительность, падает КПД, увеличивается шум).

Критерии предельного износа в одних случаях связаны только с работой данного сопряжения или детали, в других — с работой нескольких деталей механизма или узла.

Для станка в целом наиболее характерен отказ, связанный с критериями третьей группы и в первую очередь с выходом параметров точности за допустимые пределы. В этом случае необходимо установить зависимость между износом U отдельных сопряжений и изменением выходных параметров X станка.

Для станков наиболее ответственными сопряжениями, износ которых непосредственно влияет на точность обработки, являются направляющие, для которых значение U_{\max} должно быть регламентировано.

При износе направляющих продольно-фрезерных и продольно-строгальных станков наибольший износ U_{\max} связан с возникающей погрешностью обработки поверхности $X = \Delta$ зависимостью

$$U_{\max} = \Delta(L_0/L)^2 \cos \alpha, \quad (9.13)$$

где L_0 — длина направляющих; L — длина обрабатываемой на станке поверхности; α — угол наклона V-образных направляющих.

Для токарных станков, для которых наиболее характерен неравномерный износ направляющих скольжения по длине, предельно допустимый износ U_{\max} зависит от требований к точности обрабатываемых деталей (Δd — предельное отклонение диаметрального размера обрабатываемой поверхности, мкм); длины обтачивания L , мм, а также от конструкции суппортной группы. Для традиционных конструкций суппортов токарных станков ориентировочные значения U_{\max} для наиболее изнашивающейся направляющей указаны в табл. 9.15.

В общем случае следует иметь в виду, что между выходным параметром X станка или его узла и степенью повреждения (например, износом) U имеется обычно детерминированная зависимость $X = f(U)$. Наиболее характерна линейная зависимость между X и U . Например, износ направляющих поверхностей механизмов линейно связан с точностью перемещений

9.15. Предельно допустимый износ направляющих токарных станков U_{\max} , мкм

| Δd , мкм | Длина обтачивания L , мм | | | | | |
|------------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 25 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| 10 | 80 | 40 | 20 | 10 | 7 | 5 |
| 20 | 120 | 60 | 30 | 15 | 10 | 7 |
| 30 | 200 | 100 | 50 | 30 | 20 | 10 |
| 60 | | 200 | 100 | 50 | 30 | 20 |
| 120 | | | 200 | 100 | 60 | 50 |
| 200 | | | | 300 | 150 | 80 |

ведомого звена $X = kU$. Когда в качестве выходного параметра приняты значения динамических нагрузок, характерна степенная зависимость между X и U . Например, износ зубчатых передач связан степенной зависимостью с динамическими нагрузками в приводе: $X = kU^2$. Получение таких соотношений базируется на анализе работы данных механизмов с учетом их функционального назначения.

Для многозвенных механизмов, предназначенных для перемещения рабочих органов станка (суппортов, ползунов, механизмов загрузки заготовок или инструмента и др.), типичен случай, когда на отклонение Δ ведомого звена от заданного положения влияет износ всех сопряжений механизма. В этом случае при линейной зависимости износа от времени

$$\Delta = t \sum_{k=1}^n \gamma_k i_k - e, \quad (9.14)$$

где t — продолжительность работы механизма; γ_k — скорость изнашивания каждого из k звеньев; i_k — передаточное отношение между k -м и ведомым звеном (отношение погрешности перемещения ведомого звена к величине износа данного звена, приведенное к искажению заданного закона движения); e — величина возможной компенсации износа (если она предусмотрена конструкцией).

Предельное состояние механизма определяется допустимым значением Δ_{\max} . Ресурс механизма $t = T_p$ может быть подсчитан по формуле (9.14) при $\Delta = \Delta_{\max}$, при этом износ каждого

звена $U_k = t\gamma_k$. Характерными парами трения данных механизмов являются шарниры, кулачковые и кулисные пары, сопряжения винт—гайка, направляющие скольжения и качения.

9.4. Модели параметрических отказов и прогнозирование надежности

Оценка надежности станка на стадии проектирования базируется на разработке физико-вероятностных моделей надежности, которые описывают процесс формирования закона распределения отказов, и поэтому вероятностные характеристики станка могут быть спрогнозированы до наступления отказов. Основным этапом создания такой модели является рассмотрение физической природы изменения начальных параметров станка под влиянием различных процессов старения с учетом того, что в закономерностях, их описывающих, как аргументы, так и те ограничения, которые на них накладывают внешние и внутренние факторы, являются случайными величинами.

На рис. 9.5 приведена схема физико-вероятностной модели параметрической модели надежности станка. Закон надежности, например, в виде плотности вероятности наработки до отказа $f(t)$ формируется в результате протекания случайного процесса изменения выходных параметров X станка во времени t (деградация выходных параметров). При этом данный

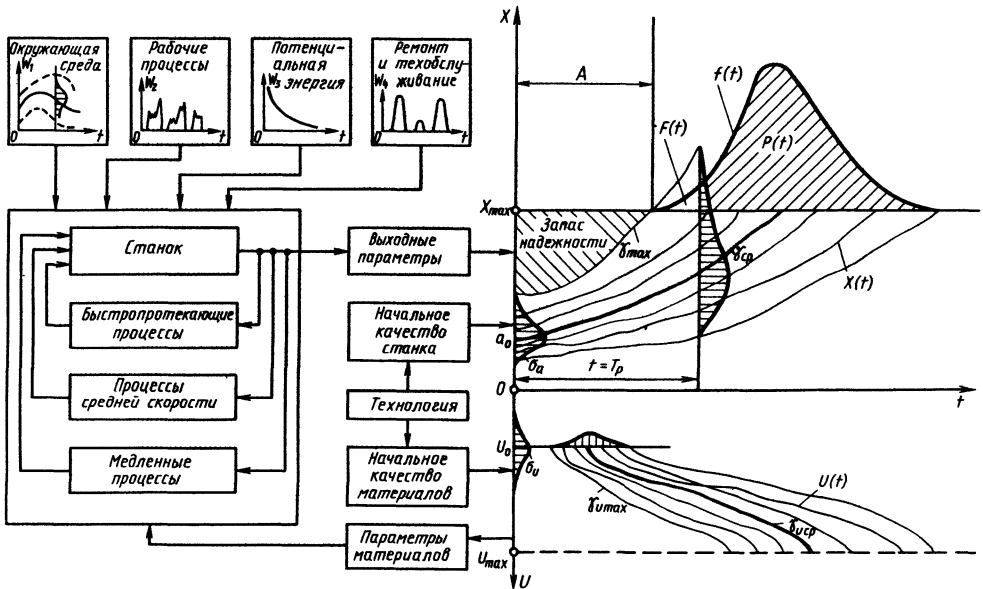


Рис. 9.5. Физико-вероятностная модель параметрической надежности станка: А — зона безотказности

процесс рассматривается не как статистическая закономерность, а как результат изменения динамического состояния станка под воздействием процессов старения.

Первопричиной всех изменений, происходящих в станке, является энергия, действующая на него в процессе эксплуатации (см. также рис. 9.2).

Процесс старения материалов, прежде всего износ, который описывается законом $U(t)$ (см. табл. 9.9), во взаимодействии с другими процессами различной скорости и интенсивности изменяет состояние станка.

Деградация параметров станка рассматривается в общем виде, как процесс автоматического регулирования с обратными связями. Например, изнашивание механизмов не только снижает точность работы станка, но может вызвать на рост динамических нагрузок, которые интенсифицируют этот процесс.

В результате указанных явлений происходит постепенное изменение выходных параметров станка во времени $X(t)$ и формирование закона надежности $f(t)$. Запас надежности станка падает, и вероятность параметрического отказа возрастает. При этом существует зона A безотказной работы, в которой начальные параметры станка гарантированно находятся в допустимых пределах.

Данная общая модель параметрической надежности может реализоваться при различных законах старения и соответствующих закономерностях изменения выходных параметров во времени. Наиболее распространенным является случай, когда изменение параметра X во времени t происходит по линейному закону:

$$X = a + \gamma_x t, \quad (9.15)$$

где a — параметр, характеризующий начальную точность изготовления станка; γ_x — скорость изменения параметра в результате процесса старения. Параметры a и γ_x являются случайными величинами и подчиняются некоторым законам распределения.

Срок службы (наработка) до отказа T является функцией двух независимых случайных аргументов a и γ_x :

$$T = (X_{\max} - a) / \gamma_x. \quad (9.16)$$

Рассмотрим случай, когда $a < X_{\max}$, т. е. станок изготовлен в пределах допуска. Если случайные аргументы a и γ_x распределены по нормальному закону, то и параметр X для каждого значения $t = T$ будет распределен по тому же закону с параметрами:

$$X_{cp} = a_0 + \gamma_{cp} T; \quad (9.17)$$

среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_a^2 + (T\sigma_x)^2}, \quad (9.18)$$

где a_0 , σ_a — соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайного параметра a ; γ_{cp} , σ_x — соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение скорости изменения γ_x выходного параметра X .

Учитывая, что вероятность безотказной работы станка $P(t)$ равна вероятности того, что параметр X не выйдет за допустимые пределы X_{\max} в течение времени $t = T$, т. е. $P(t) = \text{Вер}(X \leq X_{\max})$, получим

$$P(t = T) = \Phi \left[\frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + (\sigma_x T)^2}} \right], \quad (9.19)$$

где Φ — функция Лапласа ($0,5 \leq \Phi \leq 1$), для которой есть таблицы в [12].

При расчете по этой формуле X_{\max} определяется требованиями к показателям станка (ТУ), a_0 и σ_a — характеристики качества его начального изготовления, γ_{cp} и σ_x — характеристики изменения параметра станка в результате старения (износа).

Если раздельно учесть начальные характеристики станка (a_0 и σ_0) и их изменение в результате процессов средней скорости (температурных деформаций) за период T_0 непрерывной работы станка, то формула (9.19) примет вид

$$P(t = T) = \Phi \left[\frac{X_{\max} - a_0 - a_c - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_c^2 + (\sigma_x T)^2}} \right], \quad (9.20)$$

где a_c и σ_c — соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение изменения выходного параметра за счет процессов средней скорости.

В общем случае, если известно математическое ожидание $M_x(t)$ изменения параметра X во времени и дисперсия $D_x(t)$ этого параметра в каждый момент времени с учетом его начального рассеивания, то вероятность безотказной работы изделия

$$P(t) = \Phi \left[\frac{X_{\max} - a_0 - M_x(t)}{\sqrt{D_x(t)}} \right]. \quad (9.21)$$

Зависимости (9.19) — (9.21) используют для расчета вероятности безотказной работы при прогнозировании параметрической надежности станка. Для прогнозирования параметрической надежности станка с учетом износа отдельных сопряжений и механизмов необходимо осуществить следующие этапы:

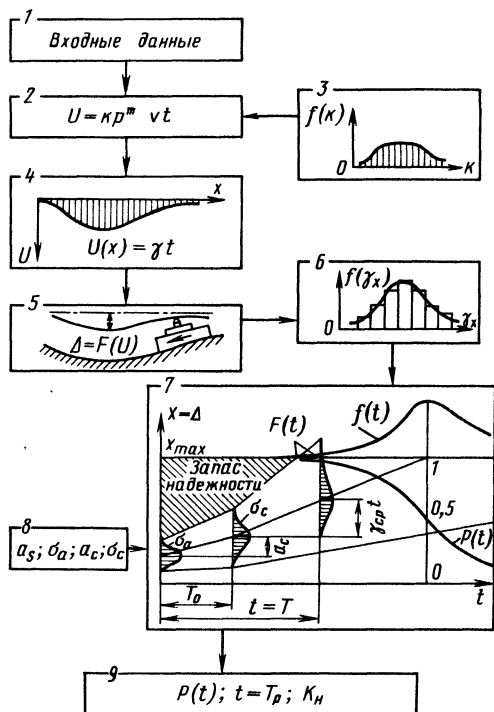


Рис. 9.6. Схема прогнозирования параметрической надежности станка при износе базовых элементов: 1— заданные параметры и режимы работы станка, конструктивные данные, материалы; 2— закономерности изнашивания материалов; 3— закон распределения коэффициента износа (результат физико-статистического моделирования износа); 4— расчет износа сопряжений; 5— расчет погрешности траекторий суппорта в функции износа; 6— расчет скорости изменения выходного параметра; 7— модель параметрического отказа; 8— оценка начальных параметров станка (расчет или результат программных испытаний); 9— расчет показателей параметрической надежности станка

на основании закономерностей процесса изнашивания рассчитать износ сопряжения с данными конструктивными особенностями, определить форму изношенных поверхностей;

оценить влияние износа сопряжений на выходные параметры станка;

учесть вероятностную природу всех процессов и факторов (оценить их законы распределения);

используя модель параметрического отказа, рассчитать показатели надежности станка.

На рис. 9.6 показаны этапы прогнозирования параметрической надежности станка, когда его начальные параметры a_0 , σ_a , a_c и σ_c получены на основе расчета или в результате специально проведенных испытаний (см. п. 17.3).

В качестве примера показано влияние из-

носа направляющих на изменение точности перемещения суппорта $X = \Delta$. Исходной зависимостью является закон изнашивания материала пары трения, позволяющий оценить износ в функции режимов работы станка [см. формулу (9.9)]. Значение и закон распределения коэффициента износа k определяют либо на основе физико-статистического моделирования [8], либо оценивая возможный диапазон его изменения от k_{\min} до k_{\max} . Форму изношенного сопряжения $U(x)$ рассчитывают по формуле (9.12). Затем устанавливают связь между износом сопряжения и погрешностью траекторий движения суппорта $\Delta = F(U)$, например, по формуле (9.13) или по другой зависимости, учитывающей конструктивные особенности суппорта и его направляющих.

Многочисленные расчеты данного параметра при различных входных данных, т. е. моделирование процесса эксплуатации станка, например с помощью метода Монте-Карло, позволяют получить закон распределения скоростей $\dot{\gamma}_x$ изменения выходного параметра $X = \Delta$. Этот закон, выраженный аналитически или в виде гистограммы, вводится в модель параметрического отказа. В этой модели используются также характеристики законов распределения начальных параметров станка в холодном состоянии (a_0 , σ_a) и при действии тепловых процессов (a_c , σ_c) [см. формулу (9.20)]. Эти данные получены расчетом или в результате программных испытаний.

Модель параметрического отказа дает возможность рассчитать показатели надежности по каждому выходному параметру станка.

На рис. 9.7 приведена структурная схема алгоритма прогнозирования параметрической надежности станка, когда нагрузки p и скорости v относительного скольжения в изнашивающихся направляющих станка подчиняются законам усеченного нормального распределения, параметры которых известны (ρ_{cp} , σ_p , v_{cp} , σ_v), а коэффициент износа k имеет равномерное распределение (от k_{\min} до k_{\max}). Расчет ведется с применением метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) и состоит из N циклов ($N \geq 120$), для каждого из которых входные данные (p , v , a , k) выбирают как случайные в соответствии с их законами распределения. Эти законы получены на основании статистического анализа технологических процессов для заготовок, обрабатываемых на станках данной модели и применяемых режимов их обработки.

Операторы 3, 6 служат для выбора значений p , v и k для каждого цикла. Для этого происходит обращение к подпрограммам «ГАУСС» (для нормального закона) и «РАВН» (равномерное распределение) (операторы 4 и 7). Затем проводится расчет скорости изнаши-

вания γ (оператор 8) и коэффициента B_x , оценивающего влияние износа на выходной параметр станка [например, по формуле (9.13)].

При линейной зависимости между износом и выходным параметром скорость изменения выходного параметра $\gamma_x = B_x \gamma$. Для расчета случайного времени T работы станка до предельного состояния X_{\max} по точности необходимо выбрать параметр a (операторы 11 и 12), который также распределен по известному закону нормального распределения. Совершая данную процедуру расчета (оператор 14) N раз, получают массив значений T_1, T_2, \dots, T_N , по которому строится гистограмма, отражающая закон распределения $f(t)$ (операторы

16 и 17). При заданном ресурсе T_p рассчитываются вероятность безотказной работы $P(t)$ (оператор 18) и другие показатели надежности. Если необходимо повысить надежность, надо провести расчеты по данной программе с измененными входными параметрами, отражающими результат конструктивно-технологических мероприятий, и оценить их результативность.

Если входные параметры распределены не по нормальному, а по другим законам распределения, выраженным аналитически или графически (гистограммы), то в проведенной структуре алгоритма будут изменены подпрограммы для выбора случайных значений варьируемого параметра в соответствии с заданным законом распределения.

9.5. Оценка надежности сложных систем

При расчете показателей надежности следует учитывать, что станок и тем более станочные модули и комплексы являются сложными системами, состоящими из большого числа деталей, узлов, подсистем. Под сложной системой понимают объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

Понятие сложной системы условно. Его можно применять к отдельным узлам и механизмам (коробка скоростей, револьверная головка), к машинам (станок, робот) и к системам машин (цех машиностроительного завода, автоматическая станочная линия). Большей сложностью обладают, как правило, автоматизированные системы.

При анализе надежности сложных систем их разбивают на элементы (звенья) с тем, чтобы вначале рассмотреть параметры и характеристики элементов, а затем оценить работоспособность всей системы. Элемент — это составная часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами. Выходные параметры каждого элемента при их изменении в процессе эксплуатации должны учитывать требования, предъявляемые к надежности всей системы.

Если рассмотреть выходные параметры каждого элемента (может быть один или несколько параметров), то они могут по-разному влиять на формирование выходного параметра всей системы X_{Σ} , определяющего ее надежность. Можно выделить три основных свойства этих параметров (рис. 9.8):

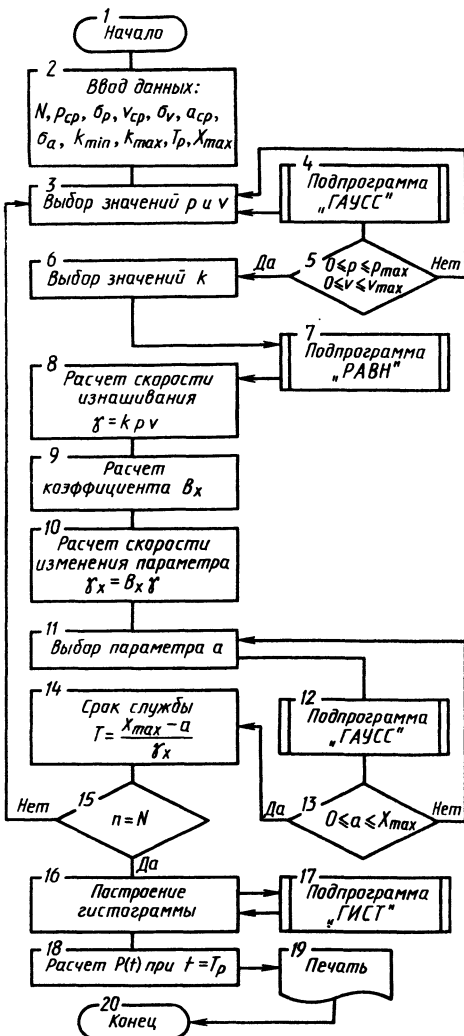


Рис. 9.7. Структурная схема алгоритма прогнозирования параметрической надежности станка

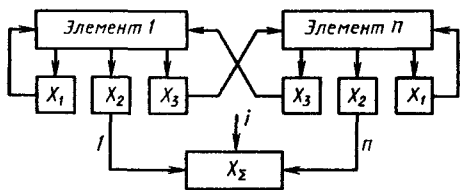


Рис. 9.8. Выходные параметры элементов сложной системы

X_1 — изменение параметра влияет на работоспособность лишь самого элемента; отказ данного элемента ведет, как правило, к отказу изделия;

X_2 — параметр участвует в формировании одного (или нескольких) выходных параметров всего изделия; его изменения должны учитываться в совокупности с изменением параметра данной категории для других элементов; по отклонению от номинала только данного параметра нельзя судить об отказе элемента [см., например, формулу (9.14)];

X_3 — параметр влияет на работоспособность других элементов; его изменение для остальных частей изделия аналогично изменению внешних условий работы (например, повышение температуры и вибраций, газовыделения и т. п.).

Каждый параметр может обладать одним или несколькими из перечисленных свойств. В зависимости от того, какие свойства выходных параметров элементов преобладают, будут формироваться и основные черты сложных изделий.

Если все элементы имеют параметры первого типа (X_1), то надежность такого элемента может быть определена независимо от других частей системы. В этом случае получим систему, состоящую из отдельных частей, надежность которых задана или может быть определена [2]. Анализ надежности таких систем, как правило, более прост, поскольку элементы работают как независимые, и для обеспечения надежности системы необходимо и достаточно обеспечить безотказную работу каждого элемента в отдельности.

С позиций надежности могут быть следующие структуры сложных систем;

расчлененные, у которых надежность отдельных элементов может быть заранее определена, так как отказ элемента можно рассматривать как независимое событие;

связанные, у которых отказ элементов является зависимым событием, связанным с изменением выходных параметров всей системы;

комбинированные, состоящие из подсистем со связанной структурой и с независимым формированием показателей надежности для каждой из подсистем.

При возможности расчленения сложной системы на элементы, для каждого из которых можно отдельно определить вероятность безотказной работы, для расчета ее надежности широко используют структурные схемы [2, 5].

Для независимых элементов применяют теорему умножения теории вероятностей, когда вероятность безотказной работы сложного изделия, состоящего из n элементов,

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (9.22)$$

где p_i — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Значение p_i каждого элемента формируется под влиянием процессов старения или внешних воздействий и является функцией времени.

Для повышения надежности сложных систем применяют метод резервирования [2, 5].

Вероятность безотказной работы системы с резервными элементами, каждый из которых способен выполнять заданные функции:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i) \quad (9.23)$$

или при $p = p_1 = p_2 = \dots = p_i$

$$P(t) = 1 - (1 - p)^m, \quad (9.24)$$

где m — число элементов системы.

Формула (9.24) применима при постоянном (нагруженном) резервировании, когда $(m-1)$ резервных элементов постоянно присоединены к основному и находятся в одинаковом с ним режиме работы. Примером применения резервных элементов в станках может служить постановка дополнительных фильтров в гидросистемах, когда при засорении одного фильтра другой продолжает функционировать, обеспечивая работоспособность системы.

Особенность структур механических систем станков заключается в том, что метод резервирования сравнительно редко применяют в чистом виде. Для повышения надежности станков характерно применение принципа избыточности, который является более общим, чем резервирование. Создание запасов прочности, износостойкости (например, за счет увеличения площади опорных поверхностей), жесткости, виброустойчивости, теплостойкости и т. п. приводит к тому, что повышается запас надежности, поскольку область состояний изделия удаляется от предельных значений параметра.

В применении методов расчета надежности сложных систем для машин и станков имеется своя специфика по сравнению с методами, которые разработаны для радиоэлектронных комплексов и устройств [5].

9.6. Основные методы повышения надежности станков

Для машиностроения более характерно наличие таких выходных параметров отдельных элементов, которые участвуют в формировании выходных параметров всего изделия (параметры типа X_2 , см. рис. 9.8). В этом случае элементы нельзя считать независимыми и для каждого из них самостоятельно определять показатели надежности (например, вероятность безотказной работы). Здесь необходимо рассматривать систему или подсистему в целом и учитывать как участие каждого элемента в формировании выходного параметра системы, так и их взаимное влияние на работоспособность (выходные параметры типа X_3).

Для станочных механических систем наиболее характерен случай, когда при расчете надежности нельзя применять формулу (9.22), а необходимо рассматривать весь механизм или узел в целом и оценивать процесс изменения выходного параметра.

Рассматривать станки и станочные комплексы как сложную систему с независимыми элементами можно в следующих основных случаях:

для больших систем, состоящих из отдельных машин, агрегатов, подсистем, которые могут функционировать самостоятельно (автоматическая линия, гибкая производственная система);

для нескольких независимых выходных параметров станка;

для систем, состоящих из отдельных агрегатов, особенно в тех случаях, когда их принцип работы и особенность функционирования представляют самостоятельную конструктивную единицу (узлы гидросистем, целевые узлы станков — коробка скоростей, механизм загрузки и др., особенно при модульном принципе компоновки станков (см. гл. 11).

Все перечисленные случаи условны, и требуется предварительный анализ для решения вопроса о возможности расчленения изделия на независимые элементы или подсистемы.

В распоряжении конструктора, технолога, эксплуатационника всегда имеется широкий ассортимент методов и средств для повышения надежности станка и его элементов. Однако для сокращения затрат необходимо, во-первых, стремиться к обеспечению требуемого уровня надежности (а не вообще к его повышению) и, во-вторых, проводить целенаправленные мероприятия по улучшению тех характеристик, которые в наибольшей степени определяют надежность станка. Для этих целей используются источники информации о надежности, начиная с этапа проектирования и кончая данными о фактической надежности эксплуатируемых станков (рис. 9.9).

При проектировании весьма важно обеспечить наибольшую достоверность расчета и прогнозирования уровня надежности будущего станка. При наличии опытного образца эти возможности расширяются, но получить информацию о надежности за короткий период времени можно только на основе специальных испытаний, например программных (см. п. 17.3). Чем больше период эксплуатации станка, тем больший объем информации о фактическом уровне надежности можно получить, используя статистические методы анализа возникающих отказов и содержания ремонтных работ.

Однако по мере накопления информации ее ценность уменьшается, так как она устаревает, и важнее оценить уровень надежности вновь создаваемого образца. Поэтому наряду с использованием оправдавших себя в эксплуатации узлов и элементов новые разработки должны сопровождаться расчетом и прогнозированием надежности, которые дают возможность указать наиболее рациональные пути и методы повышения надежности станка в целом и оценить эффективность разрабатываемых мероприятий.

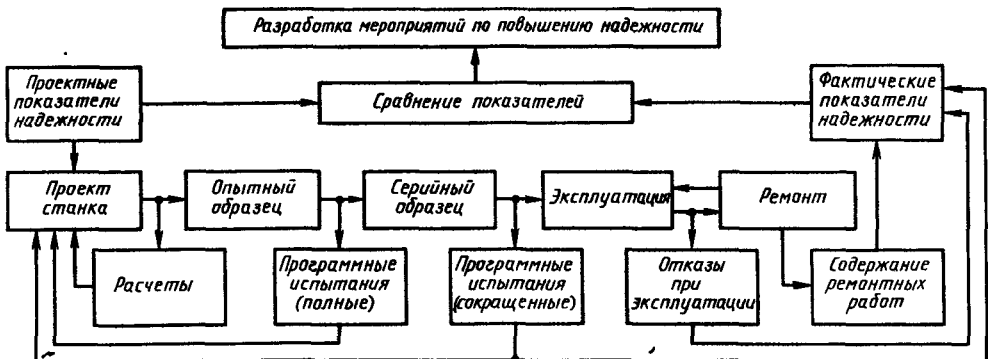


Рис. 9.9. Источники информации о надежности станка

9.16. Методы повышения надежности станков

| Метод | Примеры |
|---------------------------------------|--|
| Повышение сопротивляемости за счет: | |
| конструкции | Портальные конструкции станин, ребра жесткости. Разгрузка направляющих. Устройства для компенсации износа направляющих и опор |
| технологии | Повышение точности изготовления и сборки ответственных деталей и узлов. Упрочнение и повышение качества поверхностей трения |
| материалов | Применение износостойких материалов. Антифрикционные покрытия направляющих. Термообработка и повышение твердости пар трения |
| смазывания поверхностей трения | Шпиндельные опоры и направляющие с гидростатической смазкой. Аэростатические опоры. Смазывание масляным туманом. Специальные смазочные материалы с присадками |
| Изоляция от: | |
| вибрационных воздействий | Виброизолирующие фундаменты и опоры. Покрытия с демпфирующей способностью |
| тепловых влияний | Термоконстантные помещения. Охлаждение жидкостей гидросистем. Системы отвода тепла (обдув, тепловые трубы). Изоляция источников тепловыделения |
| внешней среды | Щитки и «меха» для защиты направляющих. Устройства очистки от запыленности. Механизмы удаления стружки |
| Применение автоматики для управления: | |
| быстро протекающими процессами | Автоматическая балансировка шпинделя с заготовкой в процессе обработки. Управление силой трения в направляющих стола прецизионных станков |
| процессами средней скорости | Автоматическая компенсация деформаций корпусных деталей. Автоматическая подналадка режущего инструмента, правка шлифовального круга. Создание направленного теплового поля |
| медленными процессами | Автоматическая компенсация износа. Автоматическая очистка трущихся поверхностей |

Основные направления при разработке методов повышения надежности станков следующие.

1. Повышение сопротивляемости станка внешним воздействиям. Сюда относятся методы создания прочных, жестких, износостойких узлов за счет их рациональной конструкции, применение материалов с высокой прочностью, износостойкостью, антикоррозийностью, теплоустойчивостью и др., а также применение различных смазочных материалов для трущихся поверхностей.

Это направление объединяет все новейшие достижения в области конструирования и технологии, которые позволяют увеличивать стойкость узлов и механизмов по отношению к воздействиям, которые характерны для данного типа станков. Однако возможности сопротивления внешним воздействиям не безграничны, они зависят от уровня развития соответствующей области техники.

2. Изоляция станка от внешних воздействий. Для этого направления характерно применение таких методов, как установка станка на виброизолирующий фундамент, защита поверхностей от запыления и загрязнения, создание для работающих станков специальных условий по температуре и влажности, применение антикоррозийных покрытий и т. д. Различного рода виброизолирующие и амортизационные устройства предотвращают воздействие пиковых нагрузок, не пропускают вредные для изделия частоты.

Экраны, охраняющие изделия от тепловых излучений и радиации, специальные устройства для защиты от влаги и агрессивных сред, механизмы, удаляющие отходы производства (стружку), фильтры, очищающие масло и воздух, и многие другие устройства создают более благоприятные условия для работы станков, повышают их надежность. Однако воз-

возможности по изоляции машины от внешних воздействий также ограничены, они не устраняют основных причин, снижающих надежность станка, так как всегда имеются внутренние источники возмущений (вибрации самого станка, тепловыделения в узлах и механизмах и т. п.)

3 Применение автоматики для управления состоянием станка Автоматика — мощное средство для обеспечения надежности станков, которое приводит к созданию самоподстраивающихся и саморегулируемых систем, обладающих функциями приспособления к изменяющимся условиям работы и восстановления утраченной работоспособности

Поскольку изменение технического состояния станка при его эксплуатации связано с динамическими процессами (см рис 9.5), и станок взаимодействует с ним как система автоматического регулирования, управление этим состоянием путем воздействия на процессы, на параметры станка и на внешние возмущения — перспективный путь решения многих задач надежности там, где тривиальные методы исчерпаны

Применяют следующие методы управления состоянием станка стабилизация или создание направленных тепловых полей станка, управление деформациями корпусных деталей, зазорами в ответственных механизмах, толщиной масляной пленки или положением элементов, коррекция движения формообразующих органов станка, управление профилактическими операциями, осуществление диагностических процедур для выработки решений по регулированию параметров или режимов работы станка Специфика автоматизированных систем для поддержания работоспособности станка заключается в том, что они, во-первых, связаны не только с выходными параметрами всего станка, но и с характеристиками отдельных элементов, их определяющих, и, во-вторых, они учитывают скорость процессов, изменяющих состояние станка, и поэтому действие систем для поддержания и восстановления его работоспособности может быть периодическим (см том 2 гл 9)

Основные направления повышения надежности станков приведены в табл 9.16

Список литературы

- 1 Баронс П. П., Звиедрис А. В., Салениекс Н. К. Надежность и качество механических систем Рига Авотс, 1982 86 с
- 2 Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности М Наука, 1965 524 с
- 3 Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ М Машиностроение, 1977 526 с
- 4 Металлорежущие станки и автоматы Учебник для вузов/А С Проников, Н И Камышный, Л И Волчеквич и др/Под ред А С Проникова, М Машиностроение, 1981 480 с
- 5 Надежность технических систем Справочник/Ю К Беляев, В А Богатырев, В В Болотин и др/Под ред И А Ушакова, М Радио и связь, 1985 608 с
- 6 Проблемы надежности и ресурса в машиностроении/Под ред К В Фролова и А П Гусенкова М Наука, 1986 248 с
- 7 Проектный анализ надежности Справочник Т 5 Надежность и эффективность в технике/Б И Бельчич, В Ф Грибанов, Э В Дворецкий и др/Под ред В И Патрушева и А И Рембезы М Машиностроение, 1988 320 с
- 8 Проников А. С. Надежность машин М Машиностроение, 1978 592 с
- 9 Проников А. С. Параметрическая надежность машин и технологического оборудования Проблемы, перспективы, тенденции// Проблемы машиностроения и надежности машин 1990 № 2 С 50—59
- 10 Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений М Наука, 1965 512 с
- 11 Трение, изнашивание, смазка Справочник/В В Алисин, А Я Алябев, А М Архаров и др/Под ред И В Крагельского и В В Алисина М Машиностроение Кн 1 1978 400 с Кн 2 1979 358 с
- 12 Шор Н. Б., Кузьмин Р. Н. Таблицы для анализа и контроля надежности М Советское радио, 1968 284 с

Расчет и выбор основных параметров станка

10.1. Проектное формирование новой модели станка

На начальной стадии проектирования станка определяют основные параметры конструкции, ее технические характеристики, решают вопросы выбора рациональной силовой схемы, общей компоновки станка и его составных частей.

Расчету и выбору параметров проектируемого станка предшествует предварительная (предпроектная) проработка, состоящая в обосновании технической характеристики станка, т. е. установлении комплекса исходных данных для составления технического задания на проектирование станка.

Расчет и выбор основных параметров на ранней стадии проектирования определяются формулировкой проектной задачи, отражающей параметры процесса обработки. В процессе анализа этих параметров определяют пределы изменения частоты вращения шпинделей и подач (кинематические характеристики), выявляют операции и режимы обработки, требующие наибольшей мощности привода главного движения и тяговых сил приводов подач (силовые характеристики).

Система сил, действующая на звенья станка, определяет в основном геометрические параметры, кинематическую схему и компоновку станка.

Для установления целесообразного взаимодействия станочных элементов, осуществляющих цикл обработки, и окончательного выбора параметров резания, обеспечивающих заданные технико-экономические показатели новой модели, составляют циклограмму работы станка. На последующих стадиях проектирования, включая этап эскизного проекта, продолжается формирование основных параметров станка.

Согласно ГОСТ 2.103—68 стадии разработки конструкторской документации включают: техническое предложение, эскизный проект, технический проект и конструкторскую рабочую документацию (см. подразд. 5.1).

Все этапы проектирования последовательно уменьшают неопределенность проектной задачи.

Основными принципами, обеспечивающими решение проектной задачи, являются последовательность и итерационность. Последовательность заключается в строгой очередности выполнения этапов проектирования станка, а итерационность — в корректировке предыдущих этапов проектирования, исходя из результатов, полученных на последующих этапах.

Техническое задание на разработку станка содержит следующие исходные данные:

- область применения, тип производства;
- изложение технологического процесса обработки;

- технические требования (наименование и назначение составных частей, способ установки и крепления обрабатываемой заготовки, выполняемые операции, степень механизации и автоматизации операций, органы управления и их размещение);

- техническую характеристику станка (производительность, предельные размеры обрабатываемой заготовки, привязочные размеры, расстояние между осью поворота каретки и плоскостью планшайбы стола, размер конических отверстий в шпинделе, наибольшие координатные перемещения исполнительных органов — продольный ход стола, поперечный ход салазок, вертикальный ход фрезерной головки, угол наклона инструмента, частоту вращения заготовки, наибольшие скорости подач по координатам);

- частоту вращения шпинделя;
- мощность привода главного движения;
- требования к уровню унификации и стандартизации.

При формировании компоновки должны быть учтены требования этапов создания станка.

Определяющими признаками для предварительного отбора компоновок должны быть технологические и конструкционные соображения:

- обеспечение выполнения заданного технологического процесса и требуемой производительности;

- одновременная обработка по нескольким координатам;

- одновременная многоинструментная обработка;

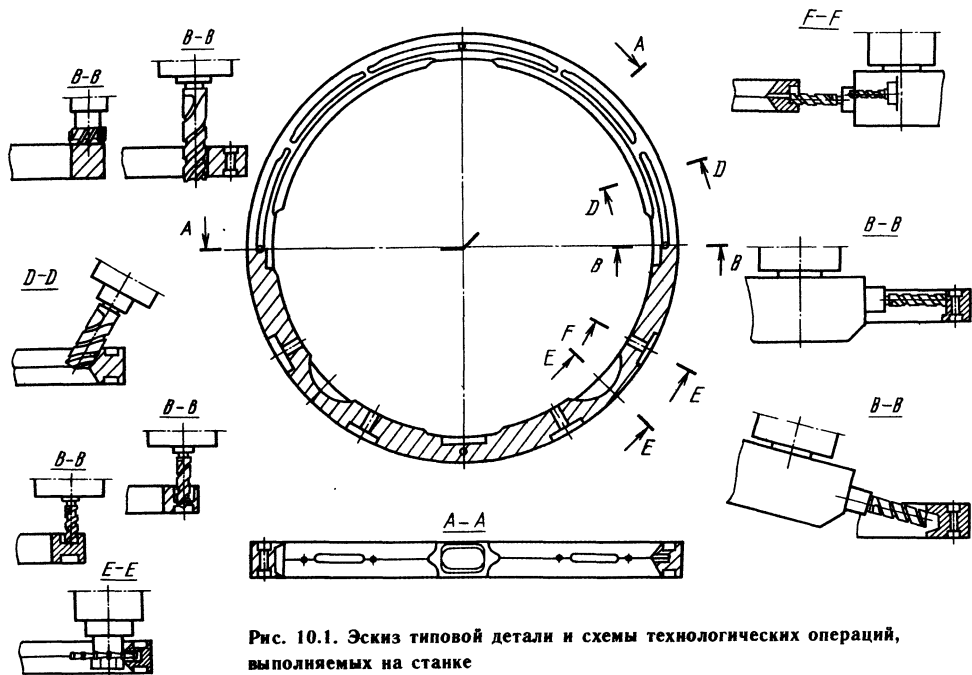


Рис. 10.1. Эскиз типовой детали и схемы технологических операций, выполняемых на станке

достаточные жесткость и виброустойчивость станка при минимальной массе конструкции; удобство загрузки станка;

автоматизация вспомогательных операций (смена инструмента, отвод стружки из зоны резания и т. п.);

возможность стыковки с системой адаптивного контроля за процессом обработки;

возможность встраивания в автоматизированный участок станков, линию и т. п., определяющая способность станка работать в комплексе с другим оборудованием: роботами, манипуляторами и т. п.;

специализация, т. е. приспособление компоновки станка к условиям производства с различной серийностью изготовления деталей;

организация рабочего места (освещенность рабочей зоны, наличие мостика или подъемного устройства, расположение пультов).

Принципы формирования геометрических параметров станка, исходя из условий улучшения стабильности процесса обработки, реализуются следующим образом: путем уменьшения вылетов элементов компоновки и уменьшением расстояния их центров масс до центров жесткости; уменьшением радиусов инерции масс (увеличение компактности); достижением максимальной симметричности компоновки, в том числе касающейся расположения центров тяжести и жесткости; исключением или уменьшением изменений значений вылетов при пере-

мещениях узлов, особенно по координатам, с которыми связаны наиболее высокие требования точности обработки.

Выбор условий для отбора компоновок определяют требования производства. Могут быть выбраны другие условия, зависящие от конкретных обстоятельств.

На ранних стадиях проектирования компоновку оценивают качественно сопоставлением альтернативных вариантов.

Пример предварительного анализа компоновок станков, применяемых в качестве базы при изготовлении многоцелевых станков, по условиям отбора приведен ниже.

Исходные условия для примера:

изготавливаемые детали — крупные и тяжелые жесткие типа колец (рис. 10.1), имеющие замкнутые и открытые карманы, пазы, вырезки люков;

обработка — фрезерование, сверление, зенкование, цекование;

класс точности станка — Н (нормальный); станок должен быть оборудован системой программного управления, которая позволяет осуществлять перемещение по нескольким координатам.

Из приведенных условий следует необходимость выбора компоновок для станков с горизонтальным — вариант 1 (рис. 10.2, а) или вертикальным — вариант 2 (рис. 10.2, б) расположением шпинделя.

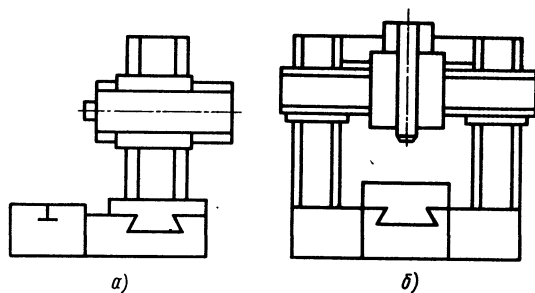


Рис. 10.2. Варианты компоновок станка с расположением шпинделя: а — горизонтальным; б — вертикальным

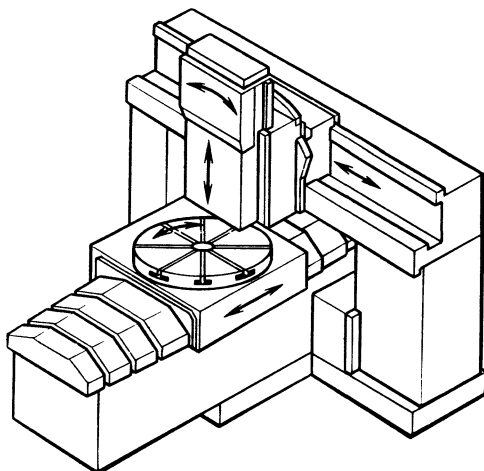


Рис. 10.3. Общий вид фрезерного станка.

Условия отбора неодинаковы по своему значению. Их неравноценность учитывается тем, что параметры, имеющие меньшее значение, должны быть исключены из анализа, если они вступают в противоречие с условиями, имеющими решающее значение, также исключаются явно противоречивые структурные признаки и те, которые нецелесообразны по критериям имеющегося опыта проектирования и эксплуатации аналогичных станков.

При анализе размеров компоновки за основной критерий принимают жесткость элементов несущей системы станка.

10.1. Сравнительный анализ компоновок станка

| Условия отбора | Схемы компоновок варианта | |
|---|---------------------------|---|
| | 1 | 2 |
| Возможность увеличения вспомогательного аксиального хода для автоматической смены инструментов без увеличения вылета направляющих | — | + |
| Возможность встраивания станка в автоматическую линию | + | ~ |
| Подвижные массы распределены между двумя ветвями компоновки | — | + |
| Возможность поточной загрузки и разгрузки | — | + |
| Возможность изготовления специализированного станка с круглым столом без продольного хода | — | ~ |
| Возможность изготовления станков с увеличенным вертикальным ходом | — | ~ |
| Возможность изготовления станков с наклоняемыми столами | + | — |

Обозначения: Знак «+» означает соответствие условиям; знак «—» — отсутствие соответствия; знак «~» — частичное соответствие (соответствие условиям с допущениями).

Выбранным условиям отбора в меньшей степени удовлетворяет горизонтальная компоновка (см. табл. 10.1).

При построении технологической схемы станка в соответствии с технологической задачей определяют состав рабочих и установочных движений, число шпинделей, схему обработки, распределение движений между заготовкой и инструментом.

В процессе патентного поиска выбирают прототип станка.

Эскиз предварительно выбранного варианта компоновки станка и координатные перемещения представлены на рис. 10.3.

Окончательный выбор компоновки станка следует проводить с учетом количественных характеристик качества и принципиальных положений построения компоновок.

10.2. Выбор основных геометрических параметров станка

Основные параметры и размеры станков регламентированы ГОСТами, ОСТАми и нормативами, а также ТУ на конкретные виды станков.

Регламентированные значения параметров станков одной технологической группы образуют размерные ряды.

Ряды предпочтительных чисел используют в случаях, когда требуется создавать ряд градаций каких-либо параметров с равномерной насыщенностью градаций во всех частях ряда (подач станков, передаточных отношений в коробках передач и т. п.).

При выборе градаций и отдельных значений параметров станков применяют предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел, устанавливаемые ГОСТ 8032—84 или ОСТ 2 Н11-1—72.

В тех случаях, когда для измерения угловых размеров используются угловые величины (градусы, минуты, секунды), могут применяться предпочтительные специальные арифметические ряды, образованные по ГОСТ 8032—84 (п. 7.4).

ГОСТ 8032—84 устанавливает также ряды чисел, применяемые в случаях, когда использование рядов предпочтительных чисел невозможно или нецелесообразно.

При выборе размеров вновь проектируемого станка следует в первую очередь учитывать основные геометрические параметры станков, связанные с размерами обрабатываемой заготовки.

Для предварительного определения параметров станков используют сравнительно-статистические данные.

В качестве основного параметра многоцелевых (многооперационных) сверлильно-фрезерно-расточных станков принимают ширину рабочей поверхности стола. Эти станки по характеру выполняемых операций и разнообразию применяемых режущих инструментов обладают технологическими возможностями станков основных технологических групп.

Ширина стола влияет на другие геометрические параметры станка: на ход вдоль оси горизонтального шпинделя, вылет вертикального шпинделя. Наряду с размерами рабочей поверхности стола координатные перемещения по осям X , Y характеризуют возможности станка по получению предельных размеров деталей.

Основные геометрические параметры, характеризующие технологические возможности станков наиболее распространенных групп, приведены в табл. 10.2.

Закономерность изменения параметров станков, предусмотренная стандартами, подчиняется, как правило, геометрической прогрессии. По ширине рабочей поверхности стола многоцелевого станка предусматривается размерный ряд станка со знаменателем геометрической прогрессии 1,25.

Станки внутри каждой технологической гаммы имеют единые кинематическую и гидравлическую схемы, схему электропривода и систему управления, полное архитектурное подобие.

Обозначение осей координат и направлений движений рабочих органов станка с ЧПУ, связанных с обрабатываемой заготовкой и инструментом, устанавливает ГОСТ 23597—79.

Общие ТУ на металлообрабатывающие стан-

10.2. Основные геометрические параметры (мм) станков общего назначения

| Параметр | Значение | |
|--|-------------|--------------|
| | минимальное | максимальное |
| Сверлильно-фрезерно-расточные станки | | |
| Габаритные размеры рабочей поверхности стола: | | |
| ширина | 200 | 2500 |
| длина | 200 | 12500 |
| Фрезерные станки | | |
| Ширина рабочей поверхности столов станков: | | |
| консольных | 100 | 400 |
| вертикальных с крестовым столом | 250 | 1000 |
| продольных | 630 | 4000 |
| широкоуниверсальных | 125 | 500 |
| Токарные станки (с ЧПУ) | | |
| Диаметр устанавливаемого изделия над станиной | 250 | 5000 |
| Координатно-расточные и координатно-шлифовальные станки | | |
| Габаритные размеры рабочей поверхности стола: | | |
| ширина | 250 | 2000 |
| длина | 360 | 3150 |
| Сверлильные станки | | |
| Наибольший условный диаметр отверстия в стали 45 для станков: | | |
| вертикальных | 3 | 80 |
| радиальных | 25 | 125 |

ки, в том числе на станки с ЧПУ, предусмотрены ГОСТ 7500—85.

Основные параметры и размеры многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станков приведены в ГОСТ 27491—87Е.

Выбор геометрических параметров по результатам анализа технологического процесса обусловлен расположением шпинделя в пространстве, типами установочных модулей, числом одновременно работающих шпинделей, типами систем накопления и смены инструментов, совмещением ряда технологических функций, концентрацией операций и др.

Определение оптимальных размерных рядов и целесообразной унификации узлов имеет большое значение при проектировании гаммы стан-

ков одного технологического назначения, но разных размеров, а также при разработке размерного ряда узлов, используемых в специальных станках.

Принцип агрегатирования получил наиболее полное выражение в конструкции агрегатных станков. Такие станки создают на основе унифицированных блоков (обрабатывающие блоки, поворотные столы, корпуса общего назначения, станины, тумбы и ряд систем) посредством объединения их в единое целое по принципам, задающим условия совместимости (или несовместимости) элементов.

Агрегатно-модульный принцип построения многоцелевых станков позволяет из ограниченного комплекта унифицированных узлов создавать в короткие сроки необходимые исполнения станков по ширине и длине стола, вертикальному и горизонтальному положению шпинделя, числу шпинделей, мощности привода главного движения, числу управляемых координат и другим параметрам.

Основные признаки, по которым различаются модификации, входящие в агрегатно-модульную систему при параметрическом и размерном агрегатировании, — ширина и длина стола, размер конуса шпинделя, мощность привода главного движения.

Набором агрегатированных функциональных элементов конструкции станков определяются их технологические возможности и способы конструирования.

Параметры рабочего пространства, концентрация и совмещение операций, особенно в случае многоцелевого станка, определяют его конфигурацию и габаритные размеры, связанные с использованием унифицированных узлов, агрегатов, модулей и большого сложного инструментального магазина.

Модульный принцип проектирования станков наиболее полно отвечает требованиям решения конкретной технологической задачи, а станки, созданные по этому принципу, более экономичны, чем станки с универсальными возможностями.

Основой конструктивных схем вновь проектируемых станков, отличных от схем, лимитированных ГОСТом, является типаж станков, а также разработанные параметрические и размерные ряды, определяющие исходные технические характеристики станков.

Параметрический ряд составляют станки одинакового назначения с регламентированными конструкцией параметрами и градациями параметров.

Основой ряда является единый тип станка. Необходимые градации образуются изменением его размеров при сохранении геометрического подобия модификаций ряда. При этом используют ряды нормальных линейных раз-

меров (ГОСТ 6636—69) с несколько большим округлением чисел по сравнению с основными (ГОСТ 8032—84).

В отличие от основных ряды нормальных размеров обозначают буквой «а»:

R_{a5} : 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100.

R_{a10} : 0,1; 0,12; 0,16; 0,2; 0,25; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4,5; 6,3; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 80; 100.

R_{a20} : 0,1; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,32; 0,36; 0,4; 0,45; 0,5; 0,56; 0,63; 0,71; 0,8; 0,9; 1 и т. д. с повышением цифр на один порядок.

R_{a40} : 0,1; 1,0105; 0,11; 0,115; 0,12; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,2; 0,21; 0,22; 0,24; 0,25; 0,26; 0,28; 0,3; 0,32; 0,34; 0,36; 0,38; 0,4; 0,42; 0,45; 0,48; 0,5; 0,53; 0,56; 0,6; 0,63; 0,67; 0,71; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1; 1,05; 1,1; 1,15; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5 и т. д.

ГОСТ 6636—69 охватывает линейные размеры в интервале 0,001...20 000 мм [10].

Применение стандартных линейных размеров целесообразно для поверхностей, подвергаемых точной обработке резанием, особенно для посадочных поверхностей, что способствует стандартизации режущего, контрольного и мерительного инструмента и облегчает настройку станков.

Ряды предпочтительных чисел используют, если требуется создавать ряд градаций каких-либо параметров с равномерной насыщенностью во всех частях ряда (подач станков, передаточных отношений в коробках передач).

Параметры стандартных элементов следует выбирать исходя из конкретных условий их применяемости.

Основные геометрические параметры, если они не предусмотрены техническим заданием, целесообразно определять на основе статистического анализа потенциальных обрабатываемых деталей с привлечением вероятностного метода обоснования параметров, а также принципа введения в размерный ряд «нерекомендуемых» размеров.

Нерасчетные геометрические параметры выбирают, используя метод экспертных оценок.

После разметки рабочего пространства и привязочных размеров назначают размеры направляющих и основные размеры деталей несущей системы станка. Исходя из конструктивных соображений, устанавливают размеры отдельных элементов компоновки.

Работа на ранних стадиях проектирования носит укрупненный характер, при этом используют различные упрощения. Поэтому многие геометрические параметры могут быть определены лишь приближенно. С достаточной достоверностью определяют только интервал, в котором находится значение параметра.

10.3. Обоснование выбора основных технических характеристик станка

Следующим этапом при разработке технического предложения на станок является обоснование выбора основных технических характеристик новой модели. Целью данного этапа является установление комплекса исходных данных, на основании которых ведется дальнейшее проектирование станка.

Применительно к металлорежущим станкам этот комплекс включает в себя: диапазон регулирования частот вращения шпинделя; диапазон регулирования скоростей рабочих подач; скорость установочных перемещений; мощность электродвигателя привода главного движения; тяговую силу для станков с поступательным перемещением узлов или крутящий момент для станков с вращательным движением узлов; мощность (крутящий момент) на валу электродвигателя привода подач; расчетную производительность станка; вместимость инструментального магазина (для многоцелевых станков).

Исходным документом для обоснования выбора технических характеристик проектируемого станка является техническое задание, разработанное проектной организацией на основе исходных данных заказчика или самим предприятием-заказчиком.

В него включаются, в частности, следующие данные: номенклатура типовых деталей; чертеж типовой детали с указанием параметров шероховатости, точности формы и размеров обрабатываемых поверхностей, баз для установки и закрепления заготовки в приспособлении, габаритные размеры детали и ее масса; чертеж заготовки с указанием метода ее получения (отливка, прокат, штамповка и т. д.); типы и параметры режущего инструмента.

При обосновании основных технических характеристик станка необходимо также учитывать степень его специализации.

Определим основные параметры технической характеристики на примере проектирования фрезерного станка (см. рис. 10.3).

Исходные данные: назначение станка — черновая и чистовая обработка корпусных деталей из конструкционных сталей, титановых, жаропрочных и алюминиевых сплавов; основные параметры режимов резания — см. табл. 10.3; диаметр фрезы $D_\phi = 16 \dots 50$ мм; параметр шероховатости обработанных поверхностей заготовки $Ra = 20$ мкм; минимальное значение частоты вращения шпинделя $n_{\min} = 45$ мин⁻¹; требуемая производительность станка $P_c = 20$ шт/ч; наибольшая масса детали $m = 1000$ кг; тип производства — мелкосерийное.

При определении параметров технической характеристики станка необходимо проанализировать материал обрабатываемой заготовки, вид обработки, тип и марку режущей части инструмента.

Анализ заданных параметров режимов резания (табл. 10.3) показывает, что верхнее значение диапазона частот вращения шпинделя определяется параметрами обработки конструкционных сталей, а нижнее — параметрами обработки жаропрочных сплавов, максимальное значение рабочих скоростей подач определяется параметрами обработки алюминиевых сплавов, а минимальное значение — параметрами обработки жаропрочных сплавов.

Предварительное значение диапазона регулирования частоты вращения шпинделя $D'_{\text{шп}} = n_{\max}/n_{\min} = 2000/100 = 20$.

Регулирование частоты вращения в заданном диапазоне может быть ступенчатым и бесступенчатым. При ступенчатом регулировании выбирают стандартное значение знаменателя ряда ϕ . Наиболее распространены $\phi = 1,26$ и $\phi = 1,41$. С учетом заданного типа производства по ГОСТ 2 Н11-1—72 принимаем $\phi = 1,41$ и устанавливаем нормализованные предельные значения частот вращения шпинделя $n_{\min} = 180$ мин⁻¹; $n_{\max} = 2000$ мин⁻¹.

По требованию заказчика диапазон частот вращения шпинделя может быть расширен. В данном случае принимаем $n_{\text{шп}} = 45 \dots 2000$ мин⁻¹.

Окончательное значение диапазона регулирования частоты вращения шпинделя $D_{\text{шп}} = 2000/45 = 44$.

Предварительное значение диапазона регулирования скоростей рабочих подач $D_n = v_{\max}/v_{\min} = 1200/10 = 120$.

На основе анализа технических характеристик лучших отечественных и зарубежных станков, аналогичных по функциональному назначению, скорость установочных линейных перемещений принимаем равной $v_y = 6000$ мм/мин.

Таким образом, общий диапазон регулирования скоростей подач $D_n = v_y/v_{\min} = 6000/10 = 600$.

Предварительный расчет мощности электродвигателя привода главного движения выполняем для двух вариантов: 1) привод с электродвигателем переменного тока двухскоростным; 2) привод с двигателем постоянного тока при двухзонном регулировании.

Требуемую мощность электродвигателя определяют по формулам:

для электродвигателя переменного тока $P_{\text{дв тр}} = P_{\text{эф}}/\eta$, где η — КПД кинематической цепи привода; при оценочных расчетах для станков с главным вращательным движением $\eta = 0,70 \dots 0,85$; для станков с главным возврат-

10.3. Основные параметры режимов резания

| Материал заготовки | Вид обработки | Материал режущей части фрезы | Скорость резания v , м/мин | Подача S_z , мм/зуб | Частота вращения шпинделя $n_{шп}$, мин ⁻¹ | Скорость подачи v_f , мм/мин | Эффективная мощность резания $P_{эф}$, кВт | Тангенциальная составляющая силы резания F_t , даН | Ограничение |
|-----------------------|---------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|--|--------------------------------|---|--|------------------------------------|
| Конструкционные стали | Черновая | БР | 30—40 | 0,10—0,12 | 200—1250 | 140—380 | 3,7—6,7 | 570—1400 | $F_t < 1000$ даН |
| | | ТС | 80—100 | 0,05—0,08 | 500—3175 | 245—480 | 4,7—11,4 | 280—910 | $n_{max} = 2000$ мин ⁻¹ |
| | Чистовая | БР | 40—60 | 0,06—0,10 | 250—2000 | 150—340 | 0,7—1,5 | 70—230 | — |
| | | ТС | 120—150 | 0,04—0,06 | 800—5000 | 275—575 | 1,1—2,7 | 300—380 | $n_{max} = 2000$ мин ⁻¹ |
| Титановые сплавы | Черновая | БР | 15—30 | 0,02—0,08 | 100—1000 | 45—60 | 1,0—4,1 | 210—1700 | $F_t < 1000$ даН |
| | | ТС | 20—50 | 0,03—0,06 | 125—1600 | 60—145 | 2,6—5,5 | 315—1700 | $F_t < 1000$ даН |
| | Чистовая | БР | 20—40 | 0,02—0,04 | 125—1250 | 60—75 | 0,3—1,1 | 40—340 | — |
| | | ТС | 25—60 | 0,03—0,04 | 160—2000 | 75—170 | 0,6—1,4 | 60—340 | — |
| Жаропрочные сплавы | Черновая | БР | 7—8 | 0,02—0,06 | 40—250 | 5—15 | 0,5—0,9 | 80—400 | — |
| | | ТС | 16—20 | 0,02—0,06 | 100—630 | 10—40 | 1,3—2,1 | 400—800 | — |
| | Чистовая | БР | 10—12 | 0,02—0,06 | 63—400 | 8—25 | 0,2—0,3 | 80—200 | — |
| | | ТС | 20—30 | 0,02—0,06 | 125—1000 | 15—60 | 0,4—0,5 | 80—200 | — |
| Алюминиевые сплавы | Черновая | БР | 100—150 | 0,03—0,05 | 630—5000 | 130—480 | 4,8—6,4 | 200—400 | $n_{max} = 2000$ мин ⁻¹ |
| | | ТС | 300—500 | 0,02—0,03 | 200—16000 | 230—980 | 9,6—11,3 | 120—240 | $n_{max} = 2000$ мин ⁻¹ |
| | Чистовая | БР | 200—250 | 0,03—0,05 | 1250—8000 | 250—800 | 2,4—3,8 | 60—120 | $n_{max} = 2000$ мин ⁻¹ |
| | | ТС | 500—600 | 0,02—0,03 | 3180—19000 | 380—1150 | 3,4—5,7 | 36—70 | $n_{max} = 2000$ мин ⁻¹ |

Примечания: 1. Параметры режимов резания приведены для концевых фрез. 2. Обозначения: БР — материал режущей части — сталь Р18; ТС — материал режущей части — твердый сплав.

10.4. Расчетные формулы для определения тяговой силы Q

| Тип направляющих | Тип станков | Расчетная формула |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Треугольные и комбинированные | Токарные | $Q = kF_a + f(m + F_t)$ |
| Прямоугольные | Токарные, револьверные, фрезерные | $Q = kF_a + f(m + F_r + F_t)$ |
| V-образные и типа «ласточкин хвост» | Фрезерные | $Q = kF_a + f(m + 2F_r + F_t)$ |
| Круглые | Сверлильные | $Q \approx F_a + f'2M_{кр}/d$ |

Примечания: F_a — составляющая силы резания по направлению подачи, даН; F_r — составляющая силы резания, направленная перпендикулярно к направлению подачи, даН; F_t — составляющая силы резания, направленная вдоль оси шпинделя, даН; m — масса перемещаемого узла, кг; d — диаметр пиноли шпинделя, мм; k — коэффициент, учитывающий влияние опрокидывающего момента; f — коэффициент трения в направляющих; f' — коэффициент трения между пинолью и корпусом шпинделя. Для токарных станков с призматическими или комбинированными направляющими $k=1,15$ и $f=0,15...0,18$; для токарных и револьверных станков с прямоугольными направляющими $k=1,1$ и $f=0,1...0,2$; для пинолей сверлильных станков $f'=0,15$; для направляющих качения $f=0,005...0,1$.

но-поступательным движением $\eta=0,60...0,70$; для электродвигателя постоянного тока при двухзонном регулировании

$$P_{дв.тр} = P_{эф} \frac{D_N^z}{(D_{32}\eta)}$$

Здесь D_N — требуемый диапазон регулирования частоты вращения шпинделя при постоянной мощности электродвигателя; z — число ступеней механического регулирования (обычно $z=2...4$);

$$z = \ln(D_{шн\phi}) / \ln(D_{32}\phi),$$

где $D_s = D_{s1}D_{s2}$ — полный диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя; D_{s1} — диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя с постоянным крутящим моментом; D_{s2} — диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя с постоянной мощностью.

В расчете приняты следующие значения параметров: $\eta=0,8$; $D_N=22$; $D_{s1}=5$; $D_{s2}=2,5$.

В результате расчета получено: для варианта 1 $P_{дв.тр}=14,3$ кВт; $z=6$; для варианта 2 $P_{дв.тр}=15,0$ кВт; $z=2$.

Таким образом, при практически одной и той же требуемой мощности привода главного движения 2-й вариант предпочтительнее, так как в этом случае значительно упрощается коробка скоростей.

Проектный расчет привода главного движения целесообразно проводить с использованием ЭВМ. Для этих целей в ЭНИМСе разработан пакет прикладных программ [2].

Предварительная оценка величины требуемой тяговой силы Q для различных типов направ-

ляющих линейно перемещающихся узлов станка может быть проведена по формулам табл. 10.4.

В качестве примера определим требуемую тяговую силу привода перемещения стола в режиме рабочей подачи.

Исходные данные: масса стола $m=5000$ даН; составляющие силы резания; $F_t=1000$ даН; $F_a=0,4F_r=0,4 \cdot 1000=400$ даН; $F_r=0,5F_t=0,5 \cdot 1000=500$ даН; направляющие скольжения (пара чугуна — чугуна); коэффициент трения скольжения $f=0,15$; $k=1,3$.

Максимальное значение требуемой тяговой силы $Q_{max}=1,3 \cdot 400 + 0,15(5000 + 500 + 1000) \approx 15000$ Н.

Для узлов с вращательным движением (например, поворотных столов) крутящий момент на выходном валу привода может быть определен по формуле $M_{кр} = R_n f m g$, где R_n — средний радиус направляющих стола; f — коэффициент трения; m — масса стола; $g=9,81$ м/с⁻² — ускорение свободного падения.

В качестве примера определим требуемый крутящий момент на выходном валу привода поворотного стола на направляющих скольжения.

Исходные данные: суммарный вес стола с приспособлением и заготовкой $m=4000$ Н; коэффициент трения $f=0,22$; $R_n=0,5$ м. $M_{кр} = 0,22 \cdot 4000 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \approx 4300$ Н · м.

Нижняя граница требуемой мощности на валу электродвигателя приводов подач линейно перемещающихся узлов может быть определена по формуле $P_{дв.тр} \geq Q_{max} v_{smax} / (60000\eta_n)$, где η_n — КПД привода подачи; при оценочных расчетах $\eta_n=0,7...0,9$.

Для рассчитываемого привода перемещения стола в режиме максимальной рабочей подачи ($\eta_n=0,7$)

$$P_{\text{дв тр}} \geq \frac{15\,000 \cdot 1,2}{60\,000 \cdot 0,7} = 0,43 \text{ кВт.}$$

Требуемый крутящий момент на валу электродвигателя приводов подач узлов с вращательным движением определяют по формуле $M_{\text{дв тр}} = M_{\text{кр}}/u_n \eta_n$, где u_n — передаточное число привода; при ориентировочных расчетах $\eta_n = 0,3 \dots 0,5$.

Для рассчитываемого привода поворота стола, предварительно приняв $u_n = 600$, $\eta_n = 0,4$, найдем

$$M_{\text{дв тр}} = \frac{4300}{600 \cdot 0,4} \approx 18 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Определять требуемую тяговую силу и выбирать мощность двигателя целесообразно с использованием ЭВМ.

Для этого в ЭНИМСе разработаны алгоритмы и программы расчета приводов подач [3].

Определение силовых параметров приводов подач станков с замкнутыми кинематическими цепями имеет свои особенности [5, 12].

Предварительная расчетная оценка производительности новой модели станка проводится при следующих исходных данных: средняя величина перемещения узла станка на одном переходе при рабочей подаче $L_{p_n} = 1000$ мм; при ускоренном перемещении $L_y = 1200$ мм; средняя скорость рабочей подачи $v_s = 200$ мм/мин; средняя скорость установочных перемещений $v_y = 1200$ мм/мин; среднее число переходов при обработке корпуса $n_n = 22$; коэффициент загрузки станка $K_s = 0,8$.

Штучное время обработки заготовки $t_{\text{шт}} = n_n(t_0 + t_y) + t_n + t_{\text{обс}} + t_{\text{отд}}$, где n_n — число переходов; t_0 — основное время; t_y — время ускоренных перемещений узлов станка; t_n — вспомогательное время; $t_{\text{обс}}$ — время на организационное и техническое обслуживание рабочего места; $t_{\text{отд}}$ — время на отдых и личные надобности.

Среднее значение основного времени выполнения одного перехода при обработке корпуса $t_0 = L_{p_n}/v_s = 1000/200 = 5$ мин.

Среднее значение времени ускоренных перемещений узла станка $t_y = L_y/v_y = 1200/6000 = 0,2$ мин.

Среднее значение вспомогательного времени, затрачиваемого на установку и снятие заготовки, ее зажим и разжим в приспособлении, смену инструмента, принимается $t_n = 10$ мин.

Среднее значение оперативного времени при обработке корпуса $t_{\text{он}} = n_n(t_0 + t_y) + t_n = 22(5 + 0,2) + 10 = 120$ мин.

Время на организационное и техническое обслуживание рабочего места $t_{\text{обс}} = a_{\text{обс}} t_{\text{он}} = 0,08 \times 120 = 9,6$ мин, где $a_{\text{обс}} = 0,08 \dots 0,09$.

Время на отдых и личные надобности $t_{\text{отд}} = a_{\text{отд}} t_{\text{он}} = 0,02 \cdot 120 = 2,4$ мин, где $a_{\text{отд}} = 0,02 \dots 0,03$.

Штучное время обработки заготовки $t_{\text{шт}} = 120 + 9,6 + 2,4 = 132$ мин.

Расчетная производительность станка $P_c = (60/t_{\text{шт}}) K_s = (60/132) \cdot 0,8 = 0,36$ шт/ч.

Таким образом, назначенные режимы обработки и выбранные основные параметры технической характеристики новой модели удовлетворяют требуемой производительности станка.

Оптимальную вместимость магазина определяют на основе изучения технологического процесса обработки большого числа деталей, эксплуатационных особенностей завода-потребителя, см. также работу [12].

10.4. Выбор основных параметров узлов станка на примере шпиндельного узла

Шпиндельный узел является одним из основных узлов станка, конструктивная форма и размеры которого влияют на компоновку и параметры других узлов, в частности коробки скоростей.

На предварительном этапе проектирования шпиндельного узла осуществляют следующее: выбирают тип опор и схему их расположения; определяют основные конструктивные параметры шпинделя; выбирают тип приводной передачи; выбирают значение предварительного натяга, класс точности и серию подшипников; выполняют приближенную оценку радиальной жесткости узла.

Тип опор шпинделя выбирают исходя из условий необходимости обеспечения заданной точности обработки и быстроходности узла, определяемой скоростным параметром dn , мм \times мин $^{-1}$, где d — диаметр шейки шпинделя под передней опорой, мм; n — частота вращения, мин $^{-1}$.

В большинстве случаев шпиндельные узлы металлорежущих станков проектируют на подшипниках качения. При этом применяют три основных типа шпиндельных подшипников: конические роликовые одно- и двухрядные ($dn \leq 3,0 \cdot 10^5$ мм \cdot мин $^{-1}$); двухрядные цилиндрические роликовые ($dn \leq 3,5 \cdot 10^5$ мм \times мин $^{-1}$); радиально-упорные ($dn \leq 11 \cdot 10^5$ мм \cdot мин $^{-1}$).

Для создания шпиндельных узлов в виде отдельных станочных модулей, сокращения сроков их проектирования и изготовления целесообразно применять типовые компоновочные схемы, приведенные в табл. 10.5. Такой подход в проектировании предусматривает постоянное обращение конструктора к автоматизированным

10.5. Типовые схемы шпиндельных узлов

| Узлы | Конструктивная схема | | Параметр быстроходности $dn \cdot 10^{-3}, \text{мм} \cdot \text{мин}^{-1}$ |
|------------------|----------------------|-------------------------------------|--|
| Низкоскоростные | 1 | $3182100 + 8100$ | 1,5 — 1,8 |
| | 2 | $697000 + 17000$ (2007700) | 2,0 — 2,5 |
| | 3 | $67000 + 17000$ | 2,5 — 3,0 |
| Среднескоростные | 4 | $3182100 + 178000$ | 2,5 — 3,5 |
| | 5 | $3182100 + 178000 + 46000K$ | 2,5 — 3,5 |
| | 6 | $36000K, 46000K$ | 3,0 — 4,5 |
| | 7 | $36000K, 46000K$ | 4,0 — 5,0 |
| Высокоскоростные | 8 | $36000K, 46000K$ | 5,0 — 6,0 |
| | 9 | $36000K, 46000K$ | 6,0 — 8,0 |
| | 10 | $36000K, 46000K$ | 6,0 — 8,0 |
| | 11 | $36000K, 46000K$ | 7,0 — 11,0 |

Примечания: 1. Обозначения: d — диаметр шейки шпинделя под передней опорой, мм; n — частота вращения шпинделя, мин^{-1} .

2. Первое число диапазона изменения параметра dn означает предельную быстроходность с пластичной смазкой, второе — с жидкой или смазкой масляным туманом.

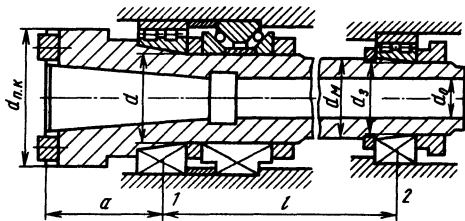


Рис. 10.4. Эскиз шпиндельного узла

справочникам (банкам данных), содержащим необходимую информацию: типовые схемы шпиндельных узлов, каталоги подшипниковых опор, стандарты на передние концы шпинделей и т. д.

Шпиндельные узлы металлорежущих станков обычно выполняются двухопорными.

Низкоскоростные схемы 1—3 рекомендуется применять для средних и тяжелых токарных, фрезерных и сверлильных станков при выпуске крупными сериями.

Среднескоростные схемы 4—7 рекомендуется применять в средних и тяжелых токарных, фрезерных, фрезерно-сверлильно-расточных станках.

Высокоскоростные схемы 8—11 рекомендуется применять в легких и средних шлифовальных станках, отделочно-расточных с особо высокими скоростями.

Отличительной особенностью данных схем является то, что осевая нагрузка воспринимается передней опорой; при этом задняя опора — плавающая. Этим повышается радиальная жесткость шпиндельного узла и уменьшаются тепловые деформации переднего конца в осевом направлении.

Основные размеры шпинделя, определяемые конструктором на стадии эскизного проекта, следующие: диаметр шейки шпинделя под передней опорой d ; вылет шпинделя a ; расстояние между опорами l ; диаметры участков шпинделя $d_{п.к.}$, d_m , d_0 .

Ориентировочно минимально необходимый для передачи мощности P диаметр шейки шпинделя под передней опорой d составляет (рис. 10.4):

для токарных, фрезерных, расточных и многоцелевых станков

$$d_{\min} = P / (0,15 \dots 0,35);$$

для электрошпинделей

$$d_{\min} = P / (0,70 \dots 0,85).$$

Вылет шпинделя a (рис. 10.4) зависит от параметров переднего конца для крепления инструмента или приспособления, размеров уплотнений под подшипники, а также ширины первого подшипника. Окончательное значение вылета определяют в результате прочерчивания узла в целом. При этом с точки зрения статических

и динамических характеристик вылет шпинделя необходимо выполнять как можно меньшим.

Расстояние между опорами предварительно принимают (по критерию радиального биения переднего торца шпинделя) равным $l = 3a$, которое затем корректируется в результате прочерчивания всех элементов шпиндельной группы и последующего расчета.

Диаметр переднего конца (см. рис. 10.4) принимается $d_{п.к.} = (1,0 \dots 1,2)d$ с учетом заданных в техническом задании типа и номера конусного отверстия в шпинделе и согласуют затем по соответствующим стандартам для данного типа станка.

Фланцевые передние концы исполнений I и II, а также под поворотную шайбу выполняют соответственно по ГОСТ 12595—85, ГОСТ 2324—77, ГОСТ 12593—72 и применяют в токарных, револьверных и шлифовальных станках; резьбовые передние концы конструируют согласно ГОСТ 16868—71 и применяют в токарных, токарно-револьверных и токарно-винторезных станках; концы шпинделей с конусностью 7:24 сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ и автоматической сменой инструментов, а также многоцелевых станков выполняют по ОСТ 2 У26-1—82, конус — по ГОСТ 15945—82.

Диаметр шпинделя между опорами d_m необходимо выполнять возможно большего размера: обычно $d_m = (0,9 \dots 1,0)d$, а для внутришлифовальных головок $d_m = 1,4d$. Диаметр шпинделя в задней опоре принимается $d_0 = (0,8 \dots 0,9)d$.

Диаметр сквозного отверстия d_0 (рис. 10.4) определяют с учетом размеров механизма зажима инструмента или диаметра прутка.

При выборе типа приводной передачи шпинделя (зубчатой или ременной) руководствуются заданной точностью станка, частотой вращения шпинделя и величиной передаваемых нагрузок. Для особо высокоточных станков наиболее целесообразно, чтобы вращение шпинделю передавалось ременной передачей на шкив, установленный через промежуточные опоры на задний конец шпинделя. В станках классов точности В и П желательно, чтобы крутящий момент передавался с помощью муфт, установленных соосно со шпинделем, а также от зубчатой или ременной передачи. В станках нормальной точности при нагрузках до 1000 даН и частотах

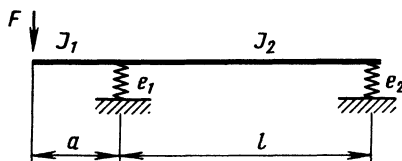


Рис. 10.5. Схема к расчету жесткости шпиндельного узла

10.6. Радиальные зазоры-натяги (мкм) для двухрядных роликоподшипников [8]

| $d_l \cdot 10^{-5}, \text{мм} \cdot \text{мин}^{-1}$ | Класс точности подшипников по ГОСТ 520—89 | | |
|--|---|---------|---------|
| | 5 | 4 | 2 |
| До 1 | —2...0 | —4...—2 | —6...—4 |
| До 1,6 | +1...+3 | —1...+1 | —2...0 |
| До 2 | +3...+5 | 0...+2 | —1...+1 |
| До 2,5 | +4...+6 | +2...+4 | +1...+3 |

вращения до 2000 мин^{-1} наиболее рационально использовать зубчатые передачи.

Главным критерием при выборе значения предварительного натяга подшипниковых опор качения являются условие нераскрытия стыка при низких скоростях и отсутствие проскальзывания тел качения по дорожкам качения при высоких скоростях.

Шпиндельные роликоподшипники типа 3182100 монтируют, как правило, с радиальным зазором, который в результате нагрева часто переходит в натяг.

Рекомендуемые радиальные зазоры-натяги двухрядных роликоподшипников приведены в табл. 10.6.

Опоры шпиндельных узлов с радиально-упорными шарикоподшипниками (см. табл. 10.5, компоновочные схемы (5—11) могут собираться с предварительными натягами: легкий (обозначается цифрой 1), средний (обозначается цифрой 2), тяжелый (обозначается цифрой 3).

Для большинства шпиндельных узлов прецизионных станков, работающих с низкими нагрузками, выбирают легкий натяг, для силовых шпиндельных узлов — средний. При тяжелом

натяге достигается небольшой выигрыш в жесткости (15—20%), но значительно ухудшаются остальные характеристики (уменьшается долговечность, увеличивается интенсионность тепловыделения в опорах). Поэтому он рекомендуется только при больших осевых или радиальных нагрузках.

Значения предварительного натяга радиально-упорных подшипников, рекомендуемые ЭНИМС [14], приведены в табл. 10.7.

Пружинный натяг в задней опоре (см. табл. 10.5, схемы 9—11) позволяет, в отличие от жесткого, автоматически регулировать натяг в подшипниковой опоре в процессе работы станка и тем самым повысить ресурс подшипников, но вызывает снижение жесткости и частоты собственных колебаний узла.

Выбор класса точности шпиндельных подшипников качения на стадии эскизного проекта для шпинделей на двух опорах осуществляют в соответствии с табл. 10.8, для шпинделей на трех или четырех опорах — в соответствии с табл. 10.9.

Выбор серии подшипников в значительной степени обусловлен заданной частотой вращения. При равных внутренних диаметрах

10.7. Значения предварительного натяга (даН) радиально-упорных подшипников [14]

| Диаметр отверстия подшипника d , мм | Подшипники | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| | 36100К, 36100КУ | | | 36200К, 36200КУ | | | 46100У | | | 46200У | | |
| | легкий | средний | тяжелый | легкий | средний | тяжелый | легкий | средний | тяжелый | легкий | средний | тяжелый |
| 30 | 8 | 24 | 48 | 11,5 | 35 | 70 | 13 | 39 | 78 | 19 | 57 | 114 |
| 35 | 9 | 27 | 54 | 13 | 39 | 78 | 15 | 45 | 90 | 21 | 63 | 126 |
| 40 | 10 | 30 | 60 | 18 | 54 | 108 | 16 | 48 | 96 | 29 | 87 | 174 |
| 50 | 13 | 39 | 78 | 23 | 69 | 138 | 21 | 63 | 123 | 36 | 108 | 216 |
| 60 | 18 | 54 | 108 | 32 | 96 | 192 | 31 | 93 | 186 | 51 | 153 | 306 |
| 70 | 24 | 72 | 144 | 38 | 114 | 229 | 39 | 107 | 214 | 61 | 183 | 366 |
| 80 | 30 | 90 | 180 | 46 | 138 | 276 | 49 | 147 | 294 | 74 | 222 | 444 |
| 90 | 36 | 108 | 216 | 62 | 186 | 372 | 58 | 174 | 348 | 102 | 306 | 612 |
| 100 | 41 | 123 | 246 | 79 | 237 | 474 | 65 | 195 | 390 | 127 | 381 | 762 |
| 110 | 53 | 159 | 318 | 86 | 258 | 516 | 86 | 258 | 516 | 141 | 423 | 846 |
| 120 | 55 | 165 | 330 | 90 | 270 | 540 | 89 | 267 | 534 | 145 | 435 | 870 |
| 140 | 72 | 216 | 432 | 110 | 330 | 660 | 115 | 345 | 690 | 180 | 540 | 1080 |
| 150 | 81 | 243 | 486 | 120 | 360 | 720 | 132 | 396 | 792 | 190 | 570 | 1140 |

10.8. Выбор класса точности подшипников качения для шпинделей на двух опорах

| Класс точности станка | Класс точности радиальных подшипников опор | | Класс точности упорных подшипников |
|-----------------------|--|--------|------------------------------------|
| | передней | задней | |
| Н | 5 | 5 | 5 |
| П | 4 | 5 | 5 |
| В | 2 | 4 | 4 |
| А | 2 | 2 | 4 |
| С | 2 | 2 | 2 |

10.9. Выбор класса точности подшипников качения для шпинделей на трех или четырех опорах

| Класс точности станка | Класс точности радиальных подшипников опор | | | Класс точности упорных подшипников |
|-----------------------|--|---------|--------|------------------------------------|
| | передней | средней | задней | |
| Н | 5 | 5,6 | 0 | 5 |
| П | 4 | 5 | 5 | 5 |
| В | 2 | 4 | 4 | 4 |

быстроходность подшипников легкой серии выше, а жесткость, нагрузочная способность ниже соответствующих показателей подшипников более тяжелых серий.

Переход на более легкие серии при том же наружном диаметре приводит к снижению быстроходности и нагрузочной способности подшипников, но обеспечивает повышение жесткости и существенное улучшение динамических характеристик в основном благодаря увеличению диаметра шпинделя. Применение подшипников более легких серий для высокоскоростных шпинделей ($dn > 5 \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$) позволяет обеспечить удаление от зоны резонанса благодаря повышению собственных частот в результате использования шпинделей больших диаметров при заданных наружных диаметрах подшипников.

Приближенную оценку радиальной жесткости узла, учитывающую упругие деформации шпинделя и его опор под действием силы резания F на переднем торце, можно осуществить с помощью формулы $j = 1/e_R$. Здесь e_R — радиальная податливость узла, определяемая по зависимости (см. рис. 10.5) $e_R = a^2 / [3E \times$

$\times (a/J_1 + l/J_2)] + e_1(a+l/l)^2 + e_2a^2/l^2$, где a , l — длины участков; J_1 , J_2 — моменты инерции соответственно передней и межопорной части шпинделя; e_1 , e_2 — радиальная податливость опор; E — модуль упругости.

Податливость опор при оценочном расчете можно определять по графикам (рис. 10.6 — 10.8).

Графики строят на основании зависимостей.

Для двухрядных роликоподшипников типа 3182100 (см. рис. 10.6) радиальная податливость (мкм/Н)

$$e = 28 \cdot 10^{-3} [1/(z'l_p)] (\lg 15,2 \cdot 10^5 \cdot d_p l_p z / F - 0,4343),$$

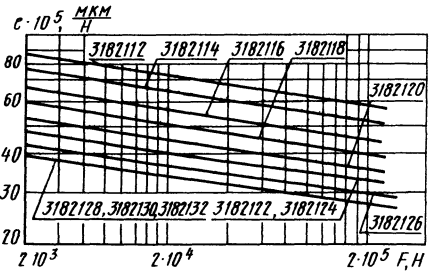


Рис. 10.6. Графики зависимости податливости от радиальной нагрузки для двухрядных роликоподшипников типа 3182100

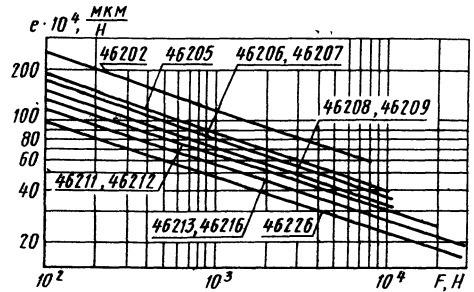


Рис. 10.7. Графики зависимости податливости от радиальной нагрузки для радиально-упорных шарикоподшипников типа 46200

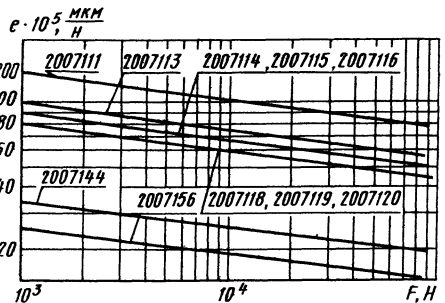


Рис. 10.8. Графики зависимости податливости от радиальной нагрузки для роликоподшипников типа 2007100

где z — число роликов; l_p, d_p — длина и диаметр ролика, мм; F — нагрузка на подшипник, Н.

Для радиально-упорных шарикоподшипников типов 36000 и 46000 (см. рис. 10.7, 10.8) радиальная податливость (мкм/Н)

$$e = 186,7 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{\frac{100}{Fz^2 d_{ш} \cos^2 \alpha}}$$

где z — число шариков; $d_{ш}$ — диаметр шарика, мм; α — угол контакта, °.

Радиальную податливость опоры, состоящей из нескольких радиально-упорных шарикоподшипников (компоновочные схемы № 1—5), определяют по формуле $e = e' \cdot 1,2/k$, где e' — податливость одного подшипника; 1,2 — коэффициент, учитывающий неравномерность нагружения подшипников; k — число подшипников в опоре.

Для конических роликоподшипников типа 2007100 (см. рис. 10.8) радиальная податливость (мкм/Н)

$$e = 56 \cdot 10^{-3} \frac{1}{z l_p \cos \alpha} (\lg 7,6 \cdot 10^5 d_p l_p \times \\ \times z \cos \alpha / F - 0,4343),$$

где α — угол конуса, °.

Радиальную податливость опоры со сдвоенным или двумя коническими роликоподшипниками (компоновочная схема № 2) определяют путем уменьшения в 1,7 раза значения податливости, определенного для одного подшипника.

При уточненном расчете радиальной жесткости шпиндельного узла следует учесть заземляющий момент в передней опоре, деформацию сдвига под действием поперечной силы (силы резания), а также результирующее усилие в зацеплении шестерни с зубчатым колесом, расположенным между опорами шпинделя.

Податливость опоры, состоящей из нескольких подшипников, определяется по формуле $e = e' \cdot 1,2/k$, где e' — податливость одного подшипника; 1,2 — коэффициент, учитывающий неравномерность нагружения подшипников; k — число подшипников в опоре.

Минимально допустимая радиальная жесткость для большинства станков общего назначения $j_{\min} = 250$ Н/мкм, для прецизионных станков $j_{\min} = 500$ Н/мкм.

Проектный расчет шпиндельного узла целесообразно проводить с использованием ЭВМ. Для этих целей в ЭНИМСе разработаны алгоритмы и программы [4].

Пример. Для шпиндельного узла фрезерного станка: 1) выбрать тип опор и схему их расположения; 2) определить основные размеры и радиальную жесткость узла.

Исходные данные: мощность привода главного движения $P = 15$ кВт; максимальная частота вращения шпинделя $n_{\max} = 2800$ мин⁻¹; класс точности станка — Н; параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra = 20$ мкм;

конус шпинделя 7:24 (№ 50); размеры рабочей поверхности стола 1600×1600 мм.

Для проектируемого шпиндельного узла в соответствии с ГОСТ 9726 — 83Е и заданным параметром шероховатости по табл. 10.5 в качестве опор шпинделя принимаем подшипники качения.

Для проектируемого станка с целью получения требуемой жесткости узла при выборе диаметра шейки под передней опорой принимаем минимальное значение знаменателя из диапазона возможных. Таким образом, $d = 15; 0,15 = 100$ мм.

Параметр быстроходности шпиндельного узла $dn = 100 \cdot 2800 = 2,8 \cdot 10^5$ мм·мин⁻¹.

Согласно табл. 10.5 при $dn = 2,8 \cdot 10^5$ мм × мин⁻¹ выбираем компоновочные схемы 4 и 5.

Основной геометрический параметр шпинделя $d_{пк} = (1,0 \dots 1,2)100 = 100 \dots 120$ мм.

В соответствии с типом станка и заданным конусом шпинделя по ОСТ 2 У26-1 — 82 принимаем $d_{пк} = 128,57$ мм, $d_m = (0,9 \dots 1,0)100 = 90 \dots 100$ мм; принимаем $d_m = 90$ мм; $d_3 = (0,8 \dots 0,9)100 = 80 \dots 90$ мм; принимаем $d_3 = 80$ мм.

Диаметр сквозного отверстия в шпинделе предварительно принимаем $d_0 = 50$ мм.

Ориентировочно принимаем вылет шпинделя $a = 100$ мм, расстояние между опорами $l = 3 \cdot 100 = 300$ мм.

Радиальная жесткость и прогиб переднего торца шпинделя определяют для двух вариантов компоновочных схем узла.

Вариант 1 (компоновочная схема 4): передняя опора — роликоподшипник 3182120 ($100 \times 150 \times 37$); задняя опора — роликоподшипник 3182116 ($80 \times 125 \times 34$).

Вариант 2 (компоновочная схема 5): передняя опора — роликоподшипник 3182120; задняя опора — два шарикоподшипника 46216 ($80 \times 140 \times 26$).

Тангенциальная составляющая силы резания $F_t = 10000$ Н, составляющие силы резания $F_r = F_a = 0,5 F_t = 0,5 \cdot 10000 = 5000$ Н.

Сила резания, действующая на передний торец шпинделя,

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_r^2} = \sqrt{10000^2 + 5000^2} \approx 11200 \text{ Н.}$$

Реакции в опорах (рис. 10.4): $F_1 = 14700$ Н; $F_2 = 3700$ Н.

Моменты инерции передней и межопорной частей шпинделя соответственно равны $J_1 = 46 \cdot 10^5$ мм⁴; $J_2 = 29 \cdot 10^5$ мм⁴.

По графикам (см. рис. 10.6, 10.7) определяем податливость подшипников: $e = 0,42 \times 10^{-3}$ мкм/Н (подшипник 3182120); $e = 0,61 \cdot 10^{-3}$ мкм/Н (подшипник 3182116); $e = 3,71 \cdot 10^{-3}$ мкм/Н (подшипник 46216).

Результаты расчета шпиндельного узла приведены в табл. 10.10. Очевидно, что радиальная жесткость узла по обоим вариантам практически одинакова. Однако вариант 2 шпиндельного узла (схема 5) имеет преимущество перед вариантом 1 с точки зрения требований к точности изготовления посадочных поверх-

10.10. Параметры жесткости шпиндельного узла

| Параметр | Вариант | |
|--|--------------|--------------|
| | 1 | 2 |
| Податливость опоры, мкм/Н: передней $e_1 \cdot 10^3$ задней $e_2 \cdot 10^3$ | 0,42 0,61 | 0,42 2,20 |
| Радиальная жесткость j , Н/мкм | 360 | 330 |
| Прогиб переднего торца δ , мкм | 31 | 34 |
| Допустимый прогиб $[\delta]$, мкм | 60 | |

ностей подшипниковых опор в корпусе фрезерной головки, которые для варианта 2 менее жесткие (вследствие возможности самоустановки радиально-упорных подшипников).

Окончательный вариант компоновочной схемы принимают в результате вычерчивания шпиндельного узла, а также расчетов на жесткость, виброустойчивость (для высокоскоростных схем) и температурного расчета.

10.5. Приближенная оценка точности станка

Требования к точности станков регламентированы ГОСТами на нормы точности станков и ТУ на станки отдельных типов. Регламентируются также требования к точности изготовленных образцов изделий.

Станки проектируют с запасом точности, учитывающим неизбежную потерю точности при эксплуатации и ужесточение требований к точности станков. При проектном расчете принято использовать осредненные значения отклонений, полученные статистической обработкой большой совокупности наблюдений.

Для установления и нормирования необходимой точности станков и их узлов на ранних этапах проектирования удобно использовать значения статистических зависимостей точности, установленные в результате опыта.

Значения отклонений основных параметров принимают в большинстве случаев пропорциональными корню квадратному из значения исходного размера [11].

Конкретные значения допустимых отклонений принимают по соответствующим ГОСТам на нормы точности станков.

Отклонения основных геометрических параметров станка приводят к отклонению размеров и формы детали и носят систематический характер.

Ниже показано влияние отклонений основных геометрических параметров станков на точность обработки изделий [11].

Параметры станков и их отклонения

Отклонения формы и расположения поверхностей изделий

Точность рабочих органов (узлов)

Шпиндельные узлы вращения заготовки

Радиальное биение оси вращения

Отклонение профиля продольного сечения (седлообразность, бочкообразность)

Радиальное биение отверстия шпинделя и центра

Радиальное, уменьшающееся до нуля у задней бабки, биение относительно оси центров

Радиальное биение центрирующего буртика патрона

Радиальное биение относительно поверхности зажима; разбивка отверстий, обрабатываемых многолезвийным инструментом

Осевое биение шпинделя

Осевое биение и отклонение от плоскостности торцевой поверхности

Торцовое биение центрирующего буртика

Отклонение от перпендикулярности оси обработанной поверхности по отношению к опорной поверхности

Шпиндельные узлы вращения инструмента

Радиальное биение отверстия шпинделя

Разбивка отверстия, обрабатываемого многолезвийным инструментом; волнистость поверхности при фрезеровании и шлифовании боковой поверхностью инструмента

Отклонение от прямолинейности выдвигного расточного шпинделя и его перемещения

Отклонение от прямолинейности обрабатываемых профилей продольного сечения (конусообразность) расточенных отверстий

Круглые поворотные столы, планшайбы

Отклонение от плоскостности рабочей поверхности

Отклонение от плоскостности обработанной поверхности

Радиальное биение оси

Радиальное биение относительно оси поверхности зажима

Столы прямоугольные

Отклонение от плоскостности рабочей поверхности стола

Отклонение от плоскостности обработанной поверхности

Отклонение от параллельности рабочей поверхности стола направлению его перемещения

Отклонение от параллельности обработанной поверхности по отношению к базовой поверхности при фрезеровании, строгании и шлифовании

Отклонение от параллельности среднего паза направлению его перемещения

Отклонение от перпендикулярности продольного по отношению к поперечному перемещению стола

Ходовой винт

Осевое и радиальное биение

Отклонение шага

Отклонение оси винта от соосности по отношению к винтовой поверхности

Точность взаимного расположения и взаимного перемещения узлов

Станки для изготовления тел вращения

Отклонение оси вращения шпинделя от параллельности направлению перемещения рабочего органа (суппорта), проверяемое в плоскости обработки по оправке, установленной в отверстии шпинделя

Отклонение оси вращения шпинделя от перпендикулярности к направлению поперечного перемещения рабочего органа (суппорта)

Отклонение от параллельности направляющих суппорта и задней бабки; отклонение от параллельности оси пиноли направляющим суппорта

Отклонение от соосности инструментов револьверной головки по отношению к оси шпинделя; отклонение граней револьверной головки от перпендикулярности к оси шпинделя

Отклонение от параллельности обработанной боковой поверхности по отношению к базовой поверхности, ориентированной по среднему пазу стола

Отклонение от перпендикулярности по отношению друг к другу поверхностей, фрезерованных с одной установки, отверстий, обработанных с подводом стола при продольном и поперечном перемещении стола

Циклическая погрешность резьбы

Уменьшение отклонения шага вследствие компенсации погрешностей в паре винт—гайка

Отклонение шага вследствие смещения осей винта и гайки в пределах радиального зазора

Отклонение профиля продольного сечения (конусообразность) изделия, обработанного при консольном зажиме

Отклонение от плоскостности торца

Отклонение профиля продольного сечения (конусообразность) изделий

Разбивка отверстий, обработанных многолезвийным инструментом; отклонение диаметра изделия при настройке на размер вне станка

Станки для изготовления корпусных деталей

Отклонение от перпендикулярности оси сверлильного шпинделя к поверхности стола или к направлению движения стола или шпиндельной бабки

Отклонение от перпендикулярности оси фрезерного шпинделя к поверхности стола или к направлению движения стола или шпиндельной бабки

Отклонение от параллельности оси шпинделя поверхности стола

Отклонение от перпендикулярности осей отверстий по отношению к базовой плоскости

Отклонение поверхности обработки от параллельности базовой плоскости; при наклоне в плоскости движения подачи повышенная шероховатость обработанной поверхности

Отклонение от параллельности поверхности обработки по отношению к базовой плоскости, осям расточек и базовой плоскости

10.6. Техничко-экономическое обоснование эффективности создания новой модели станка

Предварительная оценка экономической эффективности создания новой модели станка может быть проведена путем сравнения проектируемого и базового станков по критерию срока окупаемости дополнительных капитальных вложений $T_{ок} = (K_2 - K_1) / (C_1 - C_2)$, где K_1 — капитальные вложения потребителя при использовании базового станка, рассчитанные на годовой объем продукции, руб.; K_2 — капитальные вложения потребителя при использовании нового станка, руб.; C_1 — себестоимость по базовому варианту, рассчитанная на годовой объем продукции, руб.; C_2 — себестоимость годового объема продукции, производимой на новом станке.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений рассчитывают в следующей последовательности:

выявляют конструктивные и эксплуатационные преимущества новой модели;

выбирают и обосновывают базовый вариант; определяют исходные данные для новой модели и базового варианта;

рассчитывают оптовую цену станка; определяют коэффициент роста производительности нового станка в соответствии с отраслевым нормативным документом РД 2 НОБ-45 — 87;

рассчитывают капитальные вложения; определяют себестоимость годового объема продукции;

рассчитывают срок окупаемости дополнительных капитальных вложений.

За базу сравнения при расчетах эффективности на стадии проектирования новой модели станка принимают: лучшую технику, спроектированную в России или за рубежом и имеющую аналогичное функциональное назначение; лучшую технику, имеющуюся в России (при отсутствии подобных проектных разработок в России и невозможности использования зарубежного опыта); заменяемую модель станка.

Оптовую цену нового и базового станков рассчитывают на основании данных, приведенных в работе [10]. При этом плановую себестоимость изготовления нового станка определяют исходя из себестоимости и трудоемкости, полученных при изготовлении аналогичного по конструктивному исполнению и функциональному назначению серийно выпускаемого оборудования.

При укрупненных расчетах трудоемкость изготовления новой модели станка можно определить по показателям удельной трудоемкости базового станка, а затем откорректировать эту трудоемкость усложнения конструкции с помощью коэффициента $k > 1$.

Капитальные вложения в производственные фонды включают в себя: проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР); разработку технического предложения, технического и рабочего проектов; технологическую подготовку производства; изготовление и испытание опытного образца.

Перечисленные затраты ориентировочно (млн. руб.) можно рассчитать по эмпирическим формулам (данные на 01.01.93 г.):

$$\text{затраты на проведение НИОКР } Z_1 = - (30 \dots 25) + 3k_n + 5k_{cl} - 13k_{ny};$$

$$\text{затраты на разработку технического предложения, технического и рабочего проекта } Z_2 = - (17 \dots 12) + 2,2k_n + 5,4k_{cl} - 11k_{ny};$$

затраты на технологическую подготовку производства

$$Z_3 = - (27 \dots 18) + 2k_n + 8k_{cl} - 16k_{ny};$$

затраты на изготовление и испытание опытного образца $Z_4 = - (117 \dots 90) + 10k_n + 15k_{cl} - 1,4k_{ny}$, где $k_n = 5 \dots 8,5$ и $k_{cl} = 1,0 \dots$

$\dots 3,65$ — коэффициенты, учитывающие степень соответственно новизны и сложности станка; $k_{ny} = 0,1 \dots 0,8$ — коэффициент, учитывающий применяемость в новой конструкции унифицированных и стандартизованных изделий; m — масса станка, т.

Затраты (млн. руб./шт) по НИОКР, приходящиеся на один станок, $Z = \sum Z_i \alpha_i / A_{cp}$ ($i = 1, 2, 3, 4$). Здесь Z_i — составляющая затрат на про-

ведение НИОКР по конкретному году; α_i — коэффициент приведения разновременных затрат; A_{cp} — среднегодовой выпуск нового станка,

$$A_{cp} = \sum_{t=1}^5 A_t / 5,$$

где A_t — планируемый выпуск нового станка в t -м году, шт: ($1 \leq t \leq 5$).

Значения коэффициента α_i приведены в табл. 10.11.

Время t отсчитывают от года запуска в производство до соответствующей стадии разработки нового станка. Например, если выпуск новой модели планируется на 1994 г., а разработка технической документации на станок выполняется в 1992 г., то $t=2$ и соответственно $\alpha_1=1,21$; расчетные затраты на этой стадии разработки составят $\alpha_1 Z_2 = 1,21 Z_2$.

Себестоимость изготовления годового объема продукции определяют как сумму следующих затрат: на заработную плату станочника $S_{зн}$; на амортизационные отчисления на полное восстановление станка $A_{об}$; капитальный и текущий ремонт станка $S_{кр}$; на ремонт и амортизацию оснастки (приспособлений) $S_{осн}$; на электроэнергию, израсходованную на технологические цели, S_e .

Таким образом, себестоимость изготовления годового объема продукции $C = S_{зн} + A_{об} + S_{кр} + S_{осн} + S_e$.

Каждую из перечисленных статей затрат рассчитывают по следующим формулам:

заработная плата станочника $S_{зн} = S_{ч} T_{шт} / d$, где $S_{ч}$ — среднечасовая заработная плата станочника со всеми начислениями, тыс. руб./ч, принимаемая в зависимости от разряда станочника по табл. 8, приведенной в отраслевом документе МУ 2.5—81; $T_{шт}$ — годовое штучное время обработки заготовок на станке, ч; d — число станков, обслуживаемых одним рабочим.

При укрупненных расчетах годовое время обработки заготовок определяют по формулам:

для нового станка $T_{шт2} = \Phi_{об} k_s$, где $\Phi_{об}$ — фактический годовой фонд времени работы оборудования, ч, принимаемый в зависимости от

10.11. Значения коэффициента приведения затрат α_i

| t , год | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| α_i | 1,1000 | 1,2100 | 1,3310 | 1,4641 | 1,6105 |
| t , год | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| α_i | 1,7716 | 1,9487 | 2,1436 | 2,3579 | 2,5937 |

Список литературы

1. **Аверьянов О. И.** Модульный принцип построения станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.
2. **Автоматизированная** подсистема расчетно-конструкторских работ «Главный привод»// Станки и инструмент. 1979. № 7. С. 1—11.
3. **Автоматизированная** подсистема расчетно-конструкторских работ «Привод подач и вспомогательных перемещений»//Станки и инструмент, 1983. № 8. С. 15—26.
4. **Автоматизированная** подсистема расчетно-конструкторских работ «Шпиндельный узел»// Станки и инструмент. 1984. № 2. С. 6—29.
5. **Бобров А. Н., Перченко Ю. Г.** Автоматизированные фрезерные станки для объемной обработки. Л.: Машиностроение, 1979. 231 с.
6. **Врагов Ю. Д.** Анализ компоновок металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.
7. **Детали и механизмы металлорежущих станков/Д. Н. Решетов, В. В. Каминская, А. С. Ланидус и др.; Под ред. Д. Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1972. Т. 1. 663 с. Т. 2. 520 с.**
8. **Лизогуб В. А.** Конструирование и расчет шпиндельных узлов, направляющих и механизмов металлорежущих станков. М.: Изд. ВЗМИ, 1985. 85 с.
9. **Металлорежущие станки и автоматы/ А. С. Проников, Н. И. Камышный, Л. И. Волчкович и др.; Под ред. А. С. Проникова. М.: Машиностроение, 1981. 479 с.**
10. **Орлов П. И.** Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. М: Машиностроение, 1988. Т. 1. 560 с. Т. 2. 544 с.
11. **Решетов Д. Н., Портман В. Т.** Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
12. **Станки с числовым программным управлением (специализированные)/Н. А. Богданов, У. Г. Говберг, М. И. Доброммыслин и др.; Под ред. В. А. Лещенко. М.: Машиностроение, 1979. 592 с.**
13. **Федотенок А. А.** Кинематическая структура металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1970. 407 с.
14. **Фигатнер А. М.** Прецизионные подшипники качения современных металлорежущих станков. М.: НИИМАШ, 1980. 72 с.
15. **Weck M.** Werkzeugmaschinen. Bd. 2. Konstruktion und Berechnung. Düsseldorf: VDI — Verlag, 1985. 350 S.

сменности работы и массы станка по Приложению 5, приведенному в отраслевом документе МУ2.5—81; k_3 — коэффициент загрузки оборудования, $k_3 = 0,8 \dots 0,9$ для единичного и мелкосерийного производства; $k_3 = 0,75 \dots 0,85$ для серийного производства; $k_3 = 0,65 \dots 0,75$ для крупносерийного и массового производства; для базового станка $T_{шт1} = x T_{шт2}$, где x — коэффициент роста производительности, определяемый по отраслевому нормативному документу РД 2НО6-45—87;

амортизационные отчисления на полное восстановление станка $A_{об} = \alpha_p C_{об} / 100$, где α_p — норма амортизационных отчислений на полное восстановление станка, %, принимаемая по табл. 13, приведенной в отраслевом документе МУ2.5—81; $C_{об}$ — балансовая стоимость станка, тыс. руб.; балансовая стоимость станка $C_{об} = 1,1 C_{об\beta}$, где $C_{об}$ — оптовая цена станка, тыс. руб.; β — коэффициент приведения, определяемый по отраслевому нормативному документу МУ2.5—81;

затраты на капитальный и текущий ремонт станка $S_{кр} = \alpha_{кр} C_{об} / 100$, где $\alpha_{кр}$ — норма амортизационных отчислений на капитальный и текущий ремонт, %, принимаемая по табл. 13, приведенной в отраслевом документе МУ2.5—81;

затраты на ремонт и амортизацию оснастки $S_{осн} = \alpha_{осн} C_{осн}$, где $\alpha_{осн}$ — коэффициент, учитывающий затраты на ремонт и амортизацию оснастки; при укрупненных расчетах для станков с ручным управлением принимают $\alpha_{осн} = 0,6$, для станков с ЧПУ $\alpha_{осн} = 0,3$; $C_{осн}$ — стоимость используемой оснастки, тыс. руб.; затраты на силовую электроэнергию $S_3 = C_3 P_3 \Phi_{об}$, где $C_3 = 6,0$ руб. — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; P_3 — суммарная мощность электродвигателей станка, кВт.

Нормативный срок $T_{окн}$ окупаемости дополнительных капитальных вложений, для металлорежущих станков принимают $T_{окн} = 6$ лет (при нормативном коэффициенте эффективности $E_n = 0,15$).

Таким образом, предварительный расчет экономической эффективности создания новой техники позволяет конструктору оценить на стадии проектирования целесообразность разработки и изготовления той или иной модели станка.

При эксплуатации нового станка требуется корректировка и уточнение составляющих затрат экономического расчета, а также рекомендуется разработка мероприятий по их сокращению.

Глава 11

Компоновка станка

11.1 Структура компоновок

Компоновка станка — это система расположения узлов и направляющих станка, характеризующаяся структурой, пропорциями и свойствами [4].

Технологическая схема построения станка, в которой в соответствии с технологической задачей определяют состав рабочих и установочных движений, число необходимых шпинделей, схему обработки, число различных по назначению позиций и размеры, называется *технологической компоновкой*.

Компоновку, раскрывающую состав и порядок сочетания координатных движений в станке, называют *координатной*.

Компоновка, определяющая тип станка по разновидностям базовых узлов и другим признакам, называется *базовой*.

Компоновка, уточняющая конструктивное исполнение и некоторые другие особенности станка, называется *конструкционной*.

Обработка заготовок на металлорежущих станках основана на относительном перемещении заготовки и режущего инструмента. Любая траектория движения может быть составлена из шести элементарных движений — трех поступательных вдоль ортогональных осей координат и трех вращательных относительно тех же осей.

Схемы сочетаний элементарных движений при резании классифицируют по следующим группам [5, 8]: одно прямолинейное движение (протягивание); два прямолинейных движения (разрезание ленточными силами); одно вращательное движение (протягивание круговых сегментов); одно вращательное и одно прямолинейное движение (точение, сверление, фрезерование); два вращательных движения (фрезерование тел вращения); два прямолинейных и одно вращательное движение (затылование червячных фрез); два вращательных и одно прямолинейное движение (зубофрезерование червячными фрезами); три вращательных движения (нарезание конических зубчатых колес с дуговыми зубьями резовыми головками).

Бывают сочетания и более чем трех элементарных движений.

В каждой из перечисленных групп схемы движений различают по взаимному направлению движений, распределению движений между инструментом и заготовкой, а также соотношению скоростей. Поступательное движение может быть параллельным, перпендикулярным или направленным под углом к оси вращательного движения, причем линия движения вершины инструмента может пересекаться или не пересекаться с этой осью.

Характер движения формообразования допускает различные варианты распределения элементарных составляющих движения между заготовкой и инструментом: вращательное движение выполняет заготовка, а поступательное — инструмент (токарный станок); вращательное движение выполняет инструмент, а поступательное — заготовка (алмазно-расточной станок); оба движения выполняет заготовка (токарные автоматы продольного точения); оба движения выполняет инструмент (расточной станок с выдвижным шпинделем).

Компоновка металлорежущего станка обеспечивает выполнение всех элементарных движений формообразования и предусматривает возможность осуществления ряда дополнительных движений: врезания, установочных, дублирующих, деления, вспомогательных и др.

Компоновка металлорежущего станка имеет блочную структуру и состоит из одного стационарного и нескольких подвижных блоков, разделенных линейными или круговыми направляющими. Каждый подвижный блок выполняет определенное координатное движение. Число направляющих равно числу элементарных движений, предусмотренных кинематической структурой станка, или меньше его.

Станок, будучи составной частью замкнутой технологической системы, является системой разомкнутой. Блоки, несущие заготовку и инструмент, в компоновке станка всегда являются крайними. Эти блоки осуществляют относительное движение заготовки и инструмента, соответствующее принятому способу формообразования [4].

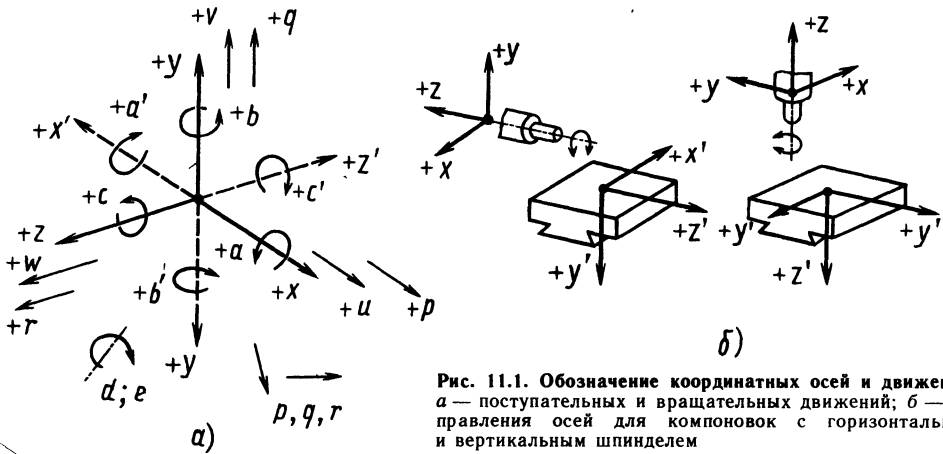


Рис. 11.1. Обозначение координатных осей и движений: *a* — поступательных и вращательных движений; *б* — направления осей для компоновок с горизонтальным и вертикальным шпинделем

Структурная формула компоновки — это определенная последовательность символов, обозначающих блоки компоновки, раскрывающая координатную принадлежность и способ сопряжения блоков. В структурных формулах используют систему обозначения осей координат и координатных движений, предназначенную для металлорежущих станков с программным управлением.

Координаты *X* и *Y* независимо от расположения оси шпинделя обозначают наиболее распространенную плоскостную обработку заготовки. За положительное направление оси *Z* принимают направление от заготовки к инструменту. Ось *X* — всегда горизонтальная. Если ось *Z* вертикальная, то положительное направление оси будет вправо, если смотреть с лицевой стороны станка в сторону тыльной. Если ось *Z* горизонтальная, то положительное направление оси *X* будет вправо, если смотреть в направлении от шпинделя к заготовке. Положение оси *Y* определяется по расположению двух других осей. Поступательные движения инструмента вдоль осей координат обозначают так же, как и соответствующие оси. На рис. 11.1 показано направление осей для двух компоновок. Дополнительные движения, параллельные осям *X*, *Y*, *Z*, обозначают соответственно *u*, *v*, *w*. Вращательные

движения вокруг осей обозначают соответственно буквами *a*, *b*, *c*. Вращение шпинделя обозначают буквой *C*. Для вертикального исполнения шпинделя C_v , для горизонтального C_h . Стационарный блок обозначают *O*.

На рис. 11.2 показаны широко распространенные компоновки металлорежущих станков. Компоновке вертикального консольно-фрезерного станка (рис. 11.2, *a*) отвечает структурная формула $XYZOC_v$, в которую входят обозначения последовательного-сопряженных блоков: стола *X*, салазок *Y*, консоли *Z*, станины *O* и вертикального шпинделя C_v . В формуле $COZXBwd$ компоновки токарного станка (рис. 11.2, *б*) строчными буквами обозначены установочные блоки: поворотные салазки суппорта и поворотная резцедержавка. В формуле D_vuOXC/Z_v компоновки зубодолбежного станка (рис. 11.2, *в*) в виде дроби записаны штоссель, совершающий одновременно вращательное и поступательное движения. В формуле компоновки агрегатного сверлильного станка (рис. 11.2, *г*) с поворотным столом, вертикальной и двумя горизонтальными головками $d_vO(ZAC_v + Y4B + X2A)$ цифры указывают число параллельных шпинделей с одинаковым характером движений. Более подробно обозначение и составление структурных формул на компоновки металлорежущих станков описаны в работе [4].

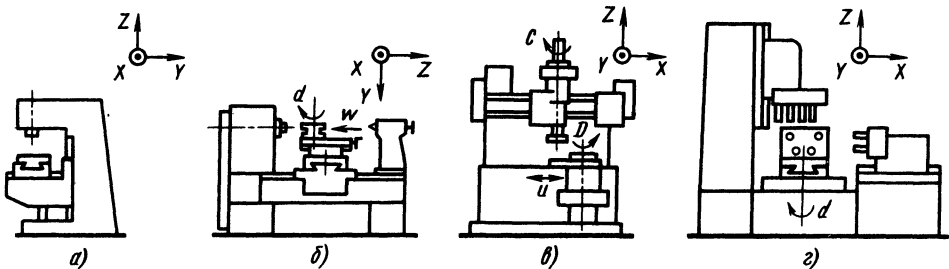


Рис. 11.2. Компоновка станков

11.2. Формирование структуры парка металлорежущих станков

Совокупность типоразмеров металлорежущих станков, предназначенных для обработки массивов заготовок, называют *парком станков*.

Массив деталей, являющийся исходной информацией для формирования структуры парка станков, определяют представительной выборкой, позволяющей получить определенное число точек дискретной функции $N_i(x_i)$, где N_i — число деталей данного класса с характерным размером x_i . Объем выборки обрабатываемых заготовок, содержащий p групп, имеет вид

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^p N_i.$$

Массив деталей в общем случае не совпадает с представительной выборкой, а лишь подобен ей, т. е. отличается масштабом (число заготовок N_{Σ}) и числом групп p (рис. 11.3).

Структура парка металлорежущих станков определяется номенклатурой станков с размерным рядом по характеристическому параметру b_k , принимающему r значений ($1 \leq k \leq r$), и числом станков y_k каждого размера b_k .

При определении оптимальной структуры парка станков могут быть поставлены различные цели: достижение минимума затрат при обработке массива заготовок, достижение минимума затрат при изготовлении парка станков и минимум народнохозяйственных затрат при обработке массива деталей. Здесь принимается вторая цель, поскольку она при заданном массиве деталей связана главным образом со структурой парка через параметры r , y_k и b_k . Целевая функция в этом случае имеет следующий вид:

$$W = \min T_{\Sigma} = \min \sum T_1(b_k) T' [y_k(b_k) y_k], \quad (11.1)$$

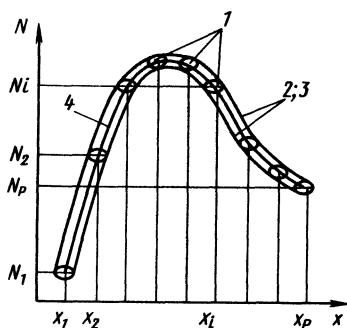


Рис. 11.3. Характеристики массива обрабатываемых деталей:

1 — $N(x_i)$ — представительная выборка; 2 — выборка с учетом вероятности значений $N_i(x_i)$; 3 — кривая $N(x)$, проходящая через точки $N_i(x_i)$; 4 — плавная кривая $N(x)$, проходящая через точки $N_i(x_i)$

где T_{Σ} — суммарная трудоемкость изготовления парка металлорежущих станков; $T_1(b_k)$ — трудоемкость изготовления одного станка; $T'[y_k(b)]$ — относительная трудоемкость изготовления станков, зависящая от объема выпуска станков.

Решением целевой функции (11.1), где все параметры b_k , кроме b_1 и b_r , и число r являются неизвестными, должны быть размерные ряды и число станков каждого параметра b_k .

Независимо от способа решения задачи оптимизации структуры парка станков суммируемые слагаемые целевой функции выражаются через параметры массива заготовок. В этом случае целевая функция примет следующий вид:

$$W = \min T_{\Sigma} = \min \sum T_1(x_k) T' [y_k(x_k, x_{k-1})] y_{k,k-1}. \quad (11.2)$$

В качестве исходной информации для определения структуры парка станков необходимо иметь описание массива обрабатываемых заготовок по определенным признакам. За генеральную совокупность исходной информации целесообразно принять совокупность заготовок, обрабатываемых в основных цехах машиностроительных заводов на соответствующих станках по типам и размерам. Такая совокупность заготовок необходима, поскольку для ее изучения используется выборочный метод, заключающийся в установлении обобщенных характеристик генеральной совокупности путем изучения не всех, а только части составляющих ее элементов, достаточно хорошо отображающих пропорции и характерные черты генеральной совокупности.

На рис. 11.4 и 11.5 в качестве примера приведены некоторые характеристики обрабатываемых корпусных деталей на предприятиях десяти отраслей, полученные на основе анализа 16000 заготовок. Поскольку основным параметром изготавливаемых корпусных заготовок является их ширина (B_D) и от этого параметра зависит в значительной степени форма координатного пространства создаваемого станка, необходимо иметь аналитическое описание кривой распределения, изображенной на рис. 11.4,а. Аппроксимация кривой распределения какими-либо элементарными функциями, очевидно, невозможна, однако существует ряд факторов, существенно облегчающих решение этой задачи. Подробно эта задача рассмотрена в работе [2].

Единичная трудоемкость изготовления станков описывается степенной зависимостью

$$T_1(x_k) = A_6 (x_k/x_6)^s, \quad (11.3)$$

где A_6 , x_6 — соответственно трудоемкость и характерный параметр базового станка.

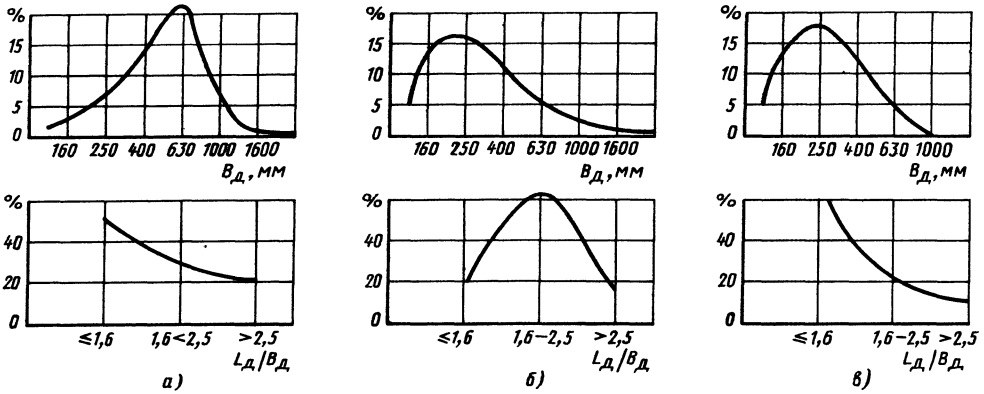


Рис. 11.4. Распределение деталей по размерам с учетом суммарной трудоемкости их обработки на фрезерных, сверлильных и расточных станках:

а — корпусных, б — плоских, в — фигурных, L_d — длина деталей

Относительная трудоемкость аппроксимируется выражениями:

$$T' = T'_0 + T'_{\sim} (1 - y_k - 1/y_0)^p, \quad (11.4)$$

$$y_k \leq y_0 + 1;$$

$$T' = T'_0, \quad y_k > y_0 + 1,$$

где T'_0 — минимальная относительная трудоемкость; T'_{\sim} — переменная часть относительной трудоемкости, зависящая от объема партии однотипных станков; y_0 — граница серийности, за пределами которой увеличение выпуска станков уже не приводит к снижению трудоемкости; p — показатель темпа снижения трудоемкости.

Число станков, необходимое для обработки массива деталей,

$$y_k = \sum_{i=1}^{i=k} N_i(x_i) / \Pi_i(x_i). \quad (11.5)$$

Здесь $\Pi_i(x_i)$ — годовая производительность станка при изготовлении заготовок x_i ,

$$\Pi_i(x) = \Pi_0 \exp(-x - x_{\min}/x_0), \quad (11.6)$$

где Π_0 — производительность станка базового варианта при изготовлении типовой детали-представителя по действующим нормативам резания.

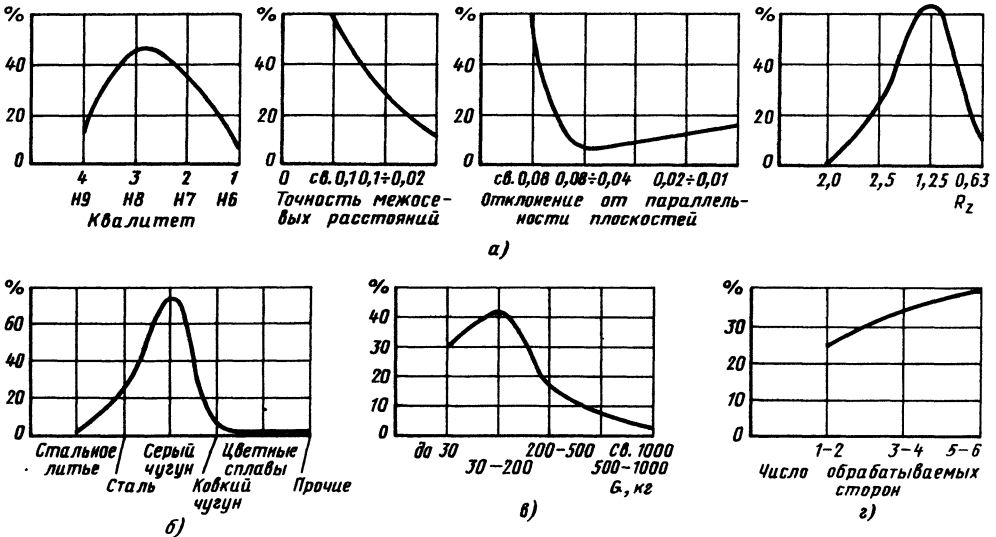


Рис. 11.5. Распределение деталей с учетом суммарной трудоемкости их обработки на фрезерных, сверлильных и расточных станках по точности (а), материалу (б), массе (в) и числу обрабатываемых сторон (г)

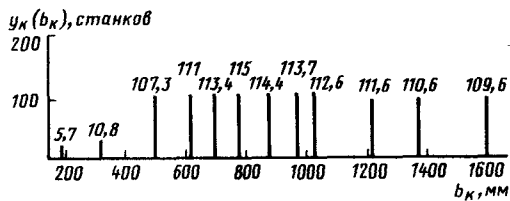


Рис. 11.6. Оптимизированная при 12 интервалах структура парка многоцелевых станков

Методы решения целевой функции (11.2) с учетом перечисленных выше ее составляющих и необходимых для этой цели программы приведены в работе [2]. Конечным результатом решения функции (11.6) является структура парка станков, выраженная в виде размерного ряда и числа станков для каждого размера. На рис. 11.6 приведен пример оптимизированной структуры парка многоцелевых станков с ЧПУ, предназначенной для изготовления массива деталей, показанного на рис. 11.4,а.

11.3 Модульный принцип построения компоновок станков

Большинство станков создано на основе классического метода проектирования, при котором станок «разбивают» на отдельные узлы, разработка которых продолжается до момента сближения требований по различным техническим и эксплуатационным характеристикам. Широкое распространение в последние годы при проектировании станков и других технологических машин получил модульный принцип. Под модулем понимают функционально и конструктивно независимую единицу, которую можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

Металлорежущие станки представляют собой многокомпонентные структуры со сложными взаимосвязями составляющих элементов. Любой станок следует рассматривать как систему, состоящую из множества упорядоченных и геометрически связанных конструктивных элемен-

тов, находящихся в определенных функциональных зависимостях. В общем виде математическую модель любого станка S представляют в виде $S = \langle E, X \rangle$, где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ — множество элементов модульной системы; $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ — множество бинарных функциональных отношений на множестве E . Для синтеза, анализа технологических и структурных возможностей модулей, их характеристик и возможных связей между ними удобно пользоваться основными положениями теории графов и множества [6,7].

Допустим, что в комплект модулей входят следующие узлы: 1 — шпиндельная бабка вертикального исполнения, 2 — каретка, 3 — вертикальная стойка с направляющими, 4 — станина, 5 — основание, 6 — поворотный стол, 7 — станина с приводом подачи, 8 — каретка. Считая, что станок может состоять не менее чем из трех модулей, простым перебором возможных вариантов их комбинаций можно получить

$$N = \sum_{n=3}^m = m! / [n!(m-n)!] = 218$$

вариантов станков, отличающихся друг от друга только самими модулями. Если каждый модуль может быть использован в станке дважды, то число возможных компоновок возрастет до 65000. Подавляющее число вариантов будет неработоспособно, что доказывает нецелесообразность использования в данном случае простого перебора.

Для ограничения числа возможных вариантов компоновок станков строится граф отношений данных модулей G_1 . Вершины графа обозначают модули, и если два модуля могут быть механически собраны, то обозначающие их вершины связываются ребрами (рис. 11.7). Из построенного графа G_1 можно выделить два подграфа $G_{1.1}$ и $G_{1.2}$, отображающие части станков: $G_{1.1}$ — связанный с режущим инструментом (силовую часть), $G_{1.2}$ — связанный с

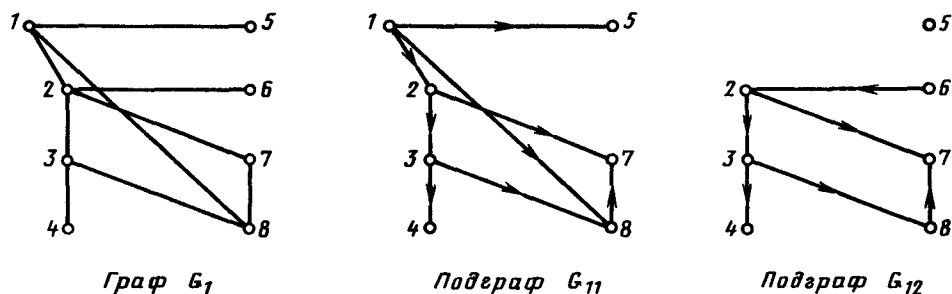


Рис. 11.7. Графы отношений состава модулей G_1 , силовой $G_{1.1}$ и установочной $G_{1.2}$ частей станка

обрабатываемой заготовкой (установочную часть). Подграфы G_{12} и G_{11} удобно изобразить в виде ориентированных графов, поскольку при конструировании или подборе модулей удобно начинать с модуля, связанного с режущим инструментом (шпиндельной бабкой). Остальные модули следует последовательно присоединять к ним, а затем друг к другу. В подграфе G_{11} имеются следующие простые пути: $S_1=(1,5)$, $S_2=(1,8)$, $S_3=(1,7)$, соединяющие начальные и конечные вершины. При соединении вершин 1 и 5, а также 1 и 4 существует только один путь $S_1=(1,5)$, $S_2=(1, 2, 3, 4)$. Вершина 7 связана с вершиной 1 тремя разными путями: $S_3=(1,7)==(1, 2, 7)=(1, 2, 3, 8, 7)=(1, 8, 7)$.

Таким образом, при анализе подграфа выявлено, что из данного набора модулей можно собрать пять различных компоновок силовой части станка: {1,5}, {1,8,7}, {1,2,3,4}, {1,2,3,8,7}, {1,2,7}. В результате анализа подграфа G_{12} получается пять вариантов компоновок установочной части станков: {5}, {6,2,3,4}, {8,7}, {6,2,7}, {6,2,3,8,7}. Комбинации комплектов модулей силовой и установочных частей станка позволяют получить возможные компоновки станков, которые могут быть созданы из данного набора модулей. Их всего 25 вместо 65000, полученных в результате простого перебора.

Полученные компоновки из комплекта модулей восьми наименований должны быть проанализированы с позиции их технологических возможностей, т. е. должен быть осуществлен выбор металлорежущего оборудования для решения задач заказчика. В общем случае задача выбора компоновки станка сводится к сравнению известных или вновь предлагаемых компоновок по определенным признакам. Отсутствие в практической деятельности предприятий интегральных критериев выбора говорит о том, что условия производства конкретного потребителя выдвигают свои требования, связанные с традиционным технологическим процессом, оснащенностью предприятия и накопленным инженерным опытом.

Вместе с тем можно при выборе станка воспользоваться обобщенным мнением экспертов, которые высказывают следующие соображения [2]. Обобщенный показатель качества станка состоит из суммы частных показателей (критериев). Наибольшее предпочтение экспертами отдано критерию, характеризующему производительность станка. Надежность работы станка также входит в состав основных показателей его качества. Относительно критерия, характеризующего точность станка, имеется двойственное мнение. С одной стороны, по удельному весу экспертных оценок он близок к показателю надежности, а с другой, — некоторые специалисты считают, что точность

является решающим показателем качества станка, и его нельзя включать в состав слагаемых частных показателей. Уделяется также внимание критерию, характеризующему стоимость станка. Причем в этом критерии эксперты предлагают учитывать затраты через такие характеристики станка, как его масса, размеры, уровень автоматизации и возможность встраивания станка в автоматизированные производства и т. д.

Результаты подобного анализа, проведенного на основе экспертных оценок, позволяют сформулировать основные требования к структуре и содержанию обобщенного показателя качества станка. Различают три группы критериев: технические — характеризующие функциональные и эксплуатационные возможности станков, экономические — характеризующие затраты, связанные с реализацией конкретной технологической задачи, и технико-экономические — связывающие степень использования определенного ресурса станка с его стоимостью. Совокупность этих групп показателей, их взаимосвязь выражаются через обобщенный показатель качества в виде стоимостной оценки эффективности применения станка: $\lambda=1 - Y_{rp}/Y_d \geq 0$, где Y_{rp} — в формуле область эффективного использования станка; Y_d — относительная производительность сопоставляемых вариантов изготовления деталей. Модуль показателя λ выражает относительное значение экономического эффекта в долях суммарных косвенных приведенных затрат базового и нового вариантов изготовления деталей; равенство $\lambda=0$ соответствует границе между областями применения сравниваемых вариантов обработки; положительное значение λ соответствует области рационального использования оборудования, отрицательное — области нерационального применения. Показатель λ учитывает целый ряд факторов и отражает при выборе особенности как самого металлорежущего станка, технологию изготовления детали, так и вопросы, связанные с организацией производства [2].

11.4. Структурное формирование комплекта модулей

Структурное формирование комплекта модулей, необходимого и достаточного для построения группы (или гаммы) компоновок станков, производится на основе ограниченной информации об обрабатываемых деталях и статистического анализа применяемости базовых компоновок металлорежущих станков. В левой части табл. 11.1 для примера приведены данные о группе корпусных деталей, подлежащих обработке на станках, соответствующих компо-

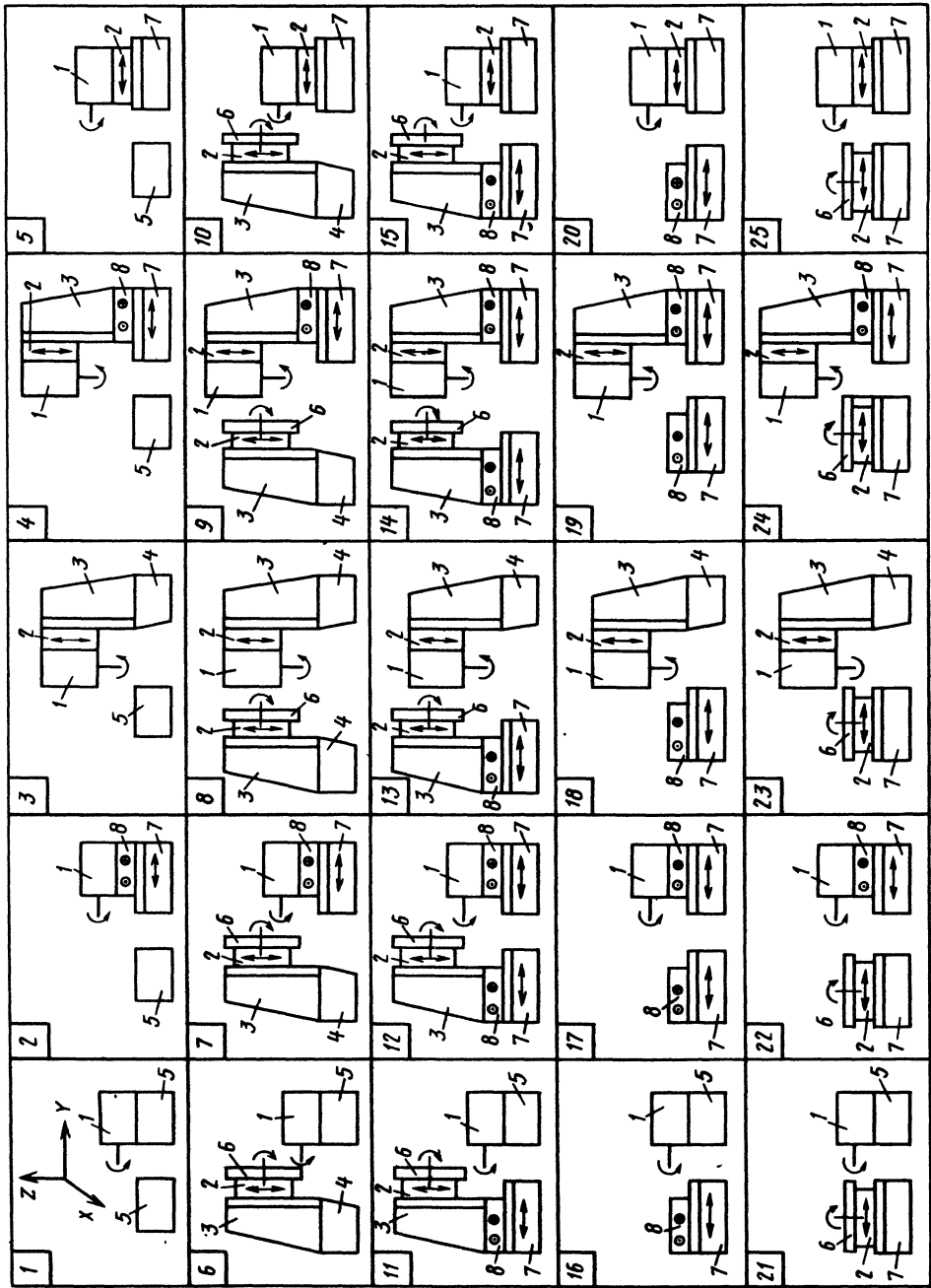


Рис. 11.8. Комплектующие станков, собранные из восьми наименований одного типоразмера

11.1. Применяемость металлорежущих станков

| Характеристика изготавливаемой детали | | | | | | Структурная формула станка |
|---------------------------------------|---|-------|----------|----------|-----------|---|
| Форма | B_d , мм | b_d | h_d | l_d | K | |
| Куб | До 300 До 400 До 1000 Св. 1000 | 1 | 0,63—1,6 | 0,63—1,6 | 2—4 | $A YOZXC_h$ $BXZOYC_h$ $BXOZYC_h$ $BOXZYC_h$ |
| Призма | До 500 | | | До 2,5 | 1 | $X YOZC_v$ |
| Брус | Св. 500 | | | Св. 2,5 | | $XOYZC_v$ $OXYZC_v$ |
| Брус высокий | | | Св. 1,6 | | $OXYZC_h$ | |

Обозначения: B_d — ширина; b_d — ширина, принятая за единицу; h_d , l_d — высота, длина по отношению к b_d ; K — число обрабатываемых сторон

новочных решениях. В левой части таблицы записаны структурные формулы возможных компоновок станков, способных обработать массив корпусных деталей с характеристиками левой части таблицы.

На рис. 11.8 видно, что из восьми ранее выбранных модулей структурным формулам станков табл. 11.1 соответствуют варианты компоновок станков 4 и 18 (структурные формулы соответственно $OXYZC_v$, $XYOZC_v$) и только. В частности, отсутствуют варианты станков с горизонтальным расположением шпинделя, бабка которых перемещается по вертикальному направляющему стойки; не предусмотрен вариант станка с подвижной стойкой по одной координате; нет варианта установочной части станка с крестово-подвижным и поворотным столом и отсутствует возможность обработки корпусных деталей с пяти сторон.

Для станка с горизонтальным шпинделем (рис. 11.9) вводится шпиндельная бабка 9 и сохраняется при этом связь каретки 2 со стойкой 3. Для обеспечения движения стойки по одной координате вводится каретка 10, обеспечивающая подвижное соединение между модулями 3 и 7. Далее предусматривается возможность соединения поворотного стола 6 с верхней поверхностью крестовых салазок 7 и вводится новый модуль 11 — универсальный поворотный стол.

Число возможных вариантов станков возросло, но произошло также увеличение номенклатуры модулей и некоторое усложнение связей между ними. Для упрощения связей и сокращения комплекта модулей можно предусмотреть возможность обеспечения неподвижного соединения нижней части стойки (модуль 3) на каретке (модуль 2) и верхних салазок (модуль 8).

Поскольку функционально модули 2 и 10 одинаковы, то придание им единых конструктивных решений позволяет считать модуль 2 как основной, и, кроме того, можно поставить задачу конструкторам — обеспечить использование модуля 2 в качестве верхней каретки модуля 8; целесообразно с точки зрения унификации корпусов шпиндельную бабку представить как единую для двух исполнений по расположению шпинделя.

Таким образом, найдя все пути между начальными и конечными вершинами подграфов, выделим 16 комплектов модулей силовых (рис. 11.10) и 10 установочных (рис. 11.11) частей станка. Их комбинации дают 176 вариантов компоновок, из которых 16 (рис. 11.12) можно рассматривать как станки, предназначенные для решения тех технологических задач, которые отображены в формализованной записи табл. 11.1.

Следующим этапом создания станков является определение технических характеристик установочной и силовой частей металлорежу-

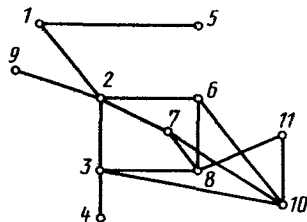


Рис. 11.9. Модернизированный вариант комплекта модулей:

1 — шпиндельная бабка (вертикальный вариант); 2 — каретка; 3 — вертикальная стойка; 4 — станина; 5 — основание; 6 — поворотный стол; 7 — станина крестового стола; 8 — каретка крестового стола; 9 — шпиндельная бабка (горизонтальный вариант); 10 — дополнительная каретка; 11 — универсальный поворотно-наклонный стол

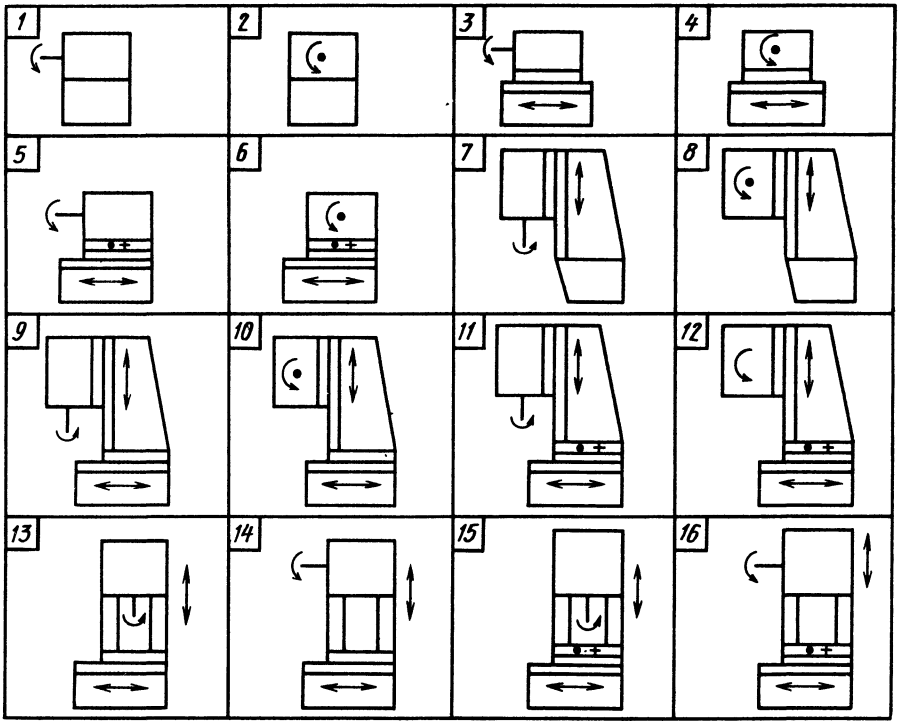


Рис. 11.10. Комплекты силовых модулей

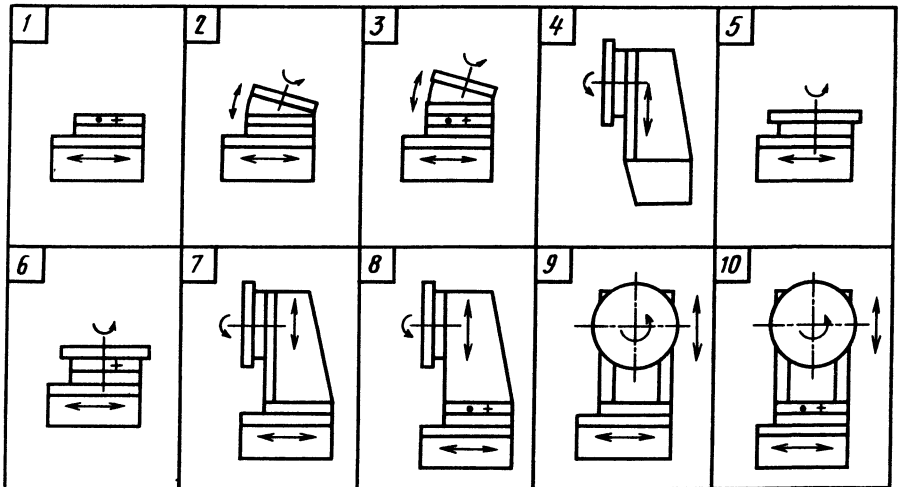


Рис. 11.11. Комплекты установочных модулей

щих станков. Установочные части определяются довольно просто [2] после определения размерных рядов. Среди различных методов определения характеристик силовой части станков одним из наиболее распространенных является

метод, основанный на анализе паспортных данных существующих станков данного типа. Недостаток его заключается в необходимости накопления достаточно большого объема информации по однородным видам оборудования с

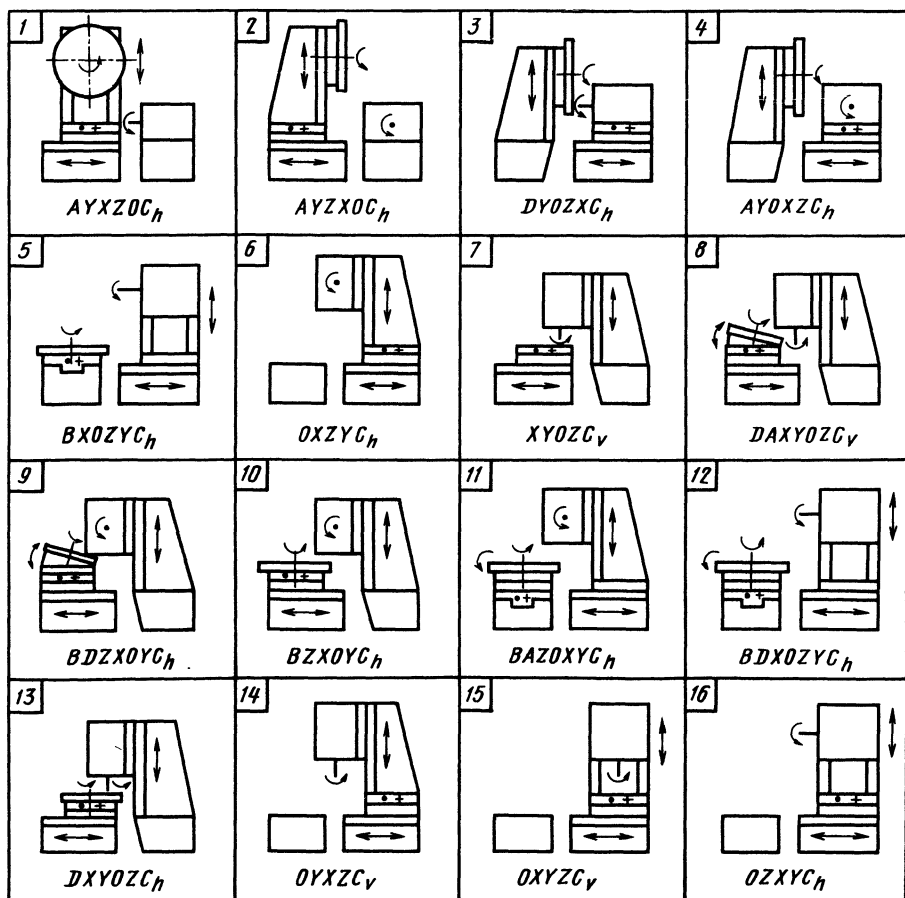


Рис. 11.12. Варианты компоновок станков

ориентацией на станки последних лет выпуска и по возможности с исключением факторов рекламного или конъюнктурного характера. Модульный принцип построения станков позволяет предусматривать исполнение тех или других вариантов модулей, характеристики которых могут быть получены на основе анализа условий резания по ведущей операции.

При расширении номенклатуры модулей за счет исполнений станков, а также с учетом различных их размерных вариантов модульная система может существенно изменить число возможных сочетаний силовой и установочной частей в станках, и в этом случае трудоемкость выполнения анализа резко возрастет. В подобных ситуациях целесообразно использовать возможности вычислительной техники [1,3].

Список литературы

1. Аверьянов О. И., Воронов А. Л., Гельштейн Я. М. Автоматизированное проектирование компоновок МС//Станки и инструмент, 1982. № 8. С. 6—7.

2. Аверьянов О. И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.

3. Аверьянов О. И., Воронов А. Л., Гельштейн Я. М. Информационное обеспечение автоматизированного проектирования компоновок МС с ЧПУ//Оборудование с ЧПУ. 1982. Вып. 5. С. 1—4.

4. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.

5. Грановский Г. И. Кинематика резания. М.: Машгиз, 1948. 200 с.

6. Кристофидес Н. Теория графов/Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 432 с.

7. Оре О. Теория графов/Пер. с нем. М.: Наука, 1980. 336 с.

8. Федотенок А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1970. 403 с.

Проектирование кинематической схемы станка

12.1. Классификация и структура кинематических цепей станков

Одной из первых стадий проектирования станка является разработка его кинематической схемы. В зависимости от назначения станка и принятой технологии обработки необходимо обеспечить согласование относительных перемещений инструмента и заготовки, которое осуществляется с помощью кинематических цепей; совокупность этих цепей образует кинематическую схему станка. С помощью кинематической схемы реализуются принятый принцип работы станка и кинематические связи различных элементов и механизмов станка.

Для передачи движений в станках применяют ременные, цепные, зубчатые, червячные, реечные, винтовые и другие передачи. Условные обозначения элементов различных механических передач предусмотрены ГОСТ 2.770—68. Некоторые типы передач приведены в табл. 12.1.

Основным кинематическим параметром, определяющим соотношение движений между ведущим и ведомым звеньями, является передаточное число u , которое для вращательных передач равно отношению частоты вращения ведущего вала n_1 к частоте вращения ведомого n_2 , т. е.

$$u = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1},$$

где d_1 , d_2 — диаметры ведущего и ведомого шкивов; z_1 — число зубьев шестерни; z_2 — число зубьев колеса.

Однако при расчете движений в кинематике станков в качестве одной из основных характеристик стик передач используют передаточное отношение i , которое определяется как

$$i = \frac{1}{u} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2}.$$

Передача движений в станках осуществляется по кинематическим цепям. Каждая кинематическая цепь станка имеет определенное функциональное назначение и характеризуется видом выполняемого движения: цепь главного движе-

ния, цепь подачи, цепь деления, цепь обкатки и т. п.

Для расчета кинематических цепей используют уравнение кинематического баланса, которое связывает движения ведущего и ведомого конечных звеньев цепи. Например, для цепи главного движения станка уравнение кинематического баланса в общем виде такое:

$$n_{эд} i_1 i_2 i_u i_3 i_4 = n_{шп},$$

где $n_{эд}$ — частота вращения вала электродвигателя; i_1 , i_2 , i_3 , i_4 — передаточные отношения кинематических пар, входящих в кинематическую цепь; i_u — передаточные отношения зубчатых колес звена настройки кинематической цепи; $n_{шп}$ — частота вращения шпинделя станка.

Формула настройки кинематической цепи имеет вид

$$i_u = n_{шп} / N,$$

где N — постоянная величина кинематической цепи.

Структура кинематической цепи, или последовательность расположения определенного типа кинематических пар и звеньев, входящих в кинематическую цепь, зависит от:

назначения станка;

характера движения начального и конечного звеньев цепи (вращение, перемещение), определяемого условиями формообразования при резании;

общего передаточного отношения кинематической цепи, определяемого назначением цепи и режимами обработки;

условия регулирования передаточного отношения кинематической цепи: соотношение частот вращения ведущего и ведомого вала, диапазон частот вращения;

сохранения передаточного отношения при данной настройке (кинематические цепи винторезные, деления, обкатки и др.), чтобы обеспечить точность обработки, с учетом кинематической погрешности;

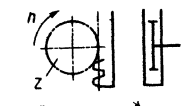
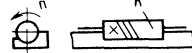
конструктивных факторов (расположения главной оси станка, компоновки и т. д.);

передаваемой мощности, действующих сил и других факторов.

12.1. Механизмы для передачи движения


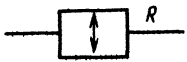
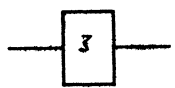
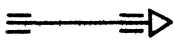

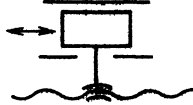
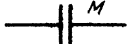

| Условное обозначение | Тип передачи |
|--|---|
|  | Ременная |
|  | Цепная |
|  | Цилиндрические зубчатые колеса наружного зацепления |
|  | Цилиндрические зубчатые колеса внутреннего зацепления |
|  | Конические зубчатые колеса |
|  | Червячная пара |
|  | Ходовой винт — гайка скольжения, |
|  | ходовой винт — гайка качения |

Продолжение табл. 12.1

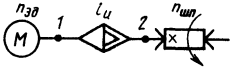
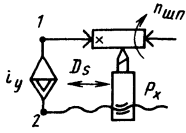
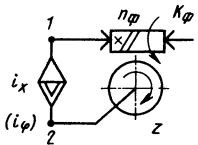
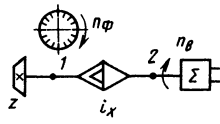
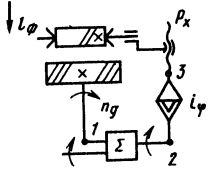
| Условное обозначение | Тип передачи |
|---|-------------------------|
|  | Зубчатое колесо — рейка |
|  | Червяк — рейка |

В табл. 12.2 приведены условные обозначения элементов кинематических цепей в структурных схемах станков, а в табл. 12.3 дана классификация кинематических цепей и уравнения кинематического баланса в общем виде.

12.2. Условные обозначения элементов кинематических цепей в структурных схемах

| Условное обозначение | Название элемента |
|---|---|
|  | Орган настройки кинематической цепи (гитара, коробка скоростей и др.) |
|  | Механизм реверса (реверсивный механизм) |
|  | Суммирующий механизм |
|  | Орган вращательного движения |
|  | Механизмы преобразования вращательного движения в прямолинейное |
|  | Кинематическая пара поступательного движения |
|  | Муфта сцепления |
|  | Распределительный вал с кулачком |

12.3. Классификация кинематических цепей

| Движение | Структурная схема кинематической цепи | Уравнение кинематического баланса |
|--|---|---|
| Главное — вращение шпинделя (токарный станок) |  | $n_{эд} \cdot i_u \cdot 2 = n_{шп}$ |
| Подачи — перемещение инструмента относительно заготовки (токарный станок) |  | $l_{об шп} \cdot i_y \cdot 2 \cdot P_x = S$ |
| Обкатки — согласованное вращение инструмента и заготовки (зубофрезерный станок) |  | $l_{об ф} \cdot i_x \cdot 2 = \frac{K_\phi}{z}$ |
| Деления — периодический поворот заготовки на определенный угол (станок для нарезания конических зубчатых колес) |  | $n_\theta \cdot 2 \cdot i_x \cdot 1 = \frac{1}{z}$ |
| Дифференциальное — дополнительный поворот заготовки при вертикальном перемещении червячной фрезы при нарезании колес с косыми зубьями (зубофрезерный станок) |  | $\frac{l_\phi}{P_x} \cdot 3 \cdot i_\phi \cdot 2 \cdot i_\Sigma \cdot 1 = \frac{l_\phi}{T}$ |

Обозначения: i_u, i_y и др. — передаточные отношения звена настройки кинематической цепи; P_x — шаг ходового винта; S — подача; K_ϕ — число заходов червячной фрезы; z — число зубьев нарезаемого колеса; l_ϕ — перемещение червячной фрезы в направлении оси нарезаемого колеса; T — шаг винтовой нарезки (спирали) нарезаемого колеса с косыми зубьями; n_d — дополнительный поворот нарезаемого колеса с косыми зубьями при перемещении червячной фрезы на l_ϕ ; 1, 2 — кинематические пары, входящие в кинематическую цепь.

12.2. Кинематические расчеты на основе уравнений баланса

На кинематической схеме в развернутом и упрощенном виде располагают все основные механизмы станка и показывают все кинематические цепи станка, дающие полное представление о том, как передается движение к исполнительным механизмам.

Кинематическая схема должна обеспечивать возможность подсчета как абсолютных перемещений и скоростей различных элементов станка,

так и относительных (взаимных) перемещений, поэтому в ней надо указывать основные кинематические данные всех подвижных элементов и узлов (для зубчатых колес — модуль, число зубьев; для винтов — шаг резьбы; для электродвигателей — мощность и частоту вращения и т. п.).

Кинематическая настройка станка заключается в настройке его кинематических цепей для обеспечения требуемых скоростей движения исполнительных органов станка, а также, при необходимости, кинематического согласования пе-

заемого колеса; K_ϕ — число заходов червячной фрезы. Тогда формула настройки имеет вид

$$i_x = \frac{24 K_\phi f}{z e}$$

При $z = 12 \dots 161$ устанавливают сменные колеса перебора

$$\frac{f}{e} = \frac{54}{54} \text{ и } i_x = \frac{24 K_\phi}{z}$$

При $z \geq 162$ устанавливают колеса

$$\frac{f}{e} = \frac{72}{36} \text{ и } i_x = \frac{48 K_\phi}{z}$$

Цепь подачи обеспечивает перемещение фрезы в вертикальном направлении или стола с заготовкой в горизонтальном направлении. Для изменения направления подачи используют механизм реверса, составленный из цилиндрических зубчатых колес. При прямой подаче муфта M_3 выключена, M_4 включена. При реверсе движения подачи муфта M_4 выключена, а M_3 — включена.

Цепь вертикальной подачи фрезы: муфта M_2 включена, а M_1 выключена.

Уравнение кинематического баланса

$$i_{обз} \cdot \frac{96}{1} \cdot \frac{35}{35} \cdot \frac{33}{33} \cdot \frac{2}{26} \cdot \frac{44}{44} \cdot i_y \cdot \frac{39}{65} \cdot \frac{50}{45} \times \\ \times \frac{45}{45} \cdot \frac{1}{24} \cdot 10 = S_p$$

Формула настройки $i_y = 0,5 S_p$.

Цепь радиальной подачи: муфта M_1 включена, а M_2 — выключена.

Уравнение кинематического баланса

$$i_{обз} \cdot \frac{96}{1} \cdot \frac{35}{35} \cdot \frac{33}{33} \cdot \frac{2}{26} \cdot \frac{44}{44} \cdot i_y \cdot \frac{39}{65} \cdot \frac{45}{50} \times \\ \times \frac{34}{61} \cdot \frac{1}{36} \cdot 10 = S_p$$

Формула настройки $i_y = 1,6 S_p$.

Дифференциальная цепь используется при нарезании цилиндрических колес с косыми зубьями, обеспечивает дополнительный поворот заготовки при перемещении фрезы в вертикальном направлении.

Уравнение баланса кинематической цепи

$$\frac{l}{10} \cdot \frac{24}{1} \cdot \frac{33}{22} \cdot i_\phi \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{1}{45} \cdot i_{д2} \cdot \frac{e}{f} \cdot i_x \times \\ \times \frac{33}{33} \cdot \frac{35}{35} \cdot \frac{1}{96} = \frac{l}{P}$$

где l — перемещение фрезы в вертикальном направлении; $i_{д2} = 2$ — передаточное отношение конического дифференциала; P — шаг винтовой нарезки колеса.

Подставив значение

$$\frac{e}{f} = \frac{54}{54}; \quad i_x = \frac{24 K_\phi}{z}; \quad P = \frac{\pi m_n z}{\sin \beta}$$

и $\pi = 3,14159$, получим формулу настройки

$$i_\phi = \frac{7,95775 \sin \beta}{m_n K_\phi}$$

где β — угол наклона линии зуба нарезаемого колеса; m_n — модуль нормальный, мм.

Гитары обкатки и дифференциальная двухпарные.

Цепи ускоренных перемещений каретки суппорта и стола. Движение осуществляется от электродвигателя M_2 ($n_{M_2} = 1440 \text{ мин}^{-1}$).

Уравнения баланса кинематических цепей: перемещение каретки суппорта в вертикальном направлении

$$n_{M_2} \cdot \frac{25}{25} \cdot \frac{36}{60} \cdot \frac{50}{45} \cdot \frac{45}{45} \cdot \frac{1}{24} \cdot 10 = S_{вск}$$

перемещение стола в радиальном направлении

$$n_{M_2} \cdot \frac{25}{25} \cdot \frac{36}{60} \cdot \frac{45}{50} \cdot \frac{34}{61} \cdot \frac{1}{36} \cdot 10 = S_{p \text{ уск}}$$

12.3. Графоаналитический метод расчета коробок скоростей и подач

Свою специфику кинематического расчета имеют коробки скоростей и подач со ступенчатым регулированием, когда на последнем звене соответствующей кинематической цепи (на шпинделе, суппорте, столе) необходимо обеспечить заданный ряд частот вращения n_1, n_2, \dots, n_z или подач S_1, S_2, \dots, S_z . Бесступенчатое регулирование более целесообразно в станках, так как позволяет точно устанавливать требуемый режим обработки, но передачи со ступенчатым регулированием скоростей и подач применяют достаточно широко. Ступенчатые передачи используют также для расширения диапазона регулирования при применении двигателей с бесступенчатым регулированием.

Основными характеристиками для установленного ряда частот вращения n или подач S являются:

диапазон регулирования $D = n_z/n_1$ (или $D' = S_z/S_1$), где n_z (или S_z) максимальное, а n_1 (или S_1) минимальное значение в данном ряде, построенном по возрастанию его членов;

z — число частот вращения (или подач), равное числу членов ряда;

вид данного ряда.

В станках для коробок скоростей и тех коробок подач, где не требуется обеспечить точное передаточное отношение, применяют исключительно геометрический ряд со стандартными

знаменателем прогрессии $\varphi > 1$. Для геометрического ряда (геометрической прогрессии) k -й член $n_k = n_1 \varphi^{k-1}$, а диапазон регулирования $D = \varphi^z - 1$.

В качестве стандартных значений $\varphi_{ст}$ приняты знаменатели, которые являются целой степенью числа 1,06, т. е. $\varphi_{ст} = (1,06)^n$. Данные значения выбраны потому, что

$$\varphi_{мин} = 1,06 = \sqrt[40]{10} = \sqrt[12]{2}$$

и удовлетворяют принципам «удешевления» и «удвоения», т. е. этот наиболее частый ряд будет иметь удешевленные (что облегчает построение таблиц стандартных значений n и S) и удвоенные (что удобно для кинематического проектирования промежуточных передач) члены. Все стандартные ряды получают из основного со знаменателем $\varphi_{мин} = 1,06$ (табл. 12.4), и чем больше φ , тем больше перепад A скоростей. Значение A определяет максимально возможное отклонение требуемой скорости (по режимам обработки) от ближайшего, которое можно установить на станке при ступенчатом регулировании:

$$A = (n_{i+1} - n_i) / n_{i+1} = \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) 100\%$$

где n_i и n_{i+1} — соответственно меньшая и большая ближайшие частоты вращения, имеющиеся в данной передаче, относительно расчетной.

Для геометрического ряда с данным φ перепад скоростей постояен для всего диапазона регулирования. Но геометрический ряд удобен не только из-за $A = \text{const}$, а, главное, тем, что на его основе можно проектировать сложные коробки скоростей и подач, состоящие из промежуточных передач, также построенных на основе геометрического ряда.

В станкостроении частоты вращения стандартизованы. Так как ряды частот вращения целесообразно начинать с $n_1 = 1 \text{ мин}^{-1}$, то все остальные значения частот вращения кратны знаменателю прогрессии φ , так для любого $k = \text{го члена}$ $n_k = n_1 \varphi^{k-1} = \varphi^{k-1}$.

Для облегчения кинематических расчетов сложных коробок скоростей и подач применяют графоаналитический метод, который заключается в графическом изображении частот вращения и передаточных отношений в виде так называемых графиков частот вращения и структурных сеток.

На рис. 12.2 приведены эти графики (графики Гермара) для коробок скоростей с $Z = 16$.

При графическом изображении частот вращения (рис. 12.2, б) или подач значения n или S располагают на данной оси в виде точек как бы в логарифмическом масштабе, т. е. для геометрического ряда это точки, равномерно расположенные на оси с расстоянием между ними, численно равным φ .

12.4. Стандартные знаменатели рядов и их параметры при ступенчатом регулировании

| $\varphi_{ст}$ | | n | x | y | $A \cdot 100, \%$ |
|----------------|----------|-----|--------|-------|-------------------|
| точное | принятое | | | | |
| 1,06 | — | 1 | 40 | 12 | 5 |
| 1,12 | — | 2 | 20 | 6 | 10 |
| 1,26 | 1,25 | 4 | 10 | 3 | 20 |
| (1,41) | 1,4 | 6 | (6,66) | 2 | 30 |
| 1,58 | 1,6 | 8 | 5 | (1,5) | 40 |
| (1,78) | — | 10 | 4 | (1,2) | 45 |
| (2) | — | 12 | (3,33) | 1 | 50 |

Обозначения: n — показатель степени в формуле $\varphi_{ст} = (1,06)^n$; x и y — показатели степени в выражениях $\sqrt[3]{10}$ и $\sqrt[4]{2}$.

Примечание. Стандартные знаменатели можно округлять соответственно до значений 1,25; 1,4; 1,6, в скобках указаны знаменатели, применение которых менее желательно; принципу удешевления и удвоения не удовлетворяют те ряды, в которых x и y не являются целыми числами; $\varphi = 1,06$ имеет вспомогательное значение, в станках практически не применяются; $\varphi = 1,12$ применяют в автоматах и тяжелых станках, где требуется более точная настройка на заданный режим; $\varphi = 1,26$ и 1,41 — наиболее часто применяемые знаменатели для универсальных станков (токарных, фрезерных, расточных и др.); $\varphi = 1,58$ и 1,78 применяют в станках, где вспомогательное время велико и поэтому нет необходимости точно устанавливать режим обработки; $\varphi = 2$ имеет вспомогательное значение при расчете промежуточных передач.

Для графика частот вращения (или для аналогичных графиков подач) передаточное отношение i изображается в виде линии между ведущим и ведомым валами; при $i > 1$ — наклон линии вправо, при $i < 1$ — наклон влево; $i = 1$ — вертикальная линия.

Наклон линии характеризуется числом отрезков φ , отложенных от вертикали, он оценивает передаточное отношение. Так, на рис. 12.2, б показан график замедлительной ($i_1 = 1/\varphi$; $i_3 = 1/\varphi^2$; $i_4 = 1/\varphi^3$) и ускорительной ($i_7 = \varphi^2$) передач. График частот вращения является полной характеристикой кинематических связей в передаче, необходимых для получения на ведомом звене (шпинделе) геометрического ряда со знаменателем φ для заданного числа Z скоростей.

Построение кинематической схемы сложной коробки скоростей усложняется тем, что для получения требуемого геометрического ряда частот вращения на шпинделе может быть

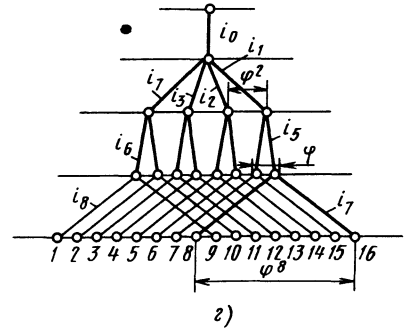
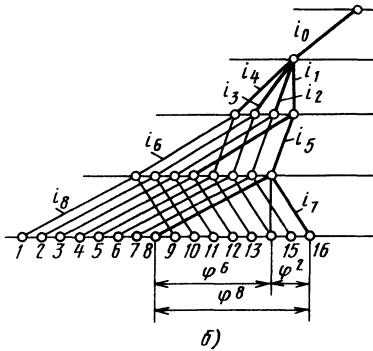
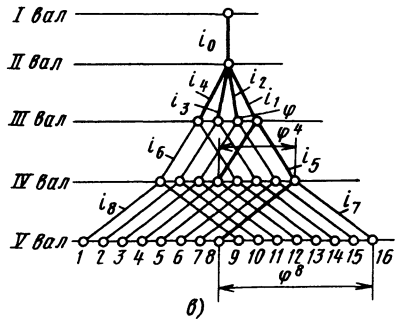
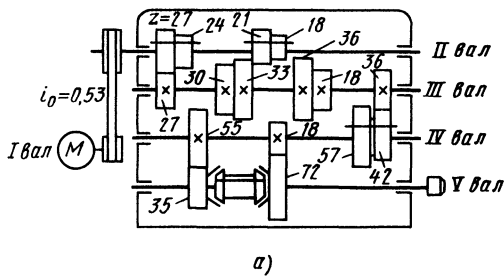


Рис. 12.2. Кинематический расчет коробки скоростей:

а — кинематическая схема; б — график частот вращения; в — структурная сетка (вариант расположения групп I—II—III); г — структурная сетка (вариант расположения групп II—I—III)

осуществлено несколько вариантов графиков частот вращения с различными передаточными отношениями промежуточных пар зубчатых колес. Конструктор должен выбрать лучший вариант, который соответствует меньшим габаритным размерам и более благоприятным кинематическим и динамическим характеристикам. Для этого вначале строят структурную сетку. Структурная сетка отличается от графика частот вращения в основном тем, что она всегда симметрична.

По структурной сетке (рис. 12.2, в) можно установить только соотношения между значениями i , но не их величину ($i_1:i_2:i_3=\varphi$; $i_4:i_5=\varphi^3$). Структурная сетка, которая дает менее полные кинематические характеристики коробки скоростей, нужна для того, чтобы сначала выбрать структурный вариант, а затем переходить к построению графика частот вращения. При построении структурных сеток и отыскании различных вариантов необходимо пользоваться следующими правилами.

1. Сложная коробка передач состоит из элементарных двухваловых передач, осуществляющих передачу между промежуточными валами. Число скоростей Z всей передачи равно произведению числа скоростей элементарных передач. Например, на рис. 12.2, а $Z=16=4 \cdot 2 \cdot 2$.

2. Число структурных вариантов $p=n!=1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n$, где n — число промежуточных двухваловых передач, образующих сложную коробку скоростей или подкас. Так, на рис. 12.2, а $n=3$ и $p=1 \cdot 2 \cdot 3=6$ структурных вариантов.

3. Для построения структурных вариантов необходимо все промежуточные передачи разделить на группы I, II, III и т. д. Лучи группы I в структурной сетке расходятся на φ ; лучи группы II расходятся на φ в степени числа лучей первой передачи, т. е. на φ^{Z_1} ; лучи группы III расходятся на φ в степени ($Z_1 Z_{II}$), где Z_{II} — число лучей (частот вращения) во второй передаче, и т. д.

Для пояснения этого правила на рис. 12.2, г рассмотрен вариант $Z=4_{II} \cdot 2_I \cdot 2_{III}$. Вариант с $Z=4_I \cdot 2_{II} \cdot 2_{III}$ называется веерообразным, он изображен на рис. 12.2, в.

Для коробок скоростей станков, где происходит уменьшение частот вращения от ведущего (приводного) вала к ведомому (шпинделю), обычно лучшим является вариант с веерообразным графиком. При применении этого варианта в области высоких частот вращения работает большее число передач, что будет соответствовать более компактной коробке скоростей. Кроме того, небольшие передаточные отношения в области высоких частот вращения обеспечивают лучшие условия для работы зуб-

12.5. Выбор числа зубьев передачи при заданном передаточном отношении

| i | Σz | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 |
| 1,00 | 25 | | 26 | | 27 | | 28 | | 29 | | 30 | | 31 | | 32 |
| 1,06 | | | | | | | 27 | | 28 | | 29 | | 30 | | 31 |
| 1,12 | | 24 | | 25 | | 26 | | 27 | | 28 | | 29 | | 30 | |
| 1,19 | 23 | | | | | 25 | | 26 | | 27 | | 28 | | 29 | |
| 1,26 | 22 | | 23 | | 24 | | 25 | | 26 | | 27 | | 28 | | 29 |
| 1,33 | | 22 | | | 23 | | 24 | | 25 | | 26 | | 27 | | 28 |
| 1,44 | | 21 | | 22 | | 23 | | 24 | | 25 | | 26 | | 27 | |
| 1,50 | 20 | | 21 | | 22 | | 23 | | 24 | | 25 | | 26 | | 27 |
| 1,58 | | | 20 | | 21 | | 22 | | 23 | | 24 | | 25 | | 26 |
| 1,68 | | 19 | | | 20 | | 21 | | 22 | | 23 | | 24 | | 25 |
| 1,78 | 18 | | | 19 | | 20 | | 21 | | 22 | | 23 | | 24 | |
| 1,88 | | | 18 | | 19 | | 20 | | 21 | | 22 | | 23 | | 24 |
| 2,00 | | 17 | | | 18 | | 19 | | 20 | | 21 | | 22 | | 23 |
| 2,11 | 16 | | | 17 | | 18 | | 19 | | 20 | | 21 | | 22 | |
| 2,24 | | | 16 | | 17 | | 18 | | 19 | | 20 | | 21 | | 22 |
| 2,37 | | 15 | | | 16 | | 17 | | 18 | | 19 | | 20 | | 21 |
| 2,51 | | | | 15 | | 16 | | 17 | | 18 | | 19 | | 20 | |
| 2,66 | | 14 | | | | 15 | | 16 | | 17 | | 18 | | 19 | |
| 2,82 | | | | | | | | 16 | | 16 | | 17 | | 18 | |
| 2,99 | | | 13 | | | | 14 | | | | 15 | | 16 | | 17 |

| i | Σz | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 |
| 1,00 | | 33 | | 34 | | 35 | | 36 | | 37 | | 38 | | 39 | |
| 1,06 | | 32 | | 33 | | 34 | | 35 | | 36 | | 37 | | 38 | |
| 1,12 | | 31 | | 32 | | 33 | | 34 | | 35 | | 36 | | 37 | |
| 1,19 | | 30 | | 31 | | 32 | | 33 | | 34 | 34 | 35 | | 36 | 37 |
| 1,26 | 29 | 29 | | 30 | | 31 | | 32 | | 33 | 33 | 34 | | 35 | 36 |
| 1,33 | 28 | | | 29 | | 30 | | 31 | | 32 | 32 | 33 | | 34 | 35 |
| 1,41 | 27 | | 28 | 28 | | 29 | | 30 | 30 | 31 | 31 | 32 | | 33 | 34 |
| 1,50 | 26 | | 27 | 28 | | 28 | | 29 | 29 | 30 | 30 | 31 | | 32 | 33 |
| 1,58 | 25 | | 26 | | | 27 | | 28 | 28 | 29 | 29 | 30 | | 30 | 31 |
| 1,68 | | | 25 | | 26 | 26 | | 27 | 27 | 28 | 28 | 29 | | 29 | 30 |
| 1,78 | | | 24 | | 25 | 25 | | 26 | 26 | 27 | 27 | 28 | | 28 | 29 |
| 1,88 | | 23 | 23 | | 24 | | | 25 | | 26 | | 27 | | 27 | 28 |
| 2,00 | | 22 | | | 23 | | | 24 | | 25 | | 26 | | 26 | 27 |
| 2,11 | 21 | 21 | | 22 | 22 | | 23 | 23 | | 24 | 24 | 25 | | 25 | 26 |
| 2,24 | 20 | | | 21 | 22 | | 22 | 22 | | 23 | 23 | 24 | | 24 | 25 |
| 2,37 | | | 20 | 20 | | | 21 | 21 | | 22 | 22 | 23 | | 23 | 24 |
| 2,51 | | 19 | 19 | | | 20 | 20 | 21 | | 22 | 22 | 23 | | 23 | 24 |
| 2,66 | | 18 | | | 19 | 19 | | 20 | 20 | 21 | 21 | 22 | | 22 | 23 |
| 2,82 | 17 | | | 18 | 18 | | | 19 | 19 | 20 | 20 | 21 | | 21 | 22 |
| 2,99 | | | 17 | 17 | | | 18 | 18 | | | 19 | 20 | | 20 | 21 |
| 3,16 | | 16 | 16 | | | 17 | 17 | | | | 18 | 19 | | 19 | 20 |
| 3,35 | | | | | 16 | 16 | | | | 17 | 17 | 18 | | 18 | 19 |
| 3,55 | | | | | | | | 15 | 15 | 16 | 16 | 17 | | 17 | 18 |
| 3,76 | | | | | | | | | | | | 16 | | 16 | 17 |

| t | Σz | | | | | | | | | | | | | | |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 |
| 1,00 | 40 | | 41 | | 42 | | 43 | | 44 | | 45 | | 46 | | 47 |
| 1,06 | 39 | | 40 | 40 | 41 | | 42 | | 43 | | 44 | | 45 | 45 | 46 |
| 1,12 | 38 | 38 | 39 | | 40 | | 41 | | 42 | | 43 | | 44 | 44 | 44 |
| 1,19 | | 37 | 38 | | 39 | | 39 | 40 | 40 | 41 | 41 | | 42 | 41 | 43 |
| 1,26 | | 36 | 37 | 37 | | | 38 | | 39 | | 40 | | 40 | 41 | |
| 1,33 | 34 | 35 | 35 | | 36 | | 37 | | 38 | | 38 | | 39 | 40 | 40 |
| 1,41 | 33 | 34 | | | 35 | 35 | | 36 | | 37 | | 38 | 38 | | 39 |
| 1,50 | 32 | | 33 | 33 | | 34 | | 35 | | 35 | | 36 | 37 | 37 | 38 |
| 1,58 | 31 | | 32 | 32 | | 33 | 33 | | 34 | | 35 | | 35 | 36 | |
| 1,68 | 30 | 30 | | 31 | | 32 | | 33 | | 33 | | 34 | | 35 | 35 |
| 1,78 | 29 | 29 | | 30 | 30 | | 31 | | 32 | | 33 | | 33 | | 34 |
| 1,88 | 28 | 28 | | 29 | 29 | | 30 | 30 | 31 | 31 | | 33 | 32 | 32 | |
| 2,00 | | 27 | | | 28 | | 29 | | 29 | | 30 | | 31 | 31 | |
| 2,11 | | 26 | | | 27 | | | 28 | 28 | | 29 | 29 | | 30 | 30 |
| 2,24 | | 25 | | | 26 | 26 | | 27 | 27 | | 28 | 28 | | 29 | 29 |
| 2,37 | | 24 | | | 25 | 25 | | 26 | 26 | | | 27 | 27 | | 28 |
| 2,51 | 23 | 23 | | | 24 | 24 | | 25 | 25 | | | 26 | 26 | | 27 |
| 2,66 | 22 | 22 | | | 23 | 23 | | 24 | 24 | | | 25 | 25 | | |
| 2,82 | 21 | 21 | | | 22 | 22 | | 23 | 23 | | | 24 | 24 | | |
| 2,99 | 20 | | | 21 | 21 | | | 22 | 22 | | | 23 | 23 | | |
| 3,16 | 19 | | | 20 | 20 | | | 21 | 21 | | | 22 | 22 | | |
| 3,35 | | | 19 | 19 | | | 20 | 20 | 20 | | | 21 | 21 | | |
| 3,55 | | 18 | 18 | 18 | | | 19 | 19 | | | 20 | 20 | 20 | | |
| 3,76 | 17 | 17 | | | | | 18 | 18 | | | 19 | 19 | | | |
| 3,98 | 16 | 16 | | | 17 | 17 | | | | 18 | 18 | 18 | | | 19 |

| t | Σz | | | | | | | | | | | | | | |
|------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | |
| 1,00 | | 48 | 49 | 49 | 50 | 50 | 51 | 51 | 52 | 52 | 53 | 53 | 54 | 54 | |
| 1,06 | 46 | 47 | 47 | 48 | 48 | 49 | 49 | 50 | 50 | 51 | 51 | 52 | 52 | 53 | |
| 1,12 | 45 | 45 | 46 | 46 | 47 | 47 | 48 | 48 | 49 | 49 | 50 | 50 | 51 | 51 | |
| 1,19 | | 44 | 44 | 45 | 45 | 46 | 46 | 47 | 47 | 48 | 48 | 49 | 49 | 49 | |
| 1,26 | 42 | | 43 | 44 | 44 | 44 | 45 | 46 | 46 | 47 | 47 | 48 | 48 | 48 | |
| 1,33 | 41 | 41 | | 42 | 42 | 43 | 43 | 44 | 44 | 44 | 45 | 45 | 46 | 46 | |
| 1,41 | | 40 | 40 | | 41 | 41 | 42 | 42 | 43 | 43 | 44 | 44 | 44 | 45 | |
| 1,50 | 38 | | 39 | 39 | 40 | 40 | 41 | 41 | 42 | 42 | 43 | 43 | 43 | 43 | |
| 1,58 | 37 | 37 | | 38 | 38 | 39 | 39 | 40 | 40 | 41 | 41 | 41 | 41 | 42 | |
| 1,68 | | 36 | 36 | | 37 | 37 | 38 | 38 | 39 | 39 | 40 | 40 | 40 | 40 | |
| 1,78 | 34 | | 35 | 35 | 36 | 36 | 37 | 37 | 38 | 38 | 39 | 39 | 39 | 39 | |
| 1,88 | 33 | 33 | | 34 | 34 | 35 | 35 | 36 | 36 | 37 | 37 | 38 | 38 | 37 | |
| 2,00 | 32 | 32 | | 33 | 33 | 34 | 34 | 35 | 35 | 36 | 36 | 37 | 37 | 36 | |
| 2,11 | | 31 | 31 | | 32 | 32 | 33 | 33 | 34 | 34 | 35 | 35 | 36 | 36 | |
| 2,24 | | | 30 | 30 | | 31 | 31 | 32 | 32 | 33 | 33 | 34 | 34 | 35 | |
| 2,37 | 28 | | 29 | 29 | | 30 | 30 | 31 | 31 | 32 | 32 | 33 | 33 | 33 | |
| 2,51 | 27 | | | 28 | 28 | | 29 | 29 | 30 | 30 | 31 | 31 | 32 | 32 | |
| 2,66 | 26 | 26 | | 27 | 27 | | 28 | 28 | 29 | 29 | 30 | 30 | 31 | 31 | |
| 2,82 | 25 | 25 | | 26 | 26 | 26 | | 27 | 27 | 28 | 28 | 29 | 29 | 28 | |
| 2,99 | 24 | 24 | | 25 | 25 | 25 | | 26 | 26 | 27 | 27 | 28 | 28 | 27 | |
| 3,16 | 23 | 23 | | 24 | 24 | 24 | 24 | 25 | 25 | 26 | 26 | 27 | 27 | 26 | |
| 3,35 | 22 | 22 | | 23 | 23 | 23 | 23 | 24 | 24 | 25 | 25 | 26 | 26 | 25 | |
| 3,55 | 21 | 21 | | 22 | 22 | 22 | 22 | 23 | 23 | 24 | 24 | 25 | 25 | 24 | |
| 3,76 | 20 | 20 | | 21 | 21 | 21 | 21 | 22 | 22 | 23 | 23 | 24 | 24 | 23 | |
| 3,98 | 19 | 19 | | 20 | 20 | 20 | 20 | 21 | 21 | 22 | 22 | 23 | 23 | 22 | |

чатых передач. По тем же соображениям при выборе порядка расположения множительных передач целесообразнее вначале иметь большее число передач. Так, вариант $Z=12=3 \cdot 2 \cdot 2$ лучше, чем $Z=12=2 \cdot 2 \cdot 3$.

Кинематический расчет ступенчатых коробок скоростей и подач на базе графоаналитического метода состоит из следующих этапов, которые проиллюстрированы на примере коробки скоростей с $Z=16$, $\varphi=1,26$, $n_1=20 \text{ мин}^{-1}$; $n_{эд}=960 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 12.2).

Этап 1 — выбор структурного варианта. Вначале Z разбивают на множители (на элементарные двухваловые передачи). Если нет особых причин, то лучший вариант структурной схемы — веерообразный.

Этап 2 — построение графика частот вращения. График строят на основе выбранной структурной сетки. Для этого необходимо для каждой двухваловой передачи выбрать одно передаточное отношение i и определить остальные. Допускаемые пределы $0,25 \leq i_k \leq 2$. Это соотношение более трудно выдержать в области низких частот вращения, где расхождение лучей (т. е. соотношение i_{\max} и i_{\min}) наибольшее. Если это соотношение не выдерживается, необходимо ввести дополнительные передачи или применять специальные виды коробок скоростей (например, с перебором). Если принять соотношение $i_{\max}:i_{\min}$ меньшее, чем по соответствующей структурной сетке, то получим потерю числа скоростей Z . На рис. 12.2, б приведен допустимый вариант графика частот вращения.

Этап 3 — определение чисел зубьев зубчатых колес. При определении чисел зубьев z необходимо получить передаточное отношение $i = n_2/n_1 = z_1/z_2$ и обеспечить постоянную сумму зубьев в пределах двухваловой передачи: $\Sigma z = z_1 + z_2 = \text{const}$. Из этого условия

$$z_1 = i \Sigma z / (i + 1) \text{ и } z_2 = \Sigma z / (i + 1).$$

При округлении полученных значений z_1 и z_2 до целых чисел получим отклонение от заданных значений i . В станкостроении принято, что выбранная частота вращения не должна отклоняться от стандартного (заданного) значения более чем на $\pm 10(\varphi - 1)\%$. Поэтому не все полученные значения z_1 и z_2 будут приемлемы.

Для облегчения расчетов применяют таблицы с допустимыми значениями z для данного значения i и Σz . При этом, как правило, принимают, что $z_{\min} \leq 18$. В табл. 12.5 указаны точные передаточные отношения и число зубьев z_1 шестерни (меньшего колеса пары). Число зубьев второго колеса $z_2 = \Sigma z - z_1$. Пустые клетки означают, что при данном Σz значение i не выдерживается с требуемой точностью.

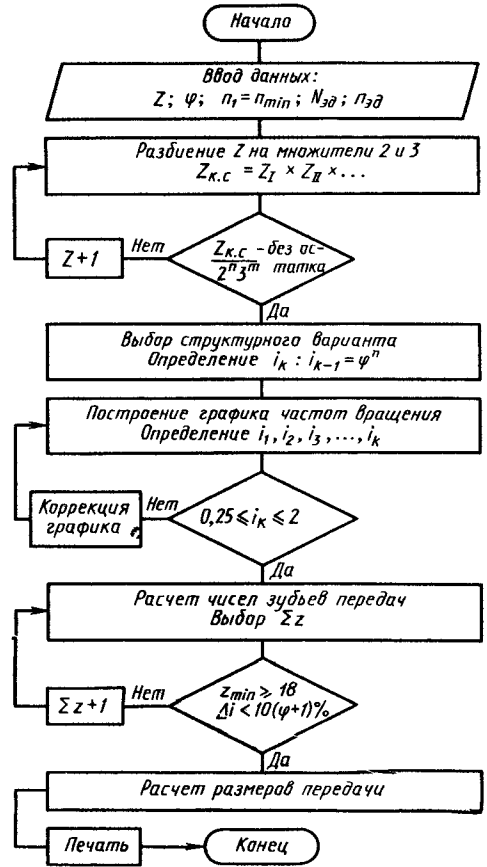


Рис. 12.3. Схема алгоритма расчета коробки скоростей

На рис. 12.2, а указаны полученные значения z и Σz в соответствии со значениями i , взятыми из графика частот вращения (см. рис. 12.2, б).

Этап 4 — определение размеров передачи. После кинематического расчета проводят силовые расчеты элементов коробок скоростей, определяют модуль зубчатых передач, выбирают подшипники, рассчитывают диаметры валов, размеры муфт и т. д. и окончательно конструктивно оформляют коробку скоростей.

В большинстве случаев для коробок скоростей регулирование осуществляется с постоянной мощностью $N = \text{const}$. Поскольку размеры передач определяет крутящий момент, тихоходные передачи имеют большие габариты. За расчетную частоту вращения n_p , как правило, принимают не n_{\min} , а $n_p > n_{\min}$ для уменьшения габаритных размеров передачи. Обычно на $1/4$ или $1/3$ диапазона частот вращения допускают передачу с постоянным крутящим моментом $M_{кр} = \text{const}$ (в пределах от $n_1 = n_{\min}$ до

$n = n_p$), а в остальном диапазоне следует осуществлять передачу с $N = \text{const}$. Для коробок подач во всем диапазоне осуществляется регулирование с $M_{кр} = \text{const}$. Это накладывает свои условия и на выбор электродвигателя. Автоматизированный расчет коробок скоростей и подач проводится по программам на основе алгоритмов, отражающих рассмотренные последовательные этапы. Укрупненная структурная схема алгоритма приведена на рис. 12.3.

12.4. Кинематические схемы станков с ЧПУ и электронные связи в станках

Кинематические схемы станков с ЧПУ и обычных станков существенно отличаются друг от друга. Главное различие — в условиях автоматизации основных и вспомогательных движений, которые в станках с ЧПУ регулируются в соответствии с программой. Например, устанавливается заданная частота вращения шпинделя, изменяется частота вращения шпинделя на определенных участках обработки, устанавливаются и изменяются подачи в процессе обработки, согласуются движения заготовки и инструмента и др.

В станках с ЧПУ применяют электродвигатели с регулируемой частотой вращения, шаговые электродвигатели, беззазорные систе-

мы передач, передачи винт—гайка качения, системы обратной связи и т. д.

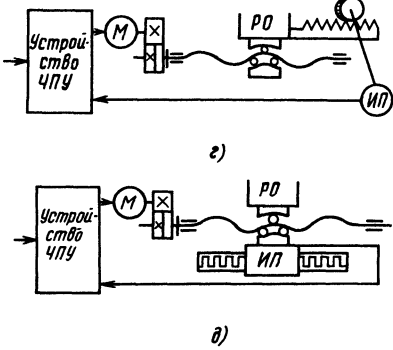
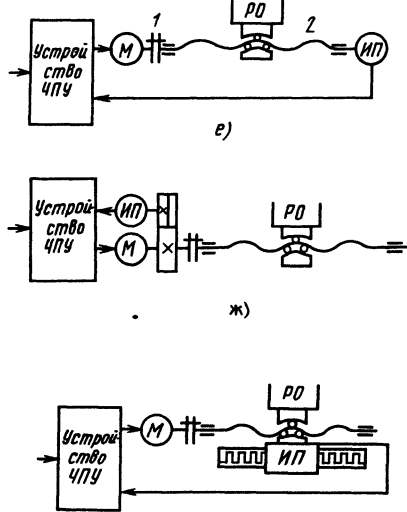
В кинематических цепях главного движения при ступенчатом изменении частоты вращения шпинделя применяют асинхронные электродвигатели, от которых движение на шпиндель станка передается через автоматическую коробку скоростей (АКС) и шестеренную коробку скоростей с малым числом ступеней. При требовании бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя применяют электродвигатели постоянного тока совместно с шестеренной коробкой скоростей с малым числом ступеней, чем достигается широкий диапазон регулирования.

Классификация типовых кинематических схем приводов подач линейных координат станков с ЧПУ приведена в табл. 12.6. Применяют приводы подач без обратной связи (разомкнутые) и с обратной связью (замкнутые).

Разомкнутые приводы строят на основе применения силовых или несиловых шаговых двигателей (ШД). В последнем случае ШД используют в комплекте с гидроусилителем ГУ (схема а). Из-за отсутствия контроля действительного положения рабочего органа РО станка, на точность перемещения РО в них будут влиять погрешности шагового электродвигателя, гидроусилителя и передаточных механизмов привода подач (зубчатой передачи 1, пары винт—гайка 2 и др.).

12.6. Классификация типовых кинематических схем приводов подач станков с ЧПУ

| Тип привода | Кинематическая схема | Тип датчика обратной связи |
|-------------|-------------------------|--|
| Редукторный | <p>а) б) в)</p> | <p>Нет</p> <p>Круговой, соединен с валом электродвигателя</p> <p>Круговой, соединен с ходовым винтом</p> |

| Тип привода | Кинематическая схема | Тип датчика обратной связи |
|----------------|---|---|
| |  <p style="text-align: center;">з) д)</p> | <p>Круговой, соединен с рабочим органом</p> <p>Линейный, соединен с рабочим органом</p> |
| Безредукторный |  <p style="text-align: center;">е) ж)</p> | <p>Круговой, соединен с ходовым винтом</p> <p>Круговой, соединен с валом электродвигателя</p> <p>Линейный, соединен с рабочим органом</p> |

Приводы подач с обратной связью (замкнутые) обеспечивают контроль перемещения и действительного положения рабочего органа станка и могут быть нескольких типов. Так, в приводе (схема б) между приводным двигателями M и ходовым винтом 3 установлен редуктор 2 , передаточное отношение которого выбирают исходя из того, что при номинальной частоте вращения ротора двигателя должна быть наибольшая подача. Датчик обратной связи (круговой измерительный преобразователь $ИП$) соединен с двигателем через пару зубчатых колес 1 .

В приводе подач (схема в) проводится косвенное измерение перемещения рабочего органа $РО$ с помощью кругового измерительного преобразователя $ИП$, присоединенного непосредственно к ходовому винту,

поэтому упругие деформации редуктора не влияют на точность воспроизведения числовой программы. Эта схема достаточно проста и удобна с точки зрения установки $ИП$. В данном случае высокие требования предъявляются к точностным характеристикам передачи винт—гайка (точность изготовления, минимальные упругие смещения, отсутствие зазоров), которые в этом случае не охватываются обратной связью.

В приводе подач (схема з) применяют также круговой $ИП$, измеряющий непосредственно через реечную передачу перемещение рабочего органа $РО$ станка. Хотя система обратной связи охватывает все передаточные механизмы привода подачи, включая и передачу винт—гайка, в измерения вносятся погрешности реечной передачи. Поэтому необходимо

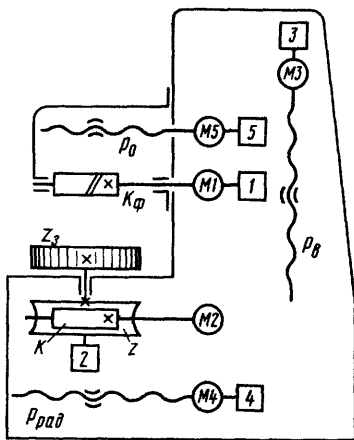


Рис. 12.4. Принципиальная кинематическая схема зубофрезерного станка с ЧПУ: $M1, M2, M3, M4, M5$ — электродвигатели привода соответственно вращения инструмента, стола, вертикальной, радиальной и осевой подачи

использовать прецизионную реечную передачу с рейкой, длина которой будет зависеть от хода рабочего органа.

В приводе (схема *д*) используют линейный ИП. Такая система обеспечивает непосредственное измерение перемещения рабочего органа станка. Это позволяет охватить обратной связью все передаточные механизмы привода подачи, чем достигается высокая точность перемещений. На точность перемещения рабочего органа могут оказывать влияние погрешности станка (например, износ направляющих, тепловые деформации и др.).

Основные требования к кинематическим цепям подачи с точки зрения повышения точности передачи движения являются: исключение в передачах зазоров, уменьшение упругих деформаций, полное исключение шестеренных редукторов из кинематических цепей или максимальное их упрощение.

Для выполнения этих требований в станках с ЧПУ применяют безредукторные приводы подачи линейных перемещений и приводы с упрощенными редукторами круговых перемещений с использованием высокомоментных электродвигателей, обладающих высокими статической точностью и быстродействием. В безредукторных приводах линейных перемещений (схема *е*) вал двигателя M муфтой 1 высокой крутильной жесткости соединен с ходовым винтом 2. Датчик обратной связи ИП (круговой) присоединен либо непосредственно к винту, либо через точные зубчатые передачи (схема *ж*). На схеме *з* показан привод линейных перемещений с линейным ИП.

Безредукторные приводы дают возможность получать скорости вспомогательных перемеще-

ний около 10—15 м/мин. Переход к высокомоментным приводам подачи и широкорегулируемым приводам главного движения предельно упрощает кинематическую схему станка, обеспечивает высокие точность и долговечность передач. Подобное же упрощение кинематических цепей достигается в механизмах круговых перемещений. Особенно это важно в зубообрабатывающих станках с ЧПУ, например зубофрезерных, зубострогальных, зубошлифовальных и др.

На рис. 12.4 приведена принципиальная кинематическая схема зубофрезерного станка с ЧПУ. В станке нет жесткой кинематической связи в цепи привода инструмента и заготовки. Обкатка осуществляется за счет электронной связи задающего датчика вращения 1 инструмента и датчика 2 слежения вращения стола с заготовкой. В приводах вращения используют электродвигатели постоянного тока с широким диапазоном бесступенчатого регулирования частоты вращения. Датчики 3—5 контролируют вращение ходовых винтов приводов подачи.

Привод вращения стола осуществляется от электродвигателя постоянного тока $M2$ с высокой точностью отсчета угла поворота. Управление работой станка осуществляется от системы ЧПУ. Зубчатые колеса обрабатываются по методу обкатки. Согласование вращения фрезы и заготовки осуществляется с помощью электронной гитары деления, а при нарезании косозубых колес — с помощью электронного дифференциала набором числа нарезаемых зубьев и координаты заданного угла направления зубьев нарезаемого колеса.

Типовая кинематическая схема вертикально-фрезерного станка с ЧПУ показана на рис. 12.5. Шпиндель станка получает главное вращательное движение и движение вертикальной подачи, а стол станка — движения продольной и поперечной подачи. В качестве электропривода главного движения в станке применен тиристорный привод постоянного тока с двухзонным регулированием частоты вращения ротора электродвигателя.

Цель главного движения обеспечивает вращение шпинделя. Движение на шпиндель передается от электродвигателя $M1$ постоянного тока 2ПФ-200Г ($N = 30$ кВт, $n = 1500$ мин⁻¹) через коробку скоростей с двумя двойными блоками шестерен, перемещаемых гидроцилиндрами. Регулируя частоту вращения двигателя и переключая блоки коробки скоростей, на шпинделе получают следующие четыре диапазона частоты вращения: 20—40 мин⁻¹; 40—800 мин⁻¹; 80—1600 мин⁻¹, 160—3150 мин⁻¹.

Уравнение кинематического баланса

$$n_{эд} M1 \cdot i_{к.с.} \cdot \frac{30}{30} \cdot \frac{39}{39} = n_{шпд}$$

где $i_{к.с}$ — передаточное отношение шестерен коробки скоростей.

Цепь вертикальной подачи. Движение получает шпindelь станка от электродвигателя М4 типа ПБСТ-33 ($N=2,1$ кВт; $n=2200$ мин⁻¹) через редуктор с конической передачей и шариковую винтовую пару. Второй вал редуктора через зубчатую передачу и эластичную муфту соединен с редуктором привода вращающегося трансформатора ВТ4 (ВТМ-1В), служащего датчиком обратной связи по положению, и сельсином С4 (БС-155), являющимся датчиком положения рабочего органа, от которого получает сигналы цифровой индикация.

Уравнение кинематического баланса

$$n_{эд} М4 \cdot \frac{24}{50} \cdot \frac{24}{75} \cdot \frac{42}{35} \cdot 10 = S_{в.}$$

Движение на вращающийся трансформатор ВТ4:

$$n_{эд} М4 \cdot \frac{24}{50} \cdot \frac{100}{150} \cdot \frac{150}{48} \cdot \frac{48}{75} = n_{ВТ4}$$

Движение на сельсин С4:

$$n_{эд} М4 \cdot \frac{24}{50} \cdot \frac{100}{150} \cdot \frac{150}{48} \cdot \frac{32}{100} = n_{С4}$$

Цена оборота ротора ВТМ-1В составляет 2 мм перемещения рабочего органа, а ротора сельсина БС-155 — 4 мм.

Цепь продольной подачи. Движение стола осуществляется от электродвигателя М3 (ПБСТ-43) постоянного тока ($N=4,3$ кВт; $n=3000$ мин⁻¹) через редуктор с четырьмя валами и шариковую винтовую передачу. С приводным валом редуктора связан редуктор привода вращающегося трансформатора ВТ3 и сельсина С3.

Уравнение баланса кинематической цепи

$$n_{эд} М3 \cdot \frac{24}{45} \cdot \frac{22}{44} \cdot \frac{22}{55} \cdot 12 = S_{пр.}$$

Движение на вращающийся трансформатор ВТ3:

$$n_{эд} М3 \cdot \frac{48}{75} = n_{ВТ3}$$

Движение на сельсин С3:

$$n_{эд} М3 \cdot \frac{32}{100} = n_{С3}$$

Цепь поперечной подачи стола идентична цепи привода продольной подачи стола и осуществляется от электродвигателя М2.

Особенностью кинематических схем станков с ЧПУ являются: полная автономность кинематических цепей по каждой из координат перемещений, а также круговых перемещений, предельное упрощение кинематических цепей, в частности, за счет исключения шестеренных

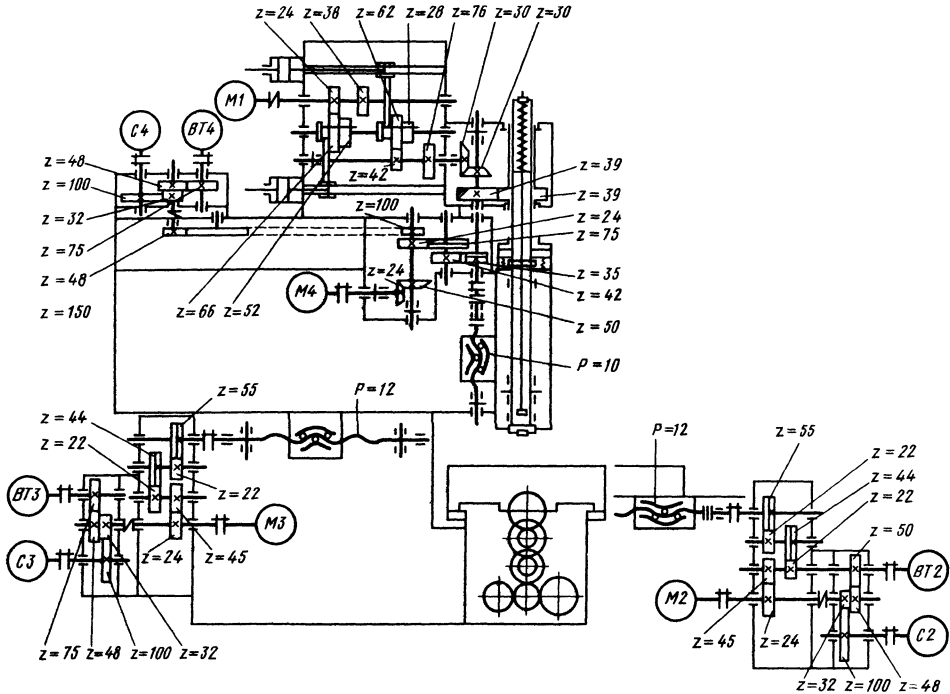


Рис. 12.5. Кинематическая схема вертикально-фрезерного станка с ЧПУ

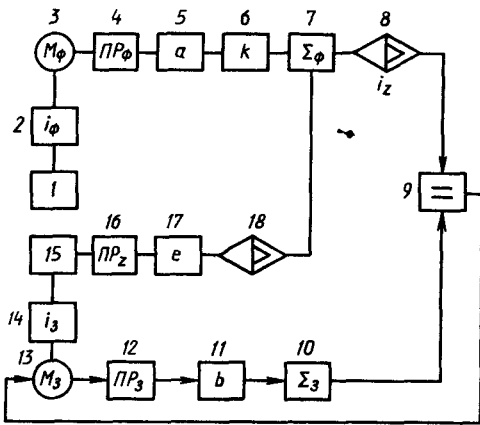


Рис. 12.6. Структурная схема зубофрезерного станка с ЧПУ:

1—режущий инструмент (червячная фреза); 2—механическая цепь режущего инструмента; 3—электродвигатель привода режущего инструмента; 4—преобразователь круговых перемещений режущего инструмента; 5, 6, 11, 17—множители; 7—сумматор электрических сигналов, находящийся в цепи режущего инструмента; 8—электронная гитара деления; 9—блок сравнения электрических сигналов; 10—сумматор электрических сигналов находящейся в цепи заготовки; 12—преобразователь круговых перемещений заготовки; 13—электродвигатель привода заготовки; 14—механическая цепь заготовки; 15—шпиндель заготовки; 16—преобразователь линейных перемещений по координате Z; 18—электронная гитара дифференциала, управляющая движением подачи при нарезании колес с косыми зубьями

редукторов, и возможность широкой унификации основных конструктивных элементов в пределах как одного станка, так и станков различных типоразмеров.

Рассмотрим определение кинематических параметров зубофрезерного станка с ЧПУ (рис. 12.6) при использовании в нем фотоэлектрических преобразователей круговых перемещений. Станок работает по методу обкатки. Согласование движений режущего инструмента и заготовки осуществляется благодаря так называемому электронному обкатному модулю, управляемому электроприводами через электрические сигналы, вырабатываемые преобразователями.

При нарезании зубчатых колес методом обкатки одному обороту заготовки должно соответствовать z/K_ϕ оборотов червячной фрезы, т. е. должно выдерживаться условие

$$\varphi_3 = \varphi_\phi K_\phi / z, \quad (12.1)$$

где φ_3 — угол поворота заготовки; φ_ϕ — угол поворота режущего инструмента (червячной фрезы); K_ϕ — число заходов фрезы; z — число зубьев нарезаемого колеса (заготовки).

Число электрических сигналов, поступающих от преобразователя PP_ϕ режущего инструмента в блок сравнения, должно быть равно числу электрических сигналов, поступающих от преобразователя PP_3 заготовки.

Цена одного импульса преобразователя PP_3 , поступающего в блок сравнения,

$$\Delta\varphi_3 = \frac{2\pi}{i_3 N_3 b}, \quad (12.2)$$

где i_3 — передаточное отношение механической цепи заготовки; N_3 — число импульсов, соответствующее одному обороту преобразователя заготовки PP_3 ; b — коэффициент электрического умножения.

Цена одного импульса преобразователя PP_ϕ , поступающего в блок сравнения,

$$\Delta\varphi_\phi = \frac{2\pi}{i_\phi N_\phi a K_\phi i_z}, \quad (12.3)$$

где i_ϕ — передаточное отношение механической цепи режущего инструмента; N_ϕ — число импульсов, соответствующее одному обороту преобразователя режущего инструмента PP_ϕ ; a — коэффициент электрического умножения; i_z — передаточное отношение электронной гитары деления.

Учитывая условие (12.1), передаточное отношение электронной гитары

$$i_z = \frac{1}{z} \frac{i_3 N_3 b}{i_\phi N_\phi a}. \quad (12.4)$$

Уравнение (12.4) выполняется при соответствующем подборе числа импульсов N_ϕ , N_3 преобразователей, коэффициентов электрического умножения a , b и передаточного отношения электронной гитары. При настраивании станка на число зубьев z нарезаемого колеса принимаем $i_z = 1/z$, тогда

$$\frac{i_3 N_3 b}{i_\phi N_\phi a} = 1. \quad (12.5)$$

Частота вращения фотоэлектрического преобразователя круговых перемещений ограничивается чувствительностью фотодиодов, используемых в них. Наибольшая частота работы фотодиода преобразователя PP_ϕ в зубофрезерном станке

$$f_{\max} = \frac{n_{\max} i_\phi N_\phi}{60} \leq [f_{\max}], \quad (12.6)$$

где n_{\max} — максимальная частота вращения режущего инструмента, мин^{-1} ; $[f_{\max}]$ — максимальная рабочая частота фотодиодов.

Так как пределы частот вращения фрезы известны, то

$$N_{\phi} \leq \frac{60 [f_{\max}]}{n_{\max} i_{\phi}} \quad (12.7)$$

Численное значение N_{ϕ} принимают, исходя из технологических возможностей нанесения определенного числа штрихов на лимбе. Из условия (12.5)

$$N_3 = \frac{i_{\phi}}{i_3} N_{\phi} \frac{a}{b} \quad (12.8)$$

Коэффициенты электрического умножения a и b , которые позволяют увеличить дискретность процесса обкатки и использовать преобразователи с конкретным стандартным числом, определяют по следующим формулам:

$$a \leq \frac{60 f_{\text{пер}} z_{\max}}{n_{\min} i_{\phi} N_{\phi}} \quad (12.9)$$

$$b \leq \frac{i_{\phi}}{i_3} \frac{N_{\phi}}{N_3} a, \quad (12.10)$$

где $f_{\text{пер}}$ — максимальная обрабатываемая частота следящего привода; n_{\min} — минимальная частота вращения режущего инструмента (фрезы), мин^{-1} . Коэффициент умножения b используют только для приведения к расчетному стандартному числу импульсов, выдаваемых преобразователем PP_3 .

Рассмотрим определение передаточного отношения i_{β} электронной гитары дифференциала, используемого при нарезании цилиндрических колес с косыми зубьями. Суммирование сигналов преобразователей PP_{ϕ} и PP_z производится сумматором Σ_{ϕ} , установленным в цепи режущего инструмента. Число электрических импульсов, поступающих из преобразователя координаты Z в сумматор, при перемещении инструмента на расстояние P — шага винтовой линии наклона зуба нарезаемого косозубого колеса, должно быть равно числу импульсов, поступающих в сумматор от преобразователя режущего инструмента PP_{ϕ} , вырабатываемых за $\pm z/K_{\phi}$ оборотов режущего инструмента:

$$\frac{P}{\Delta_z} e i_{\beta} = \frac{z}{K_{\phi}} i_{\phi} N_{\phi} a K_{\phi}, \quad (12.11)$$

$$\text{где } P = \frac{\pi m_n z}{\sin \beta},$$

здесь m_n — нормальный модуль нарезаемого колеса; β — угол наклона зуба; e — коэффициент электрического умножения; Δ_z — дискрета линейного преобразователя координаты Z . Отсюда

$$i_{\beta} = \frac{i_{\phi} N_{\phi} a \Delta_z \sin \beta}{e \pi m_n} \quad (12.12)$$

Коэффициент e умножения электрических сигналов преобразователя PP_z определяют исходя из минимального шага винтовой линии наклона зубьев колеса P_{\min} при наибольшем угле β_{\max} и наименьших значениях z_{\min} и $m_{n \min}$. При этом должно соблюдаться следующее требование: при перемещении червячной фрезы по координате Z на длину, равную P_{\min} , преобразователь PP_z должен вырабатывать такое количество сигналов, умноженное на число e , которое не должно быть меньше, чем их вырабатывает преобразователь PP_{ϕ} при умножении на число a в течение z/K_{ϕ} оборотов режущего инструмента, т. е. $i_{\beta} \leq 1$. Из уравнения (12.12) определяют минимально допустимое значение коэффициента e .

12.5. Разработка и проектирование кинематической схемы

Кинематическая схема должна обеспечивать следующее:

- получение всех основных и вспомогательных движений, необходимых для выполнения заданного цикла обработки;

- получение заданных технических параметров станка (частоты вращения шпинделя, подач, силы резания, мощности и крутящего момента и т. д.);

- необходимую автоматизацию станка за счет автоматизированного переключения частот вращения шпинделя, подач, реверса движения и т. д.;

- высокую производительность станка при получении необходимой точности обработки;

- высокий КПД станка при использовании коротких кинематических цепей с малым числом кинематических пар, возможность отклонения кинематических цепей, не участвующих в передаче движения при данных включениях, и др.;

- максимальное использование стандартных и унифицированных узлов и деталей;

- простоту и удобство наладки и обслуживания станка.

При разработке кинематической схемы предусмотрены следующие четыре этапа проектирования.

1. Составление принципиальной (технологической) схемы станка, которая должна давать полное объяснение принципа его работы. Определяют тип заготовки и технологическую операцию, которую нужно выполнить и каким инструментом. Исходя из выполняемой технологической операции рассматривают, какие движения должны получать заготовка и инструмент и их согласование в процессе обработки.

В табл. 12.7 приведены принципиальные (технологические) схемы некоторых станков различного технологического назначения с ука-

12.7. Принципиальные (технологические) схемы станков

| Станок, назначение | Схема станка | Необходимые движения инструмента и заготовки |
|--|--------------|---|
| <p>Токарный</p> <p>Обработка цилиндрических поверхностей, подрезка торцов, нарезание резьбы и т. д.</p> | | <p>Главное движение D_r — вращение заготовки 1</p> <p>Движения подачи $D_{s пр}$, $D_{s поп}$ — продольное и поперечное перемещение резца 2</p> |
| <p>Зубофрезерный</p> <p>Нарезание цилиндрических зубчатых колес с прямыми и косыми зубьями и червячных колес</p> | | <p>Главное движение D_r — вращение червячной фрезы</p> <p>Движение обкатки — согласованное вращение фрезы и заготовки</p> <p>Движение вертикальной подачи D_{sv} — перемещение фрезы в вертикальном направлении</p> <p>Движение радиальной подачи D_{sp} — перемещение заготовки в радиальном направлении</p> <p>Дифференциальное движение</p> |
| <p>Резьбофрезерный</p> <p>Нарезание коротких наружных и внутренних резьб гребчатыми фрезами</p> | | <p>Главное движение D_r — вращение фрезы 1</p> <p>Движение круговой подачи $D_{s кр}$ — вращение заготовки 2</p> <p>Движение продольной подачи $D_{s пр}$ — перемещение фрезы</p> <p>Движение радиальной подачи $D_{s пр}$ — перемещение фрезы</p> |

занием необходимых движений инструмента и заготовки в процессе обработки.

2. Составление структурной схемы станка. Структурная схема определяет основные функциональные части станка, их назначение и взаимосвязи. Эту схему составляют абстрактно, исходя из конструктивного исполнения привода, исполнительных и вспомогательных механизмов, выполнения кинематических связей между ними и средств управления всеми движениями. Поэтому она позволяет еще до разработки конструкции механизмов станка и составления кинематической схемы выбрать оптимальный вариант функциональных связей исполнительных механизмов и установить последовательность команд системы управления.

Структурную схему составляют на основе принципиальной (технологической) схемы, в задачу которой входит выявление необходимых исполнительных (целевых), а также передаточных механизмов и приводов станка.

На структурной схеме должны быть в виде квадратов и прямоугольников изображены основные функциональные части станка. Разрешается отдельные элементы изображать в виде условных графических обозначений, установленных для принципиальных электрических, функциональных, кинематических и других схем. На структурной схеме должны быть показаны как электрические, так и механические взаимосвязи между функциональными частями станка. На линиях взаимосвязи стрелками обозначают направление хода процессов, происходящих в станке. Графическое построение схемы должно давать наиболее наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей станка.

На структурной схеме должны быть указаны полные или сокращенные наименования каждой изображенной части станка. Разрешается на схеме обозначать (номерами) функциональные части станка, представляющие собой самостоятельные конструкции, выделять их ус-

12.8. Структурные схемы станков

| Станок | Структурная схема | Уравнения кинематического баланса |
|-----------------|-------------------|--|
| Токарный | | <ol style="list-style-type: none"> Цепь главного движения $n_{эд}M \cdot 1 \cdot i_u \cdot 2 = n_{шп.}$ Цепь продольной подачи $l_{обз} \cdot 2 \cdot i_y \cdot 3 \cdot P_{x1} = S_{пр.}$ Цепь поперечной подачи $l_{обз} \cdot 2 \cdot i_y \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot P_{x2} = S_{поп.}$ |
| Зубофрезерный | | <ol style="list-style-type: none"> Цепь главного движения $n_{эд}M \cdot 1 \cdot i_u \cdot 2 = n_{шп.}$ Цепь обкатки $l_{обф} \cdot 2 \cdot 3 \cdot i_x \cdot i_x \cdot 4 \cdot i_{R1} \cdot 5 = \frac{K_{\phi}}{z}$ Цепь вертикальной подачи $l_{обз} \cdot 5 \cdot i_y \cdot 6 \cdot 8 \cdot 9 \cdot P_{x1} = S_{в.}$ Цепь радиальной подачи $l_{обз} \cdot 5 \cdot i_y \cdot 6 \cdot 7 \cdot P_{x2} = S_{р.}$ Дифференциальная цепь $\frac{S_{н.}}{P_{x1}} \cdot 9 \cdot 8 \cdot 10 \cdot i_{\phi} \cdot 11 \cdot i_{\Sigma} \cdot i_x \cdot 4 \cdot i_{R1} \cdot 5 = \frac{S_{в.}}{T}$ |
| Резьбофрезерный | | <ol style="list-style-type: none"> Цепь главного движения $n_{эд}M1 \cdot 12 \cdot i_u \cdot 11 = n_{\phi.}$ Цепь круговой подачи $n_{эд}M2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot i_y \cdot 3 \cdot i_{\Sigma} \cdot 4 \cdot 5 = S_{кр.}$ Цепь продольной подачи $l_{обз} \cdot 5 \cdot 4 \cdot 6 \cdot L_{k1} = S_{пр.}$ Цепь радиальной подачи $l_{обз} \cdot 5 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 9 \cdot 10 \cdot L_{k2} = S_{р.}$ Цепь ускоренных перемещений $n_{эд}M3 \cdot 8 \cdot 7 \cdot i_{\Sigma} \cdot 4 \cdot 5 = n_3$ |

Обозначения: 1—12 — кинематические пары, входящие в кинематическую цепь; а — заготовка; б — резец (фреза); в — суппорт; M1, M2 — муфты сцепления; L_{k1} — подъем на кулачке K1; L_{k2} — подъем на кулачке K2.

ловными очертаниями. Наименования и обозначения, как правило, следует вписывать в контуры квадратов и прямоугольников.

В табл. 12.8 приведены примеры структурных схем для некоторых станков различного технологического назначения и даны в общем виде уравнения кинематического баланса.

3. Составление компоновочной схемы станка. На основе технологической (принципиальной) и структурной схем определяют основ-

ные размеры станка, составляют так называемую компоновочную схему станка.

Исходными данными для выбора основных размеров станка являются:

- размеры обрабатываемых заготовок;
- режимы резания, которые зависят от материала заготовки, материала инструмента, принципа обработки и т. д.;
- действующие силы резания, крутящие моменты и т. п.;

требования точности передачи движения; применяемые механизмы настройки, реверса, суммирующие и другие целевые механизмы и их размеры;

другие факторы.

При составлении компоновочной схемы станка необходимо решить, какой принцип будет использован в станке для привода главного движения и какой орган настройки он будет иметь (гитара, коробка скоростей, АКС, электродвигатель постоянного тока и др.), какой привод будут иметь механизмы подачи, механизмы вспомогательных движений и др.

При разработке компоновочной схемы полуавтомата или автомата составляют циклограмму его работы.

4. Составление кинематической схемы станка. На основе выбранных схем принципиальной (технологической), структурной, компоновочной и циклограммы работы составляют кинематическую схему станка. При этом определяют частоты вращения приводов главного движения, подачи и других механизмов, общие передаточные отношения кинематических цепей и частные передаточные отношения механизмов, выбирают числа зубьев и параметры передач, диаметры шкивов и т. п.

Кинематические схемы следует оформлять в соответствии с ГОСТ 2.701—68 и ГОСТ 2.703—68. На кинематических схемах должны быть условно изображены все подвижные и неподвижные элементы станка (кронштейны, подшипники и др.). Допускается на схеме (не показывая электрических связей) изображать электрические элементы, например сигнальные, коммутирующие и т. п., которые не имеют механических связей, но характеризуют или определяют способы использования и режимы работы станка.

В случае включения в кинематическую схему гидравлических и пневматических устройств их изображают на схеме условными обозначениями с указанием основных характеристик (производительность, давление насосов, диаметр поршня и т. д.). Все элементы на схеме должны быть изображены условно в соответствии с ГОСТ 2.770—68, а те элементы или узлы, обозначения которых не предусмотрены ГОСТом, показывают упрощенно в виде конструктивных очертаний. Соотношение размеров изображений взаимодействующих элементов на схеме должно соответствовать истинному соотношению размеров этих элементов в механизме.

Чтобы кинематическая схема давала представление об истинном расположении взаимодействующих элементов механизма, рекомендуется для построения схемы применять любую из трех аксонометрических проекций (изометрическую, диметрическую и фронтальную диметрическую).

При проектировании кинематических цепей, требующих повышенной точности передачи движения (деления, обкатки и др.), нужно учитывать следующее:

число промежуточных звеньев, составляющих кинематическую цепь, должно быть наименьшим;

зубчатые передачи от ведущего вала до конечного звена цепи располагать в порядке возрастающей степени редукции;

избегать повышающих передач, червячных с многозаходными червяками, которые обладают дополнительными линейными погрешностями; звенья с большими угловыми погрешностями располагать ближе к звену привода; особо точными должны быть конечные звенья цепи (в частности, диаметр делительного червячного колеса желательно делать значительно больше максимального диаметра обрабатываемого колеса);

следует стремиться к уменьшению линейных погрешностей червяков и ходовых винтов, так как они без всякого уменьшения переходят на сопряженные с ними звенья;

органы настройки цепей подачи, обкатки и деления располагать ближе к конечным звеньям; сменные колеса желательно брать по возможности большего диаметра, так как они имеют меньшие угловые отклонения;

не применять зубчатые колеса с корректрованным зацеплением; в особо точных цепях возможно применение зацепления с $\alpha = 15^\circ$.

Кинематическая схема зубофрезерного станка, разработанная в соответствии с принципиальной и структурной схемами, приведена на рис. 12.1.

Список литературы

1. Кузнецов М. М., Усов Б. А., Стародубов В. С. Проектирование автоматизированного производственного оборудования. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
2. Металлорежущие станки и автоматы/ А. С. Проников, Н. И. Камышный, Л. И. Волчеквич и др.; Под общ. ред. А. С. Проникова. М.: Машиностроение, 1981. 480 с.
3. Металлорежущие станки/ В. Э. Пуш, В. Г. Беляев, А. А. Гаврюшин и др.; Под общ. ред. В. Э. Пуша. М.: Машиностроение, 1985. 575 с.
4. Расчетные формулы настройки зубофрезерных станков с ЧПУ/ Ю. Потумсис, Э. Некраше-не, К. Сливинскас, Б. В. Гичан. Вильнюс: Станкостроение Литвы, 1989. 21 с.
5. Станки с программным управлением (специализированные)/ В. А. Лещенко, Н. А. Богданов, И. В. Вайнштейн и др.; Под общ. ред. В. А. Лещенко. М.: Машиностроение, 1988. 568 с.

Проектирование электрической схемы станка

13.1. Функциональные электрические схемы и элементы

В зависимости от основного назначения электрические схемы подразделяют на структурные, функциональные, принципиальные. Кроме того, существуют схемы соединений, подключений, расположения и общие.

Структурные схемы определяют основные функциональные части и узлы изделия, их назначение и взаимосвязи. Структурные схемы разрабатывают для общего представления изделия и обычно их сопровождают пояснительной запиской. В качестве примера на рис. 13.1 приведена структурная схема электропривода для металлорежущего станка. Системы управления в металлорежущих станках по своему функциональному назначению должны обеспечивать широкий диапазон изменения технологических режимов обработки. Основные функциональные узлы современных автоматизированных систем управления исполнительными механизмами металлорежущих станков следующие: источники электрической энергии (*ИЭЭ*), информационные системы управления (*ИСУ*), энергетические системы управления (*ЭСУ*), электромеханические преобразователи (*ЭМП*), исполнительные органы управления (*ИОУ*), а также информационно-измерительные системы (*ИИС*) контроля параметров объектов управления.

Назначение блока *ИЭЭ* — получить электрическую энергию из промышленной трехфазной сети, преобразовать ее к удобному виду для потребления функциональными узлами электрической схемы станка, а также осуществить блокировку и защиту в случае аварийных режимов работы.

Современные блоки *ИСУ* представляют собой слаботочные блоки, элементной базой которых являются электронные аналоговые и цифровые микросхемы малой, средней, большой и сверхбольшой интеграции. Обычно блоки *ИСУ* совместно с персональными микроЭВМ (*ПЭВМ*), микропроцессорными системами (*МПС*) составляют блоки числового программного управления (*ЧПУ*). Блок *ЭСУ* является устройством

силовой электроники, питающим электромеханические преобразователи и преобразующим электрическую энергию в механическую энергию большой мощности, которая затрачивается на процесс резания металла. Регулируемые параметры исполнительного объекта управления электрически измеряет блок *ИИС*, являющийся устройством для измерения неэлектрических величин (пути и скорости перемещения, силы резания и т. д.). Электрические сигналы обратной связи используют для корректировки программы, позволяя создавать следящие, адаптивные и прочие замкнутые системы управления.

Функциональные схемы поясняют процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия. Функциональные схемы используют для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, регулировке, контроле.

Принципиальные схемы определяют полный состав элементов и электрические связи между ними, дают детальное представление о принципах работы изделия. Принципиальные электрические схемы могут быть общими для всего станка или для отдельных функциональных узлов, а способы соединения этих узлов определяются таблицами соединений или схемами соединений. Электрические схемы типовых узлов станка приведены в подразд. 13.3.

Электрическое оборудование металлорежущих станков состоит из следующих устройств: коммутационных аппаратов для подключения и отключения станка и его отдельных элементов к электрической сети; электрических двигателей для приводов главного движения, приводов механизмов подачи и вспомогательных движе-

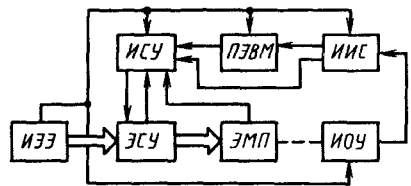


Рис. 13.1. Структурная схема автоматизированного электропривода

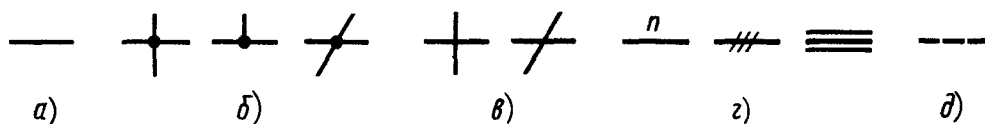


Рис. 13.2. Линии электрических связей

ний — перемещения задней бабки и ее зажима, отвода и подвода режущего инструмента, подачи смазочного материала и СОЖ и др.; электромагнитных муфт для переключения скоростей шпинделя и управления подачей суппорта. Система управления работой всех электромеханических преобразователей строится на аналоговых и цифровых микросхемах.

В качестве датчиков в станках применяют устройства измерения неэлектрических величин (перемещения, скорости, температуры, давления, силы) электрическими методами: с помощью тахогенераторов, сельсинов, индукционных и емкостных датчиков, оптоволоконных фотонизмерительных устройств и других аппаратов.

числа параллельных линий (рис. 13.2, з). Механические связи изображают штриховой линией (рис. 13.2, д).

При изображении электрических машин используют условные графические обозначения. Статор и ротор машин переменного тока изображают в виде двух окружностей (рис. 13.3, а—г). К наружной окружности присоединяют провода обмоток статора, а к внутренней — обмоток ротора. Схемы соединения обмоток статора и ротора можно изображать условными обозначениями. Например, на рис. 13.3, в показано, что обмотки статора соединены по схеме «треугольник», а ротора — по схеме «звезда», а на рис. 13.3, г — это асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. При развернутом способе обмотки статора и фазного ротора изображают в виде

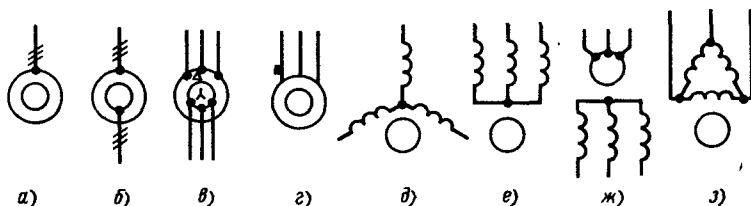


Рис. 13.3. Графическое изображение электрических машин переменного тока

Условные обозначения в электрических схемах. Электрические устройства и их элементы в электрических схемах изображают в виде условных графических обозначений. Линии электрических связей (провода, кабели) обозначают в соответствии с рис. 13.2: провод обозначается линией (рис. 13.2, а); соединение двух проводов — точкой (рис. 13.2, б), а если нет точки, то провода не имеют электрического соединения (рис. 13.2, в); электрические провода можно изображать одной линией с указанием их числа n или нанесением числа штрихов, а также с указанием

цепочек полуокружностей в соответствии со схемой соединения. На рис. 13.3, д, е показаны схемы соединения обмоток статора «звездой», а на рис. 13.3, з — «треугольником». Допускается развернутое изображение одновременно обеих обмоток или только одной (смешанное изображение).

В машинах постоянного тока (рис. 13.4) обмотку якоря изображают в виде окружности со щетками, а обмотку возбуждения — в виде цепочек полуокружностей, число которых определяет вид обмотки. Двумя полуокружностями показывают обмотку добавочных

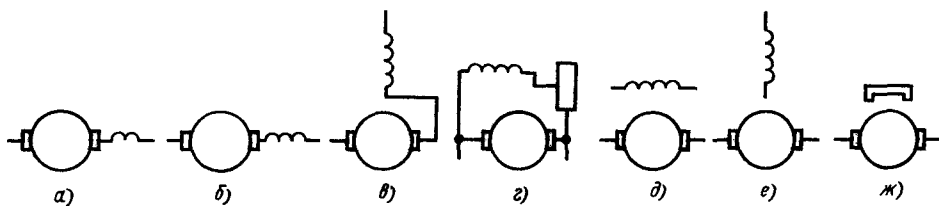


Рис. 13.4. Графическое изображение электрических машин постоянного тока

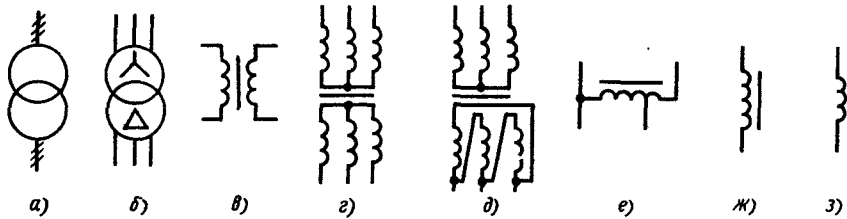


Рис. 13.5. Графическое изображение трансформаторов

полюсов (рис. 13.4, а), тремя — обмотку последовательного возбуждения (рис. 13.4, б, в), и четырьмя — шунтовую обмотку, которая может включаться по схеме параллельного возбуждения (рис. 13.4, г) или независимого (рис. 13.4, д, е). На рис. 13.4, ж показана система возбуждения, состоящая из постоянных магнитов.

Трансформаторы изображают в виде двух пересеченных окружностей (рис. 13.5, а, б) или в виде развернутых обмоток (рис. 13.5, в—д). Автотрансформаторы изображают со скользящим контактом (рис. 13.5, е). Катушки индук-

тивности изображают с указанием выдержки времени срабатывания (рис. 13.6, з). Все указанные выше контакты являются однополюсными. Многополюсные контакты можно изображать в виде однополюсных со штрихами (рис. 13.6, и), число которых соответствует числу полюсов, а также в многолинейном изображении (рис. 13.6, к).

Коммутационные устройства состоят из электромеханических устройств и контактов. Электромеханические устройства — это чаще всего электромагниты с катушками постоянного или переменного тока, которые после

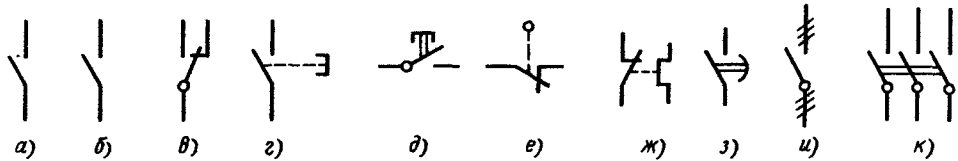


Рис. 13.6. Графическое изображение коммутационных устройств

твности, дроссели изображают в виде цепочек полуокружностей.

На рис. 13.5, ж показаны катушки индуктивности с магнитопроводом, а на рис. 13.5, з — без магнитопровода.

Ключи и переключатели имеют замыкающие (рис. 13.6, а), размыкающие (рис. 13.6, б) и переключающие (рис. 13.6, в) контакты. В основании подвижной части контактов разрешается ставить незачерненную точку. Контакты с ручным возвратом изображают с кнопкой (рис. 13.6, г). Контакты кнопочные показаны на рис. 13.6, д, а путевые — на рис. 13.6, е. Размыкающий контакт электротеплового реле приведен на рис. 13.6, ж. Контакты реле вре-

подключения к электрической сети приводят в движение подвижные части магнитопроводов, а те, в свою очередь, перемещают подвижные части контактов, переключая их. Катушки электромагнитов изображают в виде прямоугольников (рис. 13.7). Катушки бывают однофазные (рис. 13.7, а), трехфазные (рис. 13.7, б). При необходимости можно указать режим работы обмотки: срабатывает по току (рис. 13.7, в) или напряжению (рис. 13.7, г); реле времени, работающее с выдержкой времени при включении (рис. 13.7, д) или выключении (рис. 13.7, е). Катушка электротеплового реле изображена на рис. 13.7, ж, а электромагнитная муфта — на рис. 13.7, з.

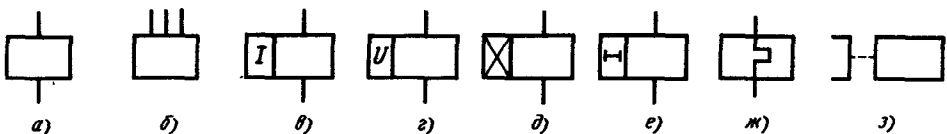


Рис. 13.7. Графическое изображение катушек контакторов

13.2. Электродвигатели

Электродвигатели делятся по назначению на электродвигатели для привода главного движения, электродвигатели для привода подачи, электродвигатели для привода вспомогательного движения и другие. На ряде станков основные движения осуществляются от одного электродвигателя с соответствующими кинематическими передачами. Применение коробок скоростей со сложной кинематикой снижает точность работы станка и увеличивает его стоимость. Основным направлением развития электроприводов станков является электромеханическое регулирование частоты вращения с малоступенчатой коробкой скоростей или без нее.

Электродвигатели для главного движения должны работать в режиме с постоянной мощностью: большая скорость резания осуществляется с меньшими силами, а большие силы резания возникают при малой скорости резания. Диапазон регулирования частоты вращения определяется пределами скорости резания для различных материалов и диаметром обрабатываемых заготовок. Для универсальных станков диапазон регулирования 10—1500 мин⁻¹, а для специальных станков массового производства главное требование — поддержание частоты вращения электродвигателя с высокой точностью для обеспечения высокой воспроизводимости оптимальных параметров резания.

В высокоавтоматизированных станках с ЧПУ функции, выполняемые электроприводом главного движения, значительно усложнены. Нужна не только стабилизация частоты вращения, но часто требуется обеспечение высокой точности позиционирования шпинделя при смене заготовок или инструмента. Эти функции осуществляются современными электродвигателями постоянного тока (ДПТ). В последнее время с развитием силовой электроники стали появляться регулируемые преобразователи напряжения и тока, инверторы на тиристорах и

транзисторах для преобразователей частоты. В связи с этим вновь возрос интерес к использованию асинхронных двигателей переменного тока для построения регулируемых электроприводов переменного тока.

Двигатели постоянного тока. Несмотря на то, что эти двигатели значительно дороже асинхронных и имеют значительно большие массогабаритные характеристики, они нашли широкое применение в металлорежущих станках.

По схеме включения двигатели постоянного тока делят на четыре типа: с независимым возбуждением (рис. 13.8, а); с параллельным возбуждением (рис. 13.8, б); с последовательным возбуждением (рис. 13.8, в); со смешанным возбуждением (рис. 13.8, г).

Двигатели с независимым возбуждением требуют два источника питания: один для подключения якоря, а другой для подключения обмотки возбуждения (Ш—шунтовой). При параллельном возбуждении якорь двигателя и обмотку возбуждения (шунтовую) параллельно подключают к одному источнику питания. В двигателях с последовательным возбуждением якорь двигателя и обмотку возбуждения (С—серийную) включают в электрическую цепь последовательно. В двигателях со смешанным возбуждением для создания магнитного поля используют одновременно шунтовую и серийную обмотки возбуждения, причем шунтовая обмотка подключается параллельно к цепи якоря двигателя и серийная — последовательно.

Независимо от схемы включения момент (Н·м) определяют на валу электродвигателя постоянного тока согласно зависимости

$$M_{cp} = k_m \Phi I_a, \quad (13.1)$$

где $k_m = Np / (2\pi a)$ — коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей электродвигателя; N — число проводников якоря; p — число пар полюсов электродвигателя; a — число параллельных ветвей проводников якоря; Φ — магнитный поток, создаваемый обмотками возбуждения или постоянными магнитами, Вб; I_a — сила тока якоря, А.

Во время пуска электродвигателя ток якоря ограничивается пусковым реостатом с сопротивлением R_p . Сила тока обмотки возбуждения регулируется резистором с сопротивлением R_r . ЭДС якоря

$$E_a = k_e \Phi n, \quad (13.2)$$

где $k_e = Np / (60a)$ — коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей машины.

Соотношение между коэффициентами k_m и k_e следующее:

$$\begin{aligned} k_e / k_m &= Np / (60a) 2\pi a / (Np) = \\ &= 2\pi / 60 = 0,105. \end{aligned}$$

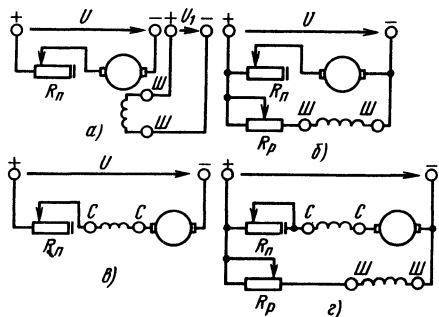


Рис. 13.8. Схемы включения двигателей постоянного тока

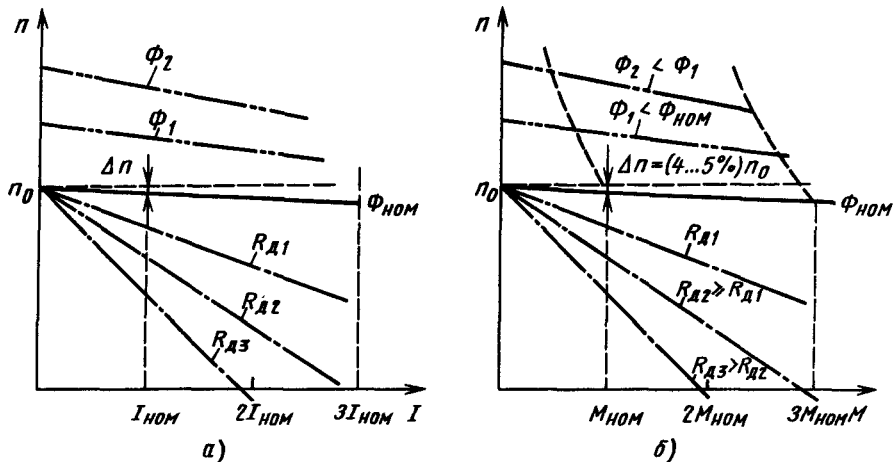


Рис. 13.9. Механическая и скоростная характеристики двигателей постоянного тока

Подставив ЭДС якоря (13.2) в уравнение $E_{\text{я}} = U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$, получим уравнение механической характеристики:

$$n = n_0 - \Delta n, \quad (13.3)$$

где $n_0 = U / (k_e \Phi)$; $\Delta n = I_{\text{я}} R_{\text{я}} / (k_e \Phi) = M R_{\text{я}} / (k_e k_{\text{м}} \Phi^2)$.

Если у электродвигателя постоянного тока удерживать магнитный поток неизменным и равным номинальному $\Phi_{\text{ном}}$, тогда естественные скоростная и механическая характеристики (рис. 13.9) будут линейными с большой жесткостью, так как сопротивление якоря мало.

Электродвигатели постоянного тока легко поддаются автоматизации. Регулировать частоту вращения можно изменением добавочного сопротивления $R_{\text{д}}$, включенного последовательно в цепь якоря, изменением магнитного потока $\Phi_2 < \Phi_1 < \Phi_{\text{ном}}$ или напряжения сети:

$$n = U / (k_e \Phi) - M (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}) / (k_e k_{\text{м}} \Phi^2). \quad (13.4)$$

В приводах главного движения металлорежущих станков используют двигатели постоянного тока серии П, 2П мощностью 0,37—200 кВт при высоте оси вращения 90—315 мм.

Условные обозначения двигателей постоянного тока расшифровывают следующим образом: 2П — второй порядковый номер серии; Φ — независимой вентиляцией, обдуваемый дополнительным вентилятором; Н — с самовентиляцией (вентилятор на валу электродвигателя); Б — с естественным охлаждением; О — с наружным обдувом от постороннего вентилятора; 90—135 — высота от основания до оси вращения, мм; S — малая длина; М — средняя длина; L — большая длина; Г — двигатель с тахогенератором; У — климатическое исполнение двигателей; 3 — третья категория разме-

щения; 4 — четвертая категория размещения.

Наиболее широкое применение с регулированием потока получили двигатели постоянного тока серии П, ПБСТ, 2ПБ, 2ПН, 2ПФ, 2ПО, диапазон регулирования которых до 4:1. Двигатели используются со встроенными тахогенераторами типа ТМТ-30, ТМГ-30П, ПТ-1, ПТ-1М, ТС-1.

На рис. 13.10 показаны схемы электродвигателей серии 2П с обозначением габаритных и установочных размеров. Технические данные этих двигателей приведены в табл. 13.1, а основные размеры — в табл. 13.2.

Параметры механических характеристик рассчитывают по паспортным данным следующим образом:

определяют номинальный момент

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} 9,55 / n_{\text{ном}};$$

находят сопротивление якоря, считая что половина всех потерь приходится на сопротивление якоря:

$$R_{\text{я}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} - P_{\text{ном}} / (2 I_{\text{ном}}^2); \quad (13.5)$$

определяют коэффициент ЭДС двигателя по формуле $k_e \Phi = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}} / n_{\text{ном}}$;

находят коэффициент момента из выражения $k_{\text{м}} \Phi = k_e \Phi / 0,105$;

рассчитывают параметры механической характеристики по уравнению (13.3);

определяют силу тока обмотки возбуждения: $I_{\text{в ном}} = U_{\text{ном}} / (R_{\text{п}} + R_{\text{ш}}) \approx (3 \dots 5) \% I_{\text{ном}}$, где

$I_{\text{в ном}}^2 R_{\text{ш}} = 0,002 P_{\text{ном}}$, отсюда $R_{\text{ш}} = 0,02 P_{\text{ном}} / I_{\text{в ном}}^2$ — сопротивление шунтовой обмотки, $R_{\text{п}}$ — сопротивление регулировочного реостата.

Находят поток по вебер-амперной характеристике (рис. 13.11).

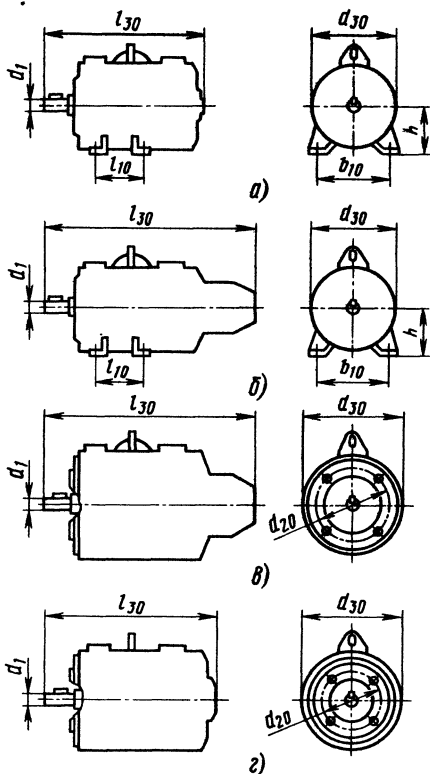


Рис. 13.10. Обозначение габаритных и установочных размеров двигателя постоянного тока: а, б — исполнения М1001; в, г — исполнения ТМ3601; а, г — без тахогенератора; б, в — с тахогенератором

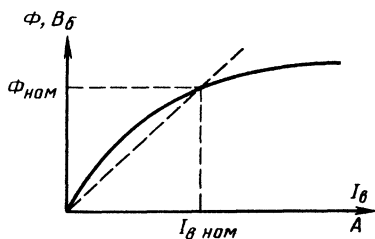


Рис. 13.11. Вебер-амперная характеристика магнитных полюсов двигателя постоянного тока

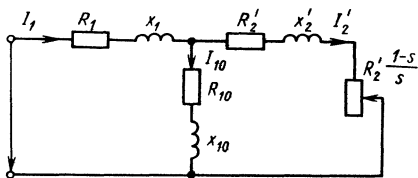


Рис. 13.12. Схема замещения трехфазного асинхронного двигателя

Параметры механической характеристики с добавочным сопротивлением в цепи якоря рассчитывают по уравнению (13.4).

Трехфазные асинхронные двигатели находят широкое применение в приводах главного движения металлорежущих станков как регулируемые электроприводы с тиристорными преобразователями. Конструкция трехфазных асинхронных двигателей состоит из корпуса, внутри которого размещен сердечник статора с пазами для обмоток статора. На валу размещены сердечник ротора с пазами для обмоток, система принудительного обдува (охлаждения). Вращающееся магнитное поле создается тремя обмотками статора, смещенными одна относительно другой на 120° . Частота вращения магнитного поля определяется зависимостью

$$n_0 = 60f_1/p, \quad (13.6)$$

где f_1 — частота переменного тока, Гц; p — число пар полюсов.

Частота вращения магнитного поля статора n_0 при различных значениях числа пар полюсов приведена ниже:

| | | | | |
|--|------|------|------|-----|
| Число пар полюсов p | 1 | 2 | 3 | |
| Частота вращения n_0 , мин ⁻¹ | 3000 | 1500 | 1000 | |
| Число пар полюсов p | 4 | 5 | 6 | 8 |
| Частота вращения n_0 , мин ⁻¹ | 750 | 600 | 500 | 375 |

ЭДС обмоток статора E_1 и ротора E_2 , возникающие в результате изменения индукции в рабочем зазоре машины при вращающемся магнитном поле, следующие:

$$E_1 = 4,44\omega_1 f_1 \Phi k_{01};$$

$$E_2 = 4,44\omega_2 f_2 \Phi k_{02}s; \quad (13.7)$$

ω_1, ω_2 — число витков соответственно обмоток статора и ротора; $\Phi = B_{cp} \pi D / (2p)$, Φ — магнитный поток одного полюса электродвигателя, Вб; k_{01}, k_{02} — коэффициенты, учитывающие пространственное расположение обмоток соответственно статора и ротора; s — скольжение ротора.

Если $E_{2k} = 4,44\omega_2 f_1 k_{02}$ — ЭДС, возникающая в обмотках неподвижного ротора, то

$$E_2 = E_{2k}s, \quad (13.8)$$

где $s = f_2/f_1 = n_0 - n/n_0$.

Ток обмотки ротора определяют (см. схему замещения рис 13.12):

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (x_2 s)^2}} = \frac{E_{2k}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + x_2^2}}, \quad (13.9)$$

где R_2 — сопротивление ротора; x_2 — индуктивное сопротивление ротора.

13.2. Основные размеры и масса электродвигателей серии 2П

| Тип двигателя | Размеры, мм | | | | | | Масса, кг, исполнения | |
|----------------------|-------------|-------|----------|------------|----------|------------|-----------------------|----------|
| | b_{10} | d_1 | d_{20} | d_{30} | l_{10} | l_{30} | IM 1001 | IM 3601 |
| 2ПН90М 2ПБ90М | 140 | 16 | 130 | 196 | 125 | 269 | 24 | 27 |
| 2ПН90МГ 2ПБ90МГ | | | | | | 493 | 29 | 32 |
| 2ПН90Л 2ПБ90Л | | | | | | 349 | 27 | 30 |
| 2ПН90ЛГ 2ПБ90ЛГ | | | | | | 518 | 32 | 35 |
| 2ПН100М 2ПБ100М | 160 | 22 | 130 | 220 | 140 | 414 | 36 | 40 |
| 2ПН100МГ 2ПБ100МГ | | | | | | 538 | 41 | 45 |
| 2ПН100Л 2ПБ100ЛГ | | | | | | 434 558 | 39 44 | 43 48 |
| 2ПН112М 2ПБ112М | 190 | 24 | 165 | 237 218 | 159 | 490 | 47 | 51 |
| 2ПН112МГ 2ПБ112МГ | | | | 237 218 | | 640 | 52 | 56 |
| 2ПН112Л 2ПБ112Л | | | | 237 218 | | 530 | 56 | 60 |
| 2ПН112ЛГ 2ПБ112ЛГ | | | | 237 218 | | 680 | 61 | 65 |
| 2ПН132М 2ПБ132М | 216 | 38 | 215 | 277 258 | 162 | 610 | 86 | 95 |
| 2ПН132МГ 2ПБ132МГ | | | | 277 258 | | 760 | 91 | 100 |
| 2ПН132Л 2ПБ132Л | | | | 277 258 | | 650 | 96 | 105 |
| 2ПН132ЛГ 2ПБ132ЛГ | | | | 277 258 | | 805 | 101 | 110 |
| 2ПН160М 2ПБ160М | 254 | 38 | 265 | 333 314 | 149 | 645 | 141 | 146 |
| 2ПН160МГ 2ПБ160МГ | | | | 333 314 | | 800 | 147 | 152 |
| 2ПН160Л 2ПБ160Л | | | | 333 314 | | 695 | 159 | 164 |
| 2ПН160ЛГ 2ПБ160ЛГ | | | | 333 314 | | 850 | 165 | 170 |

| Тип двигателя | Размеры, мм | | | | | | Масса, кг, исполнения | |
|----------------------|-------------|-------|----------|------------|----------|--------------|-----------------------|------------|
| | b_{10} | d_1 | d_{20} | d_{30} | l_{10} | l_{30} | IM 1001 | IM 3601 |
| 2ПН180М 2ПБ180М | 279 | 42 | 300 | 373 354 | 190 | 765 | 213 | 221 |
| 2ПН180МГ 2ПБ180МГ | | | | 373 354 | | 925 | 219 | 227 |
| 2ПН180Л 2ПБ180Л | | | | 373 354 | | 805 | 234 | 242 |
| 2ПН180ЛГ 2ПБ180ЛГ | | | | 373 | | 965 | 240 | 248 |
| 2ПН200М 2ПБ200М | 318 | 48 | 350 | 413 394 | 190 | 785 | 282 | 287 |
| 2ПН200МГ 2ПБ200МГ | | | | 413 394 | | 940 | 288 | 293 |
| 2ПН200Л 2ПБ200Л | | | | 413 394 | | 845 | 325 | 330 |
| 2ПН200ЛГ 2ПБ200ЛГ | | | | 413 394 | | 1000 | 331 | 336 |
| 2ПФ132М 2ПФ132Л | 216 | 38 | 215 | 280 | 203 | 895 940 | 98 108 | 107 117 |
| 2ПФ160М 2ПФ160Л | 254 | 38 | 265 | 340 | 254 | 970 1020 | 153 171 | 158 176 |
| 2ПФ180М 2ПФ180Л | 279 | 42 | 300 | 376 | 279 | 1080 1120 | 236 257 | 244 265 |
| 2ПФ200М 2ПФ200Л | 318 | 48 | 350 | 420 | 305 | 1090 1150 | 303 346 | 308 357 |

Трехфазный асинхронный двигатель — это электрическая машина, имеющая общий магнитопровод с двумя обмотками (статора и ротора), которые имеют общую магнитную связь согласно закону Ампера (закону полного тока):

$$\frac{3}{2} I_{m1} \omega_1 + \frac{3}{2} I_{m2} \omega_2 = \frac{3}{2} I_{10} \omega_1, \quad (13.10)$$

где I_{m1} , I_{m2} — соответственно амплитуда тока статора и ротора.

$I_2^* = -I_2 \omega_2 k_{02} / (\omega_1 k_{01})$ — приведенная сила тока обмотки ротора, А; I_{10} — сила тока холостого хода, А;

Для анализа работы асинхронного двигателя пользуются схемой замещения (рис. 13.12), которая облегчает расчет электрических параметров.

Мощность, потребляемую двигателем из сети, определяют по формуле

$$P = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi, \quad (13.11)$$

где I_1 — сила тока статора; U_1 — напряжение сети; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности.

Электромагнитная мощность, передаваемая вращающимся магнитным полем ротору,

$$P_{эм} = R_1 - \Delta P_{обм1} - \Delta P_{ст1} = 3E_2 I_2 \cos \varphi_2. \quad (13.12)$$

Здесь $\Delta P_{обм1} = 3I_1^2 R_1$ — потери мощности в обмотке статора, Вт, где R_1 — сопротивление обмотки статора, Ом; $\Delta P_{ст1}$ — потери мощности в сердечнике статора, Вт.

Электромагнитная мощность, преобразуемая в механическую,

$$P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{обм2} - \Delta P_{с2} - \Delta P_{мех}. \quad (13.13)$$

Здесь $\Delta P_{обм2} = 3I_2^2 R_2$ — потери мощности в обмотке ротора, где R_2 — сопротивление обмотки ротора, Ом; $\Delta P_{с2}$ — потери мощности в сердеч-

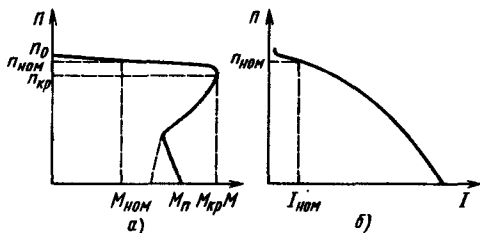


Рис. 13.13. Скоростная (а) и механическая (б) характеристики трехфазного асинхронного двигателя

нике ротора, Вт; $\Delta P_{\text{мех}}$ — механические потери вследствие трения в подшипниках, Вт;

$$P_{\text{эм}} = M\omega_0; P_{\text{мех}} = M\omega, \quad (13.14)$$

где ω_0 — частота вращения поля, с^{-1} ; ω — частота вращения вала двигателя, с^{-1} ; M — электромагнитный момент, Н·м.

Используя зависимости (13.12) — (13.14), получим выражение для электромагнитного момента:

$$M = 3I_2^2 R_2 / (\omega_0 s). \quad (13.15)$$

Преобразовав выражение (13.15) и заменив $3I_2^2 R_2 = 3E_2 I_2 \cos \varphi_2$, получим

$$M = c \Phi I_2 \cos \varphi_2, \quad (13.16)$$

где $c = 3 \cdot 4,44 f_1 \omega_2 k_{02} / \omega_0$ — конструктивный коэффициент, характеризующий момент двигателя.

С помощью схемы замещения (см. рис. 13.12, б) определим приведенный ток фазы ротора:

$$I_2' = I_1 = \frac{U_{\phi 1}}{Z_{\text{экв}}} = \frac{U_{\phi 1}}{\sqrt{(R_1 + (R_2'/s))^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

где $U_{\phi 1}$ — фазное напряжение статора. Подставив полученное выражение I_2' в уравнение момента (13.16), получим

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 s} = \frac{3U_{\phi 1}^2 R_2'}{\omega_0 s [(R_1 + (R_2'/s))^2 + (x_1 + x_2')^2]}. \quad (13.17)$$

Продифференцировав $dM/ds = 0$ и преобразовав выражение (13.17), найдем критический момент

$$M_{\text{кр}} = \frac{3U_{\phi 1}^2}{2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_2'^2})} \quad (13.18)$$

и критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_2'^2}}. \quad (13.19)$$

Подставив (13.18), (13.19) в уравнение (13.17), получим упрощенное уравнение механической характеристики:

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (13.20)$$

На рис. 13.13, а приведена механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя $n=f(M)$, а на рис. 13.13, б скоростная характеристика $n=f(I)$.

Критическое скольжение определяют по паспортным данным двигателя:

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

где $\lambda = M_{\text{кр}}/M_{\text{ном}}$ — коэффициент, указывающий, во сколько раз критический (максимальный) момент больше номинального.

Технические характеристики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А приведены в табл. 13.3, их принципиальная конструкция — на рис. 13.14, а основные размеры указаны в табл. 13.4.

Условные обозначения асинхронных двигателей расшифровывают следующим образом: 4 — порядковый номер серии; А — наименование вида электродвигателя (асинхронный); Н — обозначение двигателей защищенного исполнения; отсутствие знака означает закрытое обдуваемое исполнение; А — станина и щиты из алюминия; Х — станина алюминиевая, щиты чугунные; отсутствие знака означает, что станина и щиты чугунные или стальные; 50...315 — высота оси вращения от основания; S, M, L — установочные размеры по длине станины (малая, средняя, большая длина); А, В — обозначение длины сердечника (А — первая длина, В — вторая); 2, 4, 6, 8, 10, 12 — число полюсов; У — климатическое исполнение двигателей; 3 — категория размещения.

Параметры характеристик асинхронного двигателя рассчитывают по паспортным данным: определяют параметры холостого хода:

$$n_0 = 60f_1/p; s_0 = 0; \omega_0 = \pi n_0/30;$$

$$M_0 = 0; I_{10} \approx (0,25 \dots 0,5) I_{1\text{ном}};$$

определяют параметры номинального режима: $P_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$, η , %, $\cos \varphi_1$, λ — по справочным данным табл. 13.3;

$$s_{\text{н}} = n_0 - n_{\text{ном}}/n_0;$$

$$M_{\text{н}} = P_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}};$$

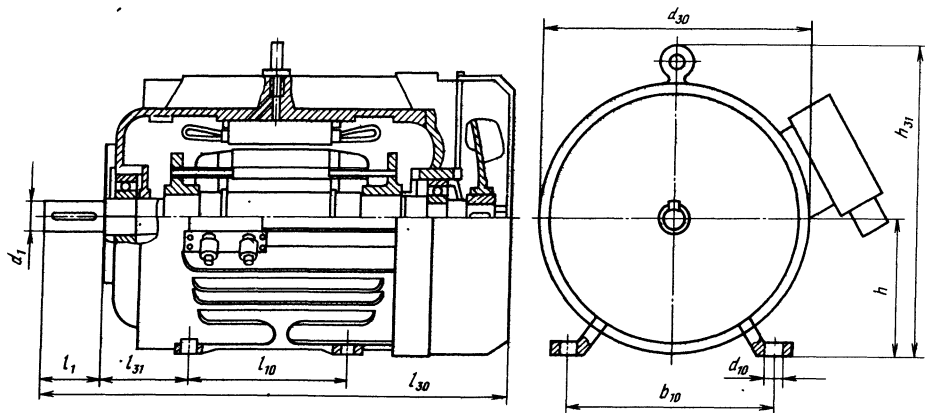


Рис. 13.14. Принципиальная конструкция трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

13.3. Технические характеристики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А

| Тип двигателя | $P_{\text{ном}}$, кВт | n , мин ⁻¹ | η , % | $\cos \varphi$ | $\frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{ном}}}$ | $\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$ | $\frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{ном}}}$ | $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$ | J , кг·м ² |
|-------------------------------|------------------------|-------------------------|------------|----------------|--|---------------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------|
| $n_0 = 3000 \text{ мин}^{-1}$ | | | | | | | | | |
| 4АА50А2У3 | 0,09 | 2740 | 60,0 | 0,70 | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 4,0 | $0,245 \cdot 10^{-4}$ |
| 4АА50В2У3 | 0,12 | 2740 | 63,0 | 0,70 | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 4,0 | $0,268 \cdot 10^{-4}$ |
| 4АА56В2У3 | 0,25 | 2740 | 68,0 | 0,77 | 2,2 | 2,0 | 1,5 | 4,0 | $4,15 \cdot 10^{-4}$ |
| 4АА63А2У3 | 0,37 | 2740 | 70,0 | 0,86 | 2,2 | 2,0 | 1,5 | 4,5 | $7,65 \cdot 10^{-4}$ |
| 4АА63В2У3 | 0,55 | 2740 | 73,0 | 0,86 | 2,2 | 2,0 | 1,5 | 4,5 | $9,0 \cdot 10^{-4}$ |
| 4А71А2У3 | 0,75 | 2840 | 77,0 | 0,87 | 2,2 | 2,0 | 1,5 | 5,5 | $9,75 \cdot 10^{-4}$ |
| 4А71В2У3 | 1,10 | 2810 | 77,5 | 0,87 | 2,2 | 2,0 | 1,5 | 5,5 | $10,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 4А80А2У3 | 1,50 | 2850 | 81,0 | 0,85 | 2,6 | 2,1 | 1,4 | 6,5 | $18,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4А80В2У3 | 2,20 | 2850 | 83,0 | 0,87 | 2,6 | 2,1 | 1,4 | 6,5 | $21,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4А90L2У3 | 3,0 | 2840 | 84,5 | 0,88 | 2,5 | 2,1 | 1,6 | 6,5 | $35,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4А100S2У3 | 4,0 | 2880 | 86,5 | 0,89 | 2,5 | 2,0 | 1,6 | 7,5 | $59,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4А100L2У3 | 5,5 | 2880 | 87,5 | 0,91 | 2,5 | 2,0 | 1,6 | 7,5 | $75 \cdot 10^{-4}$ |
| 4А112M2У3 | 7,5 | 2900 | 87,5 | 0,88 | 2,8 | 2,0 | 1,8 | 7,5 | $1,0 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А132M2У3 | 11,0 | 2900 | 88,0 | 0,90 | 2,8 | 1,7 | 1,5 | 7,5 | $2,25 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А160S2У3 | 15,0 | 2940 | 88,0 | 0,91 | 2,2 | 1,4 | 1,0 | 7,0 | $4,75 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А160M2У3 | 18,5 | 2940 | 88,5 | 0,92 | 2,2 | 1,4 | 1,0 | 7,0 | $5,25 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А180S2У3 | 22,0 | 2940 | 88,5 | 0,91 | 2,5 | 1,4 | 1,1 | 7,5 | $7,0 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А180M2У3 | 30,0 | 2945 | 90,5 | 0,90 | 2,5 | 1,4 | 1,1 | 7,5 | $8,5 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А200M2У3 | 37,0 | 2945 | 90,0 | 0,89 | 2,5 | 1,4 | 1,0 | 7,5 | $14,5 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А200L2У3 | 45,0 | 2945 | 91,0 | 0,90 | 2,5 | 1,4 | 1,0 | 7,5 | $16,8 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А225M2У3 | 55,0 | 2945 | 91,0 | 0,92 | 2,5 | 1,4 | 1,2 | 7,5 | $25 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А250S2У3 | 75,0 | 2960 | 91,0 | 0,89 | 2,5 | 1,2 | 1,0 | 7,5 | $46 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А250M2У3 | 90,0 | 2960 | 92,0 | 0,90 | 2,5 | 1,2 | 1,0 | 7,5 | $52 \cdot 10^{-2}$ |
| 4А280S2У3 | 110,0 | 2970 | 91,0 | 0,89 | 2,2 | 1,2 | 1,0 | 7,0 | 1,09 |
| 4А280M2У3 | 132,0 | 2970 | 91,5 | 0,89 | 2,2 | 1,2 | 1,0 | 7,0 | 1,19 |
| 4А315S2У3 | 160,0 | 2970 | 92,0 | 0,90 | 2,2 | 1,2 | 0,9 | 6,5 | 1,4 |
| 4А315M2У3 | 200,0 | 2970 | 92,5 | 0,90 | 2,2 | 1,2 | 0,9 | 7,0 | 1,63 |
| 4А355S2У3 | 250,0 | 2970 | 92,5 | 0,90 | 1,9 | 1,0 | 0,9 | 7,0 | 2,85 |
| 4А355M2У3 | 314,0 | 2970 | 93,0 | 0,91 | 1,9 | 1,0 | 0,9 | 7,0 | 3,23 |

$n_0 = 1500 \text{ мин}^{-1}$

| | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----------------------|
| 4АА50А4У3 | 0,06 | 1380 | 50,0 | 0,60 | 2,2 | 2,0 | 1,7 | 2,5 | $0,29 \cdot 10^{-4}$ |
| 4АА50В4У3 | 0,09 | 1370 | 55,0 | 0,60 | 2,2 | 2,0 | 1,7 | 2,5 | $0,325 \cdot 10^{-4}$ |
| 4АА56А4У3 | 0,12 | 1375 | 63,0 | 0,66 | 2,2 | 2,1 | 1,5 | 3,5 | $7,0 \cdot 10^{-4}$ |

| Тип двигателя | $P_{\text{ном}}$, кВт | n , мин ⁻¹ | η , % | $\cos \varphi$ | $\frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{ном}}}$ | $\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$ | $\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$ | $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$ | J , кг·м ² |
|---------------|------------------------|-------------------------|------------|----------------|--|---------------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------|
| | | | | | | | | | |
| 4AA56B4Y3 | 0,18 | 1365 | 64,0 | 0,64 | 2,2 | 2,1 | 1,5 | 3,5 | $7,88 \cdot 10^{-4}$ |
| 4AA63A4Y3 | 0,25 | 1380 | 68,0 | 0,65 | 2,2 | 2,0 | 1,5 | 4,0 | $12,4 \cdot 10^{-4}$ |
| 4AA63B4Y3 | 0,37 | 1365 | 68,0 | 0,69 | 2,2 | 2,0 | 1,5 | 4,0 | $13 \cdot 10^{-4}$ |
| 4AA71A4Y3 | 0,55 | 1390 | 70,5 | 0,70 | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 4,5 | $13,8 \cdot 10^{-4}$ |
| 4A71B4Y3 | 0,75 | 1390 | 72,0 | 0,73 | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 4,5 | $14,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4A80A4Y3 | 1,10 | 1420 | 75,0 | 0,81 | 2,2 | 2,0 | 1,6 | 5,0 | $32,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4A80B4Y3 | 1,50 | 1415 | 77,0 | 0,83 | 2,2 | 2,0 | 1,6 | 5,0 | $33,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 4A90L4Y3 | 2,20 | 1425 | 80,0 | 0,83 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 6,0 | $56 \cdot 10^{-4}$ |
| 4A90S4Y3 | 3,0 | 1435 | 82,0 | 0,83 | 2,4 | 2,0 | 1,6 | 6,0 | $86,8 \cdot 10^{-4}$ |
| 4A100L4Y3 | 4,0 | 1430 | 84,0 | 0,84 | 2,4 | 2,0 | 1,6 | 6,0 | $1,13 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A112M4Y3 | 5,50 | 1445 | 85,5 | 0,85 | 2,2 | 2,0 | 1,6 | 7,0 | $1,75 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A132S4Y3 | 7,50 | 1455 | 87,5 | 0,86 | 3,0 | 2,2 | 1,7 | 7,5 | $2,75 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A132M4Y3 | 11,0 | 1460 | 87,5 | 0,87 | 3,0 | 2,2 | 1,7 | 7,5 | $4 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A160S4Y3 | 15,0 | 1465 | 88,5 | 0,88 | 2,3 | 1,4 | 1,0 | 7,0 | $10,3 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A160M4Y3 | 18,5 | 1465 | 89,5 | 0,88 | 2,3 | 1,4 | 1,0 | 7,0 | $12,8 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A180S4Y3 | 22,0 | 1470 | 90,0 | 0,90 | 2,3 | 1,4 | 1,0 | 6,5 | $19 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A180M4Y3 | 30,0 | 1470 | 91,0 | 0,90 | 2,3 | 1,4 | 1,0 | 6,5 | $23,3 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A200M4Y3 | 37,0 | 1475 | 91,0 | 0,90 | 2,5 | 1,4 | 1,0 | 7,0 | $36,8 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A200L4Y3 | 45,0 | 1475 | 92,0 | 0,90 | 2,5 | 1,4 | 1,0 | 7,0 | $44,5 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A225M4Y3 | 55,0 | 1480 | 92,5 | 0,90 | 2,5 | 1,3 | 1,0 | 7,0 | $64 \cdot 10^{-2}$ |
| 4A250S4Y3 | 75,0 | 1480 | 93,0 | 0,90 | 2,3 | 1,2 | 1,0 | 7,0 | 1,02 |
| 4A250M4Y3 | 90,0 | 1480 | 93,0 | 0,91 | 2,3 | 1,2 | 1,0 | 7,0 | 1,17 |
| 4A280S4Y3 | 110,0 | 1470 | 92,5 | 0,90 | 2,0 | 1,2 | 1,0 | 5,5 | 2,3 |
| 4A280M4Y3 | 132,0 | 1480 | 93,0 | 0,90 | 2,0 | 1,3 | 1,0 | 5,5 | 2,48 |
| 4A315S4Y3 | 160,0 | 1480 | 93,0 | 0,91 | 2,2 | 1,3 | 0,9 | 6,0 | 3,08 |
| 4A315M4Y3 | 200,0 | 1480 | 94,0 | 0,92 | 2,2 | 1,3 | 0,9 | 6,0 | 3,63 |
| 4A355S4Y3 | 250,0 | 1485 | 94,5 | 0,92 | 2,0 | 1,2 | 0,9 | 7,0 | 6,0 |
| 4A355M4Y3 | 315,0 | 1485 | 94,5 | 0,92 | 2,0 | 1,2 | 0,9 | 7,0 | 7,05 |

Примечание. Значения n , η , $\cos \varphi$ приведены для номинальной нагрузки.

13.4. Основные размеры и масса электродвигателей серии 4A

| Тип двигателя | Число полюсов | Габаритные размеры, мм | | | Установочно-присоединительные размеры, мм | | | | | | | Масса, кг |
|-------------------|---------------|------------------------|----------|----------|---|----------|----------|-------|----------|----------|-----|-----------|
| | | l_{30} | h_{31} | d_{30} | l_1 | l_{10} | l_{31} | d_1 | d_{10} | b_{10} | h | |
| 4AA50 | 2, 4 | 174 | 142 | 104 | 20 | 63 | 32 | 9 | 5,8 | 80 | 50 | 3,3 |
| 4AA56A, 4AA56B | 2, 4 | 194 | 152 | 120 | 23 | 71 | 36 | 11 | 5,8 | 90 | 56 | 4,5 |
| 4AA63A, 4AA63B | 2, 4, 6 | 216 | 162 | 130 | 30 | 80 | 40 | 14 | 7 | 100 | 63 | 6,3 |
| 4A71A, 4A71B | 2, 4, 6, 8 | 285 | 203 | 170 | 40 | 90 | 45 | 19 | 7 | 112 | 71 | 15,1 |
| 4A80A | 2, 4, 6, 8 | 300 | 218 | 186 | 50 | 100 | 50 | 22 | 10 | 125 | 80 | 17,4 |
| 4A80B | 2, 4, 6, 8 | 320 | 218 | 186 | 50 | 100 | 50 | 22 | 10 | 125 | 80 | 20,4 |
| 4A90L | 2, 4, 6, 8 | 350 | 243 | 208 | 50 | 125 | 56 | 24 | 10 | 140 | 90 | 28,7 |
| 4A100S | 2, 4 | 362 | 263 | 235 | 60 | 112 | 63 | 28 | 12 | 160 | 100 | 36,0 |
| 4A100L | 2, 4, 6, 8 | 392 | 263 | 235 | 60 | 140 | 63 | 28 | 12 | 160 | 100 | 42,0 |
| 4A112M | 2, 4, 6, 8 | 452 | 310 | 265 | 80 | 140 | 70 | 32 | 12 | 190 | 112 | 56,0 |
| 4A132S | 4, 6, 8 | 480 | 350 | 302 | 80 | 140 | 89 | 38 | 12 | 216 | 132 | 77,0 |
| 4A132M | 2, 4, 6, 8 | 530 | 350 | 302 | 80 | 178 | 89 | 38 | 12 | 216 | 132 | 93,0 |
| 4A160S | 2, 4, 6, 8 | 624 | 430 | 358 | 110 | 178 | 108 | 42 | 15 | 254 | 160 | 130,0 |
| 4A160M | 2, 4, 6, 8 | 667 | 430 | 358 | 110 | 210 | 108 | 48 | 15 | 254 | 160 | 160,0 |

| Тип двигателя | Число полюсов | Габаритные размеры, мм | | | Установочно-присоединительные размеры, мм | | | | | | | Масса, кг |
|---------------|-----------------|------------------------|----------|----------|---|----------|----------|-------|----------|----------|-----|-----------|
| | | l_{30} | h_{31} | d_{30} | l_1 | l_{10} | l_{31} | d_1 | d_{10} | b_{10} | h | |
| 4A180S | 2, 4 | 662 | 470 | 410 | 110 | 203 | 121 | 55 | 15 | 279 | 180 | 175,0 |
| 4A180M | 2, 4, 6, 8 | 702 | 470 | 410 | 110 | 241 | 121 | 55 | 15 | 279 | 180 | 195 |
| 4A200M | 4, 6, 8 | 790 | 535 | 450 | 140 | 267 | 133 | 60 | 19 | 318 | 200 | 270 |
| 4A200L | 4, 6, 8 | 830 | 535 | 450 | 140 | 305 | 133 | 60 | 19 | 318 | 200 | 310 |
| 4A225M | 4, 6, 8 | 840 | 575 | 494 | 140 | 311 | 149 | 65 | 19 | 356 | 225 | 375 |
| 4M250S | 4, 6, 8, 10 | 915 | 640 | 554 | 140 | 311 | 168 | 75 | 24 | 406 | 250 | 490 |
| 4A250M | 4, 6, 8, 10 | 955 | 640 | 554 | 140 | 349 | 168 | 75 | 24 | 406 | 250 | 535 |
| 4A280S | 4, 6, 8, 10 | 1170 | 700 | 660 | 170 | 368 | 190 | 80 | 24 | 457 | 280 | 810 |
| 4A280M | 4, 6, 8, 10 | 1210 | 700 | 660 | 170 | 419 | 190 | 80 | 24 | 457 | 280 | 870 |
| 4A315S | 4, 6, 8, 10, 12 | 1265 | 765 | 710 | 170 | 406 | 216 | 90 | 28 | 508 | 315 | 1005 |
| 4A315M | 4, 6, 8, 10, 12 | 1315 | 765 | 710 | 170 | 457 | 216 | 90 | 28 | 508 | 315 | 1130 |
| 4A355S | 4, 6, 8, 10, 12 | 1390 | 856 | 794 | 210 | 500 | 254 | 100 | 28 | 610 | 355 | 1420 |
| 4A355M | 4, 6, 8, 10, 12 | 1450 | 855 | 794 | 210 | 560 | 254 | 100 | 28 | 610 | 355 | 1670 |

определяют параметры критического режима:

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi);$$

$$M_{\text{кр}} = \lambda M_{\text{ном}}; \quad s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1});$$

$$n_{\text{кр}} = n_0 - n_0 s_{\text{кр}};$$

определяют параметры момента пуска: $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$, $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$ — по табл. 13.3;

остальные параметры определяют по уравнению (13.20).

Электродвигатели для приводов механизмов подачи. В приводах механизмов подачи применяют двигатели постоянного тока, асинхронные и специальные низкоскоростные высокомоментные.

Двигатели серии ПБС, ПБСТ. Среди всего многообразия двигателей постоянного тока наибольшее применение получили двигатели серии 2П, ПБС, ПБСТ. Эти высокоскоростные двигатели имеют электромагнитное возбуждение и пазовый якорь, обычно используются с силовым редуктором для понижения момента на валу. Быстродействие таких машин невелико из-за больших моментов инерции двигателя и приведенного момента инерции механизма подачи с редуктором, но у них мала чувствительность к колебаниям нагрузки и велика устойчивость к управляющему воздействию.

Технические характеристики двигателей постоянного тока серии ПБС, ПБСТ приведены в табл. 13.5. Двигатели серии ПБСТ отличаются от двигателей серии ПБС только наличием встроенного тахогенератора.

Двигатели постоянного тока серии ПГТ с печатным дисковым якорем и электромагнитным возбуждением являются малоинерционными. Малоинерционные двигатели имеют

малую электромеханическую постоянную времени из-за малой массы дискового печатного якоря, малую индуктивность якоря и высокое быстродействие. Зависимость между моментом и током якоря — линейная. Технические характеристики малоинерционного двигателя постоянного тока серии ПГТ приведены в табл. 13.6.

Низкоскоростные высокомоментные двигатели серии ПВ устанавливают непосредственно на ходовые винты механизмов подачи. Отсутствие редукторов снижает приведенный момент инерции и повышает быстродействие. Без редукторов к валу двигателя прикладывается значительный момент, поэтому для создания таких моментов необходимы значительно большие масса и габаритные размеры по сравнению с редукторными. Однако несмотря на этот недостаток, высокомоментные двигатели с большим диапазоном регулирования нашли большое применение в металлорежущих станках.

Высокомоментный двигатель сер. ПВ представляет собой коллекторную машину постоянного тока с ферромагнитным зубцовым якорем и многополюсной магнитной системой с постоянными магнитами. Эти двигатели завод-изготовитель может поставлять со встроенным тормозом и датчиком пути. Такая отличительная особенность конструкции двигателя позволила сохранить высокую тепловую постоянную двигателя, значительно увеличить кратковременно действующий момент (до 10 раз). Применение постоянных магнитов вместо электромагнитных полюсов позволило уменьшить высоту полюсов в 2—3 раза, что привело к уменьшению диаметра машины на 20—30%. Кроме того, более равномерно распределение магнитного потока в воздушном зазоре, а следовательно, меньше пульсация силы.

13.5. Технические характеристики электродвигателей постоянного тока серии ПБС, ПБСТ

| Тип двигателя | $P_{ном}$, кВт | $n_{ном}$, мин ⁻¹ | n_{max} , мин ⁻¹ | $M_{ном}$, Н·м | $U_{ном}$, В | J , кг·м ² | Масса, кг |
|---------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------------|-----------|
| ПБС22, ПБСТ22 | 0,4 | 1000 | 2500 | 3,9 | 110, 220, 340 | 0,011, 0,012 | 56, 66 |
| | 0,6 | 1500 | 3750 | 3,9 | 110, 220, 340 | | |
| | 0,85 | 2200 | 4000 | 3,8 | 110, 220, 340 | | |
| | 1,0 | 3000 | 4000 | 3,24 | 110, 220, 340 | | |
| ПБС23, ПБСТ23 | 0,55 | 1000 | 2500 | 5,37 | 110, 220, 340 | 0,012, 0,014 | 64, 74 |
| | 0,85 | 1500 | 3750 | 5,52 | 110, 220, 340 | | |
| | 1,15 | 2200 | 4000 | 5,10 | 110, 220, 340 | | |
| | 1,3 | 3000 | 4000 | 4,23 | 110, 220, 340 | | |
| ПБС32, ПБСТ32 | 0,8 | 1000 | 2500 | 7,8 | 110, 220, 340 | 0,024, 0,025 | 81, 91 |
| | 1,2 | 1500 | 3750 | 7,8 | 110, 220, 340 | | |
| | 1,5 | 2200 | 4000 | 6,64 | 110, 220, 340 | | |
| | 1,75 | 3000 | 4000 | 5,5 | 220, 340 | | |
| ПБС33, ПБСТ33 | 1,0 | 1000 | 3000 | 9,75 | 110, 220, 340 | 0,031, 0,038 | 93, 103 |
| | 1,6 | 1500 | 3750 | 10,40 | 110, 220, 340 | | |
| | 2,1 | 2200 | 4000 | 9,30 | 220, 340 | | |
| | 2,35 | 3000 | 4000 | 7,60 | 220, 340 | | |
| ПБС42, ПБСТ42 | 1,4 | 1000 | 3000 | 13,60 | 110, 220, 340, 440 | 0,045, 0,046 | 97, 107 |
| | 2,1 | 1500 | 3750 | 13,60 | 110, 220, 340, 440 | | |
| | 2,9 | 2200 | 4000 | 12,80 | 110, 220, 340, 440 | | |
| | 3,4 | 3000 | 4000 | 11,0 | 220, 340, 440 | | |
| ПБС43, ПБСТ43 | 1,9 | 1000 | 3000 | 18,50 | 110, 220, 340, 440 | 0,056, 0,058 | 113, 123 |
| | 2,8 | 1500 | 3750 | 16,30 | 220, 340, 440 | | |
| | 3,8 | 2200 | 4000 | 16,80 | 220, 340, 440 | | |
| | 4,3 | 3000 | 4000 | 14,0 | 220, 340, 440 | | |
| ПБС52, ПБСТ52 | 2,5 | 1000 | 3000 | 24,40 | 220, 340, 440 | 0,109, 0,110 | 145, 155 |
| | 4,1 | 1500 | 3600 | 26,60 | 220, 340, 440 | | |
| | 5,5 | 2200 | 3600 | 24,40 | 220, 340, 440 | | |
| | 6,5 | 3000 | 3600 | 21,20 | 220, 340, 440 | | |
| ПБС53, ПБСТ53 | 3,3 | 1000 | 3000 | 32,20 | 220, 340, 440 | 0,129, 0,130 | 164, 174 |
| | 4,8 | 1500 | 3600 | 31,20 | 220, 340, 440 | | |
| | 6,3 | 2200 | 3600 | 28,0 | 220, 340, 440 | | |
| | 8,0 | 3000 | 3600 | 26,0 | 220, 340, 440 | | |
| ПБС62, ПБСТ62 | 4,7 | 1000 | 3000 | 46,80 | 220, 340, 440 | 0,256, 0,258 | 198, 208 |
| | 7,2 | 1500 | 3600 | 46,30 | 220, 340, 440 | | |
| | 10,0 | 2200 | 3600 | 44,40 | 220, 340, 440 | | |
| | 11,3 | 3000 | 3600 | 36,60 | 220, 340, 440 | | |
| ПБС63, ПБСТ63 | 5,4 | 1000 | 3000 | 52,70 | 220, 340, 440 | 0,306, 0,308 | 240, 250 |
| | 7,8 | 1500 | 3600 | 50,60 | 220, 340, 440 | | |
| | 11,0 | 2200 | 3600 | 48,70 | 220, 340, 440 | | |
| | 12,0 | 3000 | 3600 | 44,0 | 220, 340, 440 | | |

Технические характеристики высокомоментных двигателей типа ПБВ приведены в табл. 13.7, а их размеры — в табл. 13.8 и на рис. 13.15.

Высокомоментные двигатели постоянного тока с возбуждением магнитного потока постоянными магнитами вместо электромагнитных полюсов позволили увеличить ток якоря и момент

в несколько раз при перегрузках. Регулирование частоты вращения в этих двигателях осуществляется изменением напряжения якоря при постоянном потоке возбуждения, так как он создается постоянными магнитами. Семейство механических характеристик (рис. 13.16) соответствует зависимости (13.4) и имеет жесткую характеристику во всем

13.6. Технические характеристики малоинерционных электродвигателей постоянного тока серии ПГТ

| Тип двигателя | $P_{ном}$, кВт | $M_{ном}$, Н·м | M_{max} , Н·м | $I_{ном}$, А | I_{max} , А | ϵ^* , рад/с ² | J , кг·м ² | $U_{ном}$, В |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------|
| ПГТ-1 | 1 | 3,6 | 25,2 | 20,4 | 163 | 26 300 | 0,00075 | 60 |
| ПГТ-2 | 2 | 6,3 | 44 | 21,2 | 169 | 20 970 | 0,00205 | 110 |
| ПГТ-4 | 4 | 12,5 | 85 | 21,0 | 168 | 11 971 | 0,00710 | 220 |
| ПГТ-6 | 6 | 19,2 | 135 | 30,7 | 246 | 10 000 | 0,01350 | 220 |
| ПГТ-9 | 9 | 28,8 | 200 | 46,3 | 370 | 8120 | 0,02450 | 220 |

*Угловое ускорение.

Примечание. $n_{ном} = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n_{max} = 5000 \text{ мин}^{-1}$.

13.7. Технические характеристики высокомоментных электродвигателей серии ПВ

| Тип двигателя | $P_{ном}$, кВт | $M_{ном}$ | M_{max} | I , А | U , В | $n_{ном}$ | n_{max} | J , кг·м ² | Масса, кг | l_{30} , мм | $\tau_{мех}^*$, мс |
|---------------|-----------------|-----------|-----------|---------|---------|-------------------|-----------|-------------------------|-----------|---------------|---------------------|
| | | Н·м | | | | мин ⁻¹ | | | | | |
| ПБВ100М | 0,75 | 7,16 | 70 | 18 | 52 | 1000 | 2000 | 0,010 | 29 | 476 | 5,3 |
| ПБВ100 | 1,1 | 10,5 | 100 | 24 | 56 | 1000 | 2000 | 0,013 | 35 | 536 | 5,76 |
| ПБВ112 | 1,1 | 14,0 | 130 | 31,5 | 44 | 750 | 2000 | 0,035 | 45 | 515 | 6,75 |
| ПБВ112М | 1,1 | 17,50 | 170 | 29,0 | 47 | 600 | 2000 | 0,042 | 51 | 555 | 7,3 |
| ПБВ112 | 1,1 | 21,0 | 210 | 28,0 | 50 | 500 | 2000 | 0,049 | 57 | 595 | 7,65 |
| ПБВ132М | 2,2 | 35,0 | 350 | 50,0 | 53 | 600 | 2000 | 0,188 | 88 | 652 | 7,35 |
| ПБВ132 | 3,0 | 47,7 | 470 | 50,0 | 70 | 600 | 2000 | 0,238 | 105 | 722 | 7,85 |
| ПБВ160М | 4,0 | 76,40 | 490 | 78,5 | 66 | 500 | 1000 | 0,242 | 168 | 786 | 10,60 |
| ПБВ160 | 5,5 | 105,0 | 510 | 90,0 | 78,5 | 500 | 1000 | 0,298 | 182 | 841 | 11,80 |
| ПФВ160 | 7,5 | 143,20 | 490 | 182 | 58 | 500 | 1000 | 0,194 | 162 | 731 | 9,25 |
| ПФВ160М | 11 | 175,0 | 510 | 180 | 82 | 600 | 1000 | 0,242 | 176 | 786 | 10,60 |

*Постоянная времени механического движения.

13.8. Размеры (мм) высокомоментных электродвигателей серии ПВ

| Тип двигателя | d | d_{20} | d_{22} | d_{26} | d_{30} | l_1 | l_{20} | l_{21} | l_{30} | h_{30} |
|---------------|-----|----------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|
| ПБВ100 | 28 | 215 | 15 | 180 | 175 | 42 | 4 | 16 | 192 | 192 |
| ПБВ112 | 32 | 215 | 15 | 180 | 220 | 58 | 4 | 18 | 220 | 220 |
| ПБВ132 | 38 | 265 | 15 | 230 | 270 | 58 | 4 | 22 | 270 | 270 |
| ПБВ160 | 48 | 350 | 19 | 300 | 310 | 82 | 4 | 22 | 310 | 310 |

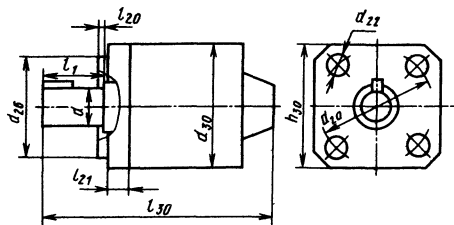


Рис. 13.15. Размеры высокомоментного двигателя серии ПВ

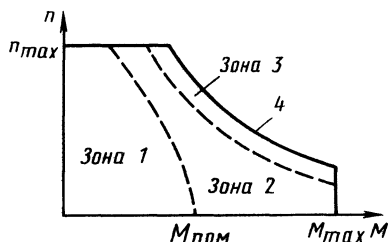


Рис. 13.16. Семейство механических характеристик высокомоментных электродвигателей

13.9. Технические характеристики высокомоментных электродвигателей серии ДПУ, ДК1 и 2ПБВ

| Тип двигателя | Р _{ном} , кВт | М _{ном} , Н·м | | М | n _{ном} , мин ⁻¹ | | U, В | I, А | J, кг·м ² | Масса, кг | L _{эл} , мм | T _{мех} , мс | T _{элет} , мс | L _{гр} , мГн | R _{об} , Ом |
|-----------------|------------------------|------------------------|-------|-------|--------------------------------------|------------------|------|------|-----------------------|-----------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| | | Н·м | Н·м | | n _{ном} | n _{пик} | | | | | | | | | |
| ДПУ87-75-1-23 | 0,075 | 0,7 | 3,15 | 3,15 | 1000 | 2000 | 23 | 4,5 | 0,21·10 ⁻³ | 3,2 | 205 | 9 | 1,5 | 1,9 | — |
| ДПУ127-220-1-30 | 0,09220 | 2,1 | 19,0 | 19,0 | 1000 | 2000 | 30 | 11 | 2,8·10 ⁻³ | 12 | 294 | 25 | 3,2 | 1,6 | — |
| ДПУ127-450-2-57 | 0,450 | 4,3 | 38,70 | 38,70 | 1000 | 2000 | 57 | 11 | 4,9·10 ⁻³ | 16 | 359 | 15 | 3,8 | 2,7 | — |
| ДК1-1,7-100АТ | 0,180 | 1,7 | 11,80 | 11,80 | 1000 | 2000 | 36 | 8 | 2,1·10 ⁻³ | 15,4 | 205 | 25 | 2,5 | 1,88 | 0,75 |
| ДК1-2,3-100АТ | 0,240 | 2,3 | 14,50 | 14,50 | 1000 | 2000 | 48 | 7,5 | 2,7·10 ⁻³ | 18 | 328 | 20 | 3,0 | 2,70 | 0,90 |
| ДК1-3,5-100АТ | 0,370 | 3,5 | 24,10 | 24,10 | 1000 | 2000 | 60 | 7,5 | 2,85·10 ⁻³ | 20 | 361 | 15 | 3,5 | 4,02 | 1,15 |
| ДК1-5,2-100АТ | 0,550 | 5,2 | 38,20 | 38,20 | 1000 | 2000 | 110 | 6,5 | 3,9·10 ⁻³ | 25,8 | 427 | 10 | 5,3 | 11,10 | 2,10 |
| 2ПБВ100М | — | 7,5 | 70 | 70 | — | 2500 | — | 20 | 0,0094 | 24,8 | 574 | 13,5 | 5,30 | 1,18 | — |
| 2ПБВ100 | — | 11,0 | 100 | 100 | — | 2000 | — | 25 | 0,0130 | 28,8 | 634 | 10,8 | 5,75 | 0,80 | — |
| 2ПБВ112 | — | 15,0 | 130 | 130 | — | 2000 | — | 28 | 0,0340 | 39,8 | 601 | 16,8 | 6,75 | 0,732 | — |
| 2ПБВ112М | — | 18,5 | 170 | 170 | — | 2000 | — | 35 | 0,0420 | 45,8 | 641 | 14,6 | 7,30 | 0,898 | — |
| 2ПБВ112 | — | 22,0 | 210 | 210 | — | 2000 | — | 32 | 0,0560 | 51,8 | 681 | 13,6 | 7,65 | 1,102 | — |
| 2ПБВ132 | — | 37,0 | 350 | 350 | — | 2000 | — | 54 | 0,1740 | 73,3 | 707 | 22,0 | 7,35 | 0,422 | — |

*Постоянная времени ЭВМГ.

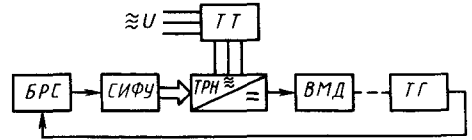


Рис. 13.17. Схема подключения к сети высокомоментного двигателя с регулированием напряжения якоря

диапазоне регулирования. Поэтому частота вращения в незначительной степени зависит от момента и остается неизменной с большой точностью при изменении сил резания в большом диапазоне. При постоянном моменте частота вращения изменяется пропорционально изменению напряжения на якоре. Изменяя напряжение, можно управлять частотой вращения двигателя.

На рис. 13.17 приведена структурная схема для регулирования частоты вращения высокомоментного двигателя ВМД, которая состоит из трехфазного трансформатора ТТ, тиристорного регулятора напряжения ТРН с управлением от синхронно-импульсно-фазового устройства СИФУ. На валу двигателя установлен тахогенератор ТГ, сигналы которого принимает блок регулятора скорости БРС и корректирует СИФУ. При такой схеме включения высокомоментного двигателя можно получить до нескольких тысяч ступеней частоты вращения во всем диапазоне регулирования.

Система магнитных полюсов возбуждения высокомоментных двигателей изготавливается из магнитных металлокерамических материалов типа феррита бария (1БИ; 1БИС; 2,4БА; 3,1БА; 3БА2), литых магнитотвердых тройных сплавов типа ални (Al—Ni—Fe) или редкоземельных кобальт-самариевых сплавов типа КС37. Из трех приведенных типов постоянных магнитов достаточно дешевы и широко доступны магниты из феррита бария и типа ални. Например, в высокомоментных двигателях типа ПБВ используют магниты из феррита бария, которые устанавливаются в намагниченном состоянии и не теряют своих магнитных свойств при повторных разборке и сборке. Постоянные магниты в двигателях типа ДК1 намагничиваются после сборки и теряют свои магнитные свойства при размыкании магнитных цепей, так как эти магниты выполнены из материала типа ални. Несмотря на этот недостаток, магниты типа ални имеют удельную магнитную энергию, в 3—10 раз большую по сравнению с магнитами из феррита бария. Самой большой удельной магнитной энергией обладают редкоземельные магниты из кобальт-самария, они не размагничиваются при размыкании магнитной цепи, но дорогие по стоимости.

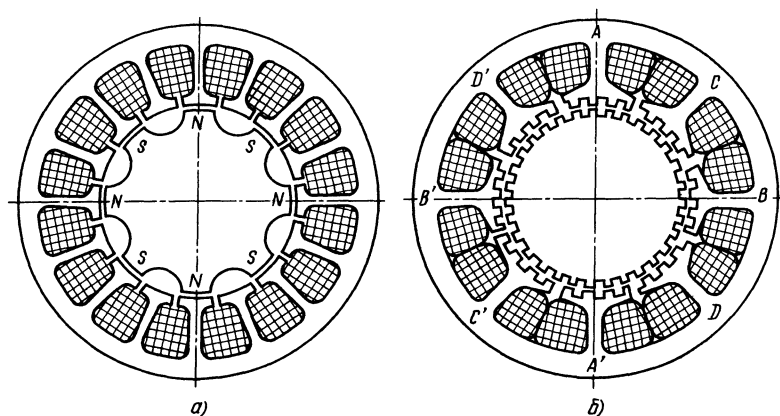


Рис. 13.18. Поперечный разрез шагового электродвигателя с ротором:
a — активным; *б* — пассивным

Технические характеристики высокомоментных двигателей, выпускаемых отечественной промышленностью, типов ДПУ, ДК1 и 2ПБВ приведены в табл. 13.9. Среди них электродвигатель типа ДПУ выполнен по лицензии фирмы Fanuc (Япония).

Электродвигатели зарубежных стран. В металлорежущих станках с ЧПУ в качестве приводов подач используют электроприводы с высокомоментными электродвигателями, которые поставляют в Россию Болгария, Польша, Чехия, Словакия.

Электроприводы «Кемрон» с электродвигателем серии ПИ производства Болгарии, тиристорные регуляторы с электродвигателями серии К77 производства Польши и «Мезоматик» с электродвигателями серии 3SHAT производства Чехии имеют аналогичные структурные схемы (см. рис. 13.17). Диапазон регулирования угловой скорости 1:10000. Высокомоментные двигатели серии ПИ, К77 и 3SHAT являются двигателями постоянного тока с возбуждением потока магнитными полюсами.

Технические характеристики высокомоментных электродвигателей серии ПИ, К77, 3SHAT приведены в табл. 13.10.

Шаговые электродвигатели (ШД) применяют в приводах подач металлорежущих станков с программным управлением. Шаговые электродвигатели относятся к электромеханическим преобразователям синхронного типа, преобразующим импульсы электрической энергии в дискретные (скачкообразные) угловые перемещения ротора или линейные перемещения якоря с фиксацией в нужном положении. Дискретность ШД приводила к возникновению вибраций во время перемещения и к ограничению точности позиционирования

в пределах механического шага*. Разработанный в настоящее время принцип электрического дробления** шага привел к сохранению основной структуры импульсного управления и увеличению до любого требуемого числа электрических состояний, обеспечивая электрическое редуцирование шага и устраняя вынужденные колебания при движении.

ШД в сочетании с цифровыми системами управления становится высокоточным при позиционировании с регулируемым скоростями движения.

По принципу действия ШД делят на двигатели с активным ротором и двигатели с пассивным ротором индуктивного типа.

Двигатели с активным ротором (рис. 13.18,а) имеют постоянные магниты на роторе и выполняются чаще трех- или четырехфазными. Эти ШД могут быть с фиксирующим моментом, создаваемым постоянными магнитами при обесточенных обмотках, имеют большие значения шага (15°, 18°, 22,5° и более) и сравнительно невысокую частоту приемистости*** (до 500 шагов/с).

Двигатели с пассивным ротором (рис. 13.18,б) имеют зубчатую структуру ротора, позволяют получить повышенную приемистость (до 1000 шагов/с) и малые значения шага (до 1°).

* Механический шаг ШД — наименьшее смещение зубцов одного полюса относительно зубцов другого полюса.

** Электрическое дробление шага — смещение ротора при изменении тока в двух соседних фазах ШД.

*** Частота приемистости — частота коммутации фазных обмоток, при которых ШД легко управляется.

32 88 13.10. Технические характеристики высокомоментных электродвигателей серии ПИ, К77, ЗШАТ

| Тип двигателя | Р _{дек.} , кВт | Н·м | | U, В | I, А | J · 10 ⁻³ , кг·м ² | Масса, кг | l ₃₀ , мм | Т _{max} , мс | τ _{МГ} , мс | L _я , мГн | R _я , Ом |
|---------------|-------------------------|------------------|------------------|------|------|--|-----------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| | | М _{ном} | М _{пак} | | | | | | | | | |
| ПИ6.04 | 0,027 | 0,13 | 1,2 | — | — | 0,065 · 10 ⁻³ | 1,5 | 190 | — | — | — | — |
| ПИ6.06 | 0,036 | 0,17 | 1,4 | — | — | 0,090 · 10 ⁻³ | 1,9 | 220 | — | — | — | — |
| ПИ8.06 | 0,073 | 0,35 | 2,3 | — | — | 0,25 · 10 ⁻³ | 3 | 235 | — | — | — | — |
| ПИ8.08 | 0,052 | 0,50 | 3,5 | — | — | 0,35 · 10 ⁻³ | 4 | 275 | — | — | — | — |
| ПИ12.05 | 0,160 | 1,50 | 11 | — | — | 2,8 · 10 ⁻³ | 9 | 290 | — | — | — | — |
| ПИ12.07 | 0,240 | 2,30 | 16 | — | — | 3,8 · 10 ⁻³ | 10,5 | 310 | — | — | — | — |
| 2ПИ12.06 | 0,240 | 2,30 | 25 | — | — | 2,8 · 10 ⁻³ | 10 | 300 | — | — | — | — |
| ПИ12.09 | 0,260 | 2,50 | 25 | — | — | 4,3 · 10 ⁻³ | 11,5 | 330 | — | — | — | — |
| ПИ12.11 | 0,490 | 4,70 | 33 | — | — | 5 · 10 ⁻³ | 12,6 | 350 | — | — | — | — |
| 2ПИ12.12 | 0,490 | 4,70 | 49 | — | — | 4,4 · 10 ⁻³ | 13 | 360 | — | — | — | — |
| 2ПИ12.18 | 0,730 | 7,0 | 63 | — | — | 5,8 · 10 ⁻³ | 16,5 | 425 | — | — | — | — |
| 10МВН | 0,790 | 10,0 | 80 | — | — | 0,018 · 10 ⁻³ | 27 | 407 | — | — | — | — |
| 13МВН | 1,00 | 13,0 | 100 | — | — | 0,028 · 10 ⁻³ | 31 | 430 | — | — | — | — |
| 21МВН | 1,70 | 21,0 | 170 | — | — | 0,033 · 10 ⁻³ | 42 | 475 | — | — | — | — |
| 23МВН | 1,80 | 23,0 | 180 | — | — | 0,033 · 10 ⁻³ | 50 | 538 | — | — | — | — |
| 47МВН | 3,70 | 47,0 | 400 | — | — | 0,135 · 10 ⁻³ | 95 | 708 | — | — | — | — |
| 47МВО | 3,70 | 47,0 | 200 | — | — | 0,033 · 10 ⁻³ | 63 | 669 | — | — | — | — |
| 70МВО | 3,60 | 70,0 | 350 | — | — | 0,113 · 10 ⁻³ | 115 | 804 | — | — | — | — |
| 100МВО | 3,10 | 100,0 | 400 | — | — | 0,134 · 10 ⁻³ | 120 | 826 | — | — | — | — |
| 130МВО | 6,80 | 130,0 | 500 | — | — | 0,18 · 10 ⁻³ | 190 | 900 | — | — | — | — |
| 170МВО | 8,80 | 170,0 | 500 | — | — | 0,21 · 10 ⁻³ | 220 | 1064 | — | — | — | — |
| К7707 | — | 7,4 | 62 | 107 | 9 | 0,0117 | 19 | 330 | 15,06 | 4,5 | 4,185 | 0,93 |
| К7708 | — | 7,4 | 61,5 | 127 | 13 | 0,0117 | 19 | 330 | 17,33 | 4,5 | 2,430 | 0,54 |
| К7709 | — | 7,4 | 60,5 | 125 | 16 | 0,0117 | 19 | 330 | 16,80 | 4,5 | 1,460 | 0,324 |
| К7710 | — | 7,4 | 60 | 111 | 22 | 0,0117 | 19 | 330 | 18,43 | 4,5 | 0,082 | 0,196 |
| К7711 | — | 14 | 120 | 103 | 17 | 0,0214 | 27 | 419 | 11,67 | 4,6 | 1,700 | 0,369 |
| К7712 | — | 14 | 119 | 133 | 22 | 0,0214 | 27 | 419 | 12,17 | 3,8 | 1,058 | 0,28 |
| К7713 | — | 14 | 119 | 121 | 30 | 0,0214 | 27 | 419 | 11,87 | 4,6 | 0,543 | 0,118 |
| К7714 | — | 14 | 119 | 100 | 40 | 0,0214 | 27 | 419 | 12,41 | 4,6 | 0,322 | 0,07 |
| К7715 | — | 20,7 | 187 | 120 | 26 | 0,0317 | 38 | 490 | 9,77 | 4,5 | 0,93 | 0,207 |
| К7716 | — | 20,7 | 187 | 134 | 33 | 0,0317 | 38 | 490 | 9,98 | 4,5 | 0,58 | 0,128 |
| К7717 | — | 17,8 | 187 | 119 | 40 | 0,0317 | 38 | 490 | 9,93 | 4,5 | 0,293 | 0,065 |
| К7718 | — | 16,0 | 190 | 116 | 43 | 0,0317 | 38 | 490 | 9,51 | 3,8 | 0,158 | 0,041 |
| К7719 | — | 27,5 | 262 | 114 | 30 | 0,044 | 48 | 582 | — | — | — | — |
| К7720 | — | 23,5 | 260 | 132 | 38 | 0,044 | 48 | 582 | — | — | — | — |
| К7721 | — | 21 | 260 | 133 | 43 | 0,044 | 48 | 582 | — | — | — | — |
| К7722 | — | 16 | 260 | 118 | 44 | 0,044 | 48 | 582 | — | — | — | — |
| 3ШАТ90 | 0,525 | 10 | 85 | 54 | 14,8 | 0,008 | 32 | 564 | 11 | — | — | — |
| 3ШАТ90М | 0,682 | 13 | 110 | 66 | 15,2 | 0,010 | 36 | 589 | 9,4 | — | — | — |
| 3ШАТ90 | 0,892 | 17 | 143 | 78 | 16,2 | 0,014 | 38 | 619 | 9,6 | — | — | — |
| 3ШАТ112 | 1,102 | 21 | 210 | 51 | 28 | 0,032 | 55 | 610 | 8,6 | — | — | — |
| 3ШАТ112М | 1,470 | 28 | 280 | 54 | 30 | 0,037 | 62 | 645 | 7,2 | — | — | — |
| 3ШАТ160 | 2,20 | 72 | 436 | 54 | 32 | 0,0467 | 76 | 732 | 7,4 | — | — | — |
| 3ШАТ160 | 1,76 | 56 | 616 | 82,5 | 69 | 0,20 | 147 | 751 | 15,5 | — | — | — |
| 3ШАТ160М | 2,68 | 85 | 943 | 32 | 67 | 0,28 | 165 | 821 | 12,8 | — | — | — |
| 3ШАТ160 | 3,94 | 125 | 1350 | 61 | 76 | 0,35 | 182 | 885 | 11 | — | — | — |

При обесточенных обмотках ШД с пассивным ротором не имеет фиксирующего момента.

Двигатель выбирают по номинальному моменту $M_{ном}$ с учетом обеспечения заданной скорости перемещения и точности позиционирования при возможно лучших массогабаритных и энергетических показателях. Увеличение углового шага способствует увеличению скорости перемещения, а уменьшение — повышению точности позиционирования, уменьшению массы ШД и потребляемой энергии.

Момент ШД $M = dW_m / (d\theta)$, где W_m — электромагнитная энергия, сосредоточенная в рабочем зазоре ШД, θ — перемещение ротора ШД, °.

С уменьшением полюсного деления уменьшается амплитудное значение переменной электромагнитной энергии при перемещении зубьев ротора относительно зубьев магнитных полюсов, а это ведет к уменьшению тока и размеров фазных обмоток ШД, т. е. к уменьшению массы и потребляемой энергии.

Наиболее важной является статическая механическая характеристика ШД. На рис. 13.19, а показано расположение магнитных полюсов по окружности.

Если примем, что зубцы магнитных полюсов A и A' совпадают с зубцами ротора (индуктора), тогда зубцы полюсов C и C' смещены на четверть периода углового шага ($\theta_C = 1/4\varphi$), зубцы полюса B и B' — на половину периода углового шага ($\theta_B = 1/2\varphi$), а зубцы полюса D — на три четверти периода углового шага ($\theta_D = 3/4\varphi$). Здесь φ — угол периода зубцовой нарезки шага.

На рис. 13.19, б показана последовательность коммутации фазных обмоток.

Чтобы индуктор вращался по часовой стрелке, необходимо поочередно подключать фазные обмотки ШД к сети с постоянным напряжением. Последовательность подключения фаз следующая: $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow A \dots$ Для вращения ротора против часовой стрелки необходимо изменить последовательность подключения фаз: $A \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \dots$ За четыре такта коммутации четырехфазного ШД ротор переместится на один угловой шаг зубцовой нарезки ф. За счет смещения зубьев полюса достигается механическое редуцирование шага, а коэффициент механического дробления шага определяется в данном случае зависимостью

$$k_m = \varphi / \alpha,$$

где φ — угловое расстояние периода зубцовой нарезки, °; α — угловой механический шаг ШД, °.

Обычно коэффициент механического дробления равен числу фаз ШД, поочередно коммутируемых.

Статическая механическая характеристика

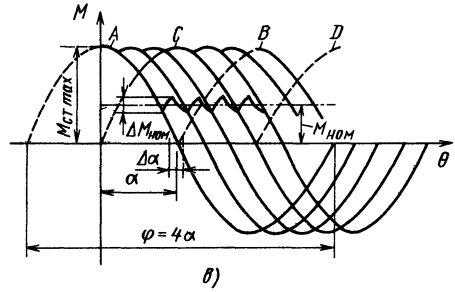
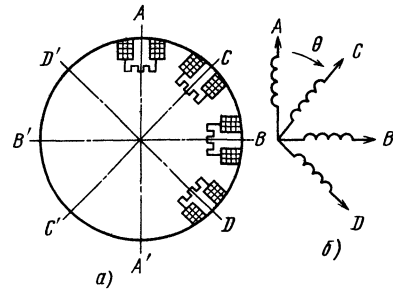


Рис. 13.19. Расположение магнитных полюсов шагового электродвигателя и статическая механическая характеристика

(рис. 13.19, б) строится при перемещении ротора на полпериода зубцового деления в одну и другую сторону от точки устойчивого равновесия (позиционирования) и удержании номинального электрического тока $I_{ном}$ в одной фазной обмотке. В этом случае возникает электромагнитный момент, обычно изменяющийся по гармоническому закону:

$$M(\theta)_A = M_{ст max} \cos 2\pi \frac{\theta}{\varphi};$$

$$M(\theta)_C = M_{ст max} \cos \left(2\pi \frac{\theta}{\varphi} - \frac{\pi}{2} \right);$$

$$M(\theta)_B = M_{ст max} \cos \left(2\pi \frac{\theta}{\varphi} - \pi \right);$$

$$M(\theta)_D = M_{ст max} \cos \left(2\pi \frac{\theta}{\varphi} - \frac{3}{2}\pi \right), \quad (13.21)$$

где $M(\theta)_A$, $M(\theta)_C$, $M(\theta)_B$, $M(\theta)_D$ — механическая характеристика при подключении к сети фазной обмотки соответственно магнитных полюсов A , C , B , $D \dots$, $M_{ст max}$ — максимальный статический момент ШД.

Если одновременно сформировать токи в двух соседних фазных обмотках (например, в фазах A и B), силы которых фиксируются в фазе A согласно косинусоидальному закону $I_a = I_{ном} \cos \theta$, а в фазе B — согласно закону

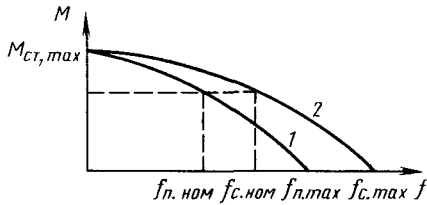


Рис. 13.20. Предельная динамическая (1), механическая (2) характеристика шагового электродвигателя

$I_b = I_{ном} \sin \beta$, то в промежутке между механическими характеристиками А и В появится дополнительное семейство механических характеристик, т. е. произойдет электрическое дробление шага α на число, равное коэффициенту электрического дробления шага $k_s = 90^\circ / \Delta \beta$, ко-

торый может принимать целые значения чисел (2, 4, 8, 16, 32, ...).

Угол $\Delta \beta$ определяет ступени изменения тока в фазах А и В. Таким образом, происходит электрическое редуцирование шага, а дополнительное семейство механических характеристик будет описываться уравнением

$$M(\theta) = M_{ст\ max} \cos(2\pi\theta/\varphi - \pi N/k_s), \quad (13.22)$$

где $M_{ст\ max}$ — максимальный статический момент; N — номер дробленого шага.

Семейство статических характеристик определяет точку позиционирования ШД и дроблений шаг. Движение ШД описывается дифференциальным уравнением $J_{ном} d^2\theta/dt^2 = M(\theta) - M_F$, где $J_{ном}$ — номинальный момент инерции нагрузки, который выбирается в пределах (1—2) J_p ; J_p — момент инерции ротора.

13.11. Технические характеристики четырехфазных шаговых электродвигателей с активным ротором

| Тип двигателя | α , шаг, ° | $M_{ном}$, Н·м | U, В | $I_{ном}$, А | Приемистость f_n , шаг/с | | $J_{ном} \times 10^7$, кг·м ² | Статический момент, Н·м | | Вибрационные нагрузки | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------|---------------|----------------------------|--------------|---|-------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------------|--------|--------|
| | | | | | номинальная | максимальная | | максимальный | номинальный | Частота, Гц | Ускорение, м/с ² | | |
| ДШ-0,025А | 22,5 | 0,0025 | 27 | 0,8 | 280 | 330 | 2,45 | 0,02 | — | 1—1000 | 100 | | |
| ДШ-0,04А | | 0,004 | | 0,9 | | | 3,43 | 0,03 | | | | | |
| ДШ-0,04В | | 0,004 | | 0,85 | 180 | 230 | 3,43 | 0,027 | | | | | |
| ДШ-0,1А | | 0,01 | | 1,5 | | | 18,6 | 0,08 | | | | | |
| ДШ-0,1В | | 0,01 | | 1,45 | 130 | 160 | 18,6 | 0,075 | | | | | |
| ДШ-0,25А | | 0,025 | | 2,0 | | | 56,4 | 0,13 | | | | | |
| ДШ-0,4А | | 0,04 | | 3,2 | 110 | 140 | 123 | 0,21 | | | | — | |
| ДШ-1А | | 0,1 | | 7,0 | 70 | 90 | 412 | 0,6 | | | | — | |
| ДШ-4А | | 0,4 | | 8,2 | 50 | 70 | 1370 | 1,6 | | | | — | |
| ДШ-6А | | 0,6 | | 10,0 | 30 | 50 | 3900 | 2,1 | | | | — | |
| ШДА-1 | 18 | 0,004 | 28 | 0,35 | 50 | — | 30 | 0,01 | — | 50—2000 | 300 | | |
| ШДА-1А | | 0,004 | 14 | 0,65 | | | 30 | 0,015 | | | | | |
| ШДА-1ФК | | 0,003 | 28 | 0,4 | — | 10 | 0,012 | 0,002 | | | | | |
| ШДА-2А | | 0,011 | 14 | 1 | — | 30 | 0,026 | — | | | | | |
| ШДА-2АМ | | 0,01 | 14 | 1,1 | — | 30 | 0,025 | — | | | | | |
| ШДА-2ФК | | 0,006 | 27 | 0,5 | 125 | — | 10 | 0,02 | | | | 0,004 | |
| ШДА-3 | | 0,023 | 29 | 1,1 | 100 | — | 20 | 0,07 | | | | — | |
| ШДА-3А | | 0,028 | 14 | 1,6 | 32 | — | 300 | 0,07 | | | | — | |
| ШДА-3Ф | | 0,012 | 29 | 1,1 | 100 | — | 20 | 0,06 | | | | 0,008 | |
| ШДА-3ФМ | | 0,02 | 27 | 1,3 | 100 | — | 10 | 0,06 | | | | 0,012 | |
| ШДА-4А | 22,5 | 0,06 | 14 | 2,8 | 50 | — | 35 | 0,16 | — | 10—2000 | 100 | | |
| ШДА-5А | | 0,1 | 14 | 3,9 | 50 | — | 65 | 0,28 | — | | | | |
| ШДА-5Ф | | 0,09 | 27 | 2,5 | 20 | — | 65 | 0,25 | 0,01 | | | | |
| ШДА-6 | | 0,16 | 28 | 3 | 50 | — | 50 | 0,41 | — | | | | |
| ШДА-6А | | 0,16 | 14 | 5,8 | 50 | — | 100 | 0,41 | — | | | | |
| ШДА-7А | | 0,25 | 27 | 7 | 70 | — | 150 | 0,6 | — | | | | |
| ШДМ-2Ф | | 0,007 | — | 0,5 | 100 | 220 | 3 | 0,032 | 0,003 | | | 5—3000 | 150 |
| ШДМ-7Ф | | 0,12 | 27 | 2,65 | 40 | 70 | 100 | 0,5 | 0,04 | | | | |
| ШДМ-7ФА | | 0,06 | — | 2,65 | 70 | 115 | 100 | 0,4 | — | | | | |
| ДШ34-0,0025-22,5 | | 22,5 | 0,0025 | — | 0,3 | 300 | 450 | 0,4 | 0,012 | | | — | 1—3000 |
| ДШ40-0,006-22,5 | 0,006 | | — | 2,5 | 430 | 650 | 1 | 0,028 | 8 | | | | |
| ДШ40-0,01-22,5 | 0,01 | | — | 2,5 | 430 | 650 | 1 | 0,028 | — | | | | |
| ДШ48-0,025-22,5 | 0,025 | | 27 | 3,7 | 340 | 500 | 4 | 0,075 | — | | | | |
| ДШ80-0,16-22,5 | 0,16 | | — | 6,4 | 230 | 630 | 100 | 0,4 | — | | | | |

13.12. Основные размеры и масса шаговых электродвигателей с активным ротором

| Тип двигателя | № рис. | d_{30} | d_1 | d_{25} | d_{20} | d_{22} | l_{30} | l_1 | l_{37} | b_{20} | b_{30} | h_{30} | Масса, кг | |
|--|----------|--|--------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------------|--|---|---|--------------------------------------|--|--|--|--------------------|
| ДШ-0,025А ДШ-0,04А ДШ-0,04В | 13.21, а | 40 | 3,8 | 40 | 48 | 3,1 | 73 83 83 | 9 | 12 | — | 50 | 48 | 0,25 0,3 0,3 | |
| ДШ-0,1А ДШ-0,1В ДШ-0,25А | | 50 | 4,8 | 50 | 60 | 4,5 | 97 | 10 | 12 | — | 63 | 61 | 0,55 | |
| | | 60 | | | 72 | 5,5 | 115 | | | | 73 | 72 | 1,1 | |
| ДШ-0,4А ДШ-1А | | | 80 100 | 8 | 80 100 | 92 115 | 7 8,5 | 127 159 | 20 | 22 | | 92 117 | 93 116 | 1,8 3,3 |
| ШДА-1, ШДА-1А ШДА-1ФК ШДА-2А, ШДА-2АМ ШДА-2ФК ШДА-3, ШДА-3А ШДА-4А ШДА-5А, ШДА-5Ф ШДА-6, ШДА-6А | 13.21, б | 32 35 38 41 48 53 61 70 | 3 3 3 2,8 | 28 — — — — — 28 | 38 — 44 — 56 63 71 79 | 3,5 — 3,5 — — — 4,5 | 62 63 80 73 79 85 93 97 | — — 14 — — 14 — — — | 14 16 14 16 17 14 — — — | — — — — — — — — | 44 — 49 — 62 69 79 83 | 40 — 44 — 66 63 72 79 | 0,13 0,14 0,21 0,23 0,35 0,55 0,8 1,1 | |
| ШДМ-2Ф ШДМ-7Ф, ШДМ-7ФА | | | 81 40 70 | 4,5 3,8 7 | 40 70 | 92 55 85 | 5,5 4,5 7 | 107 — 16 | 17 12 19,5 | 15 15 78,5 | — 52 — | 95 — — | 91 — — | 1,5 0,38 1,9 |
| ДШ34-0,0025-22,5 | | 13,22, а | | | | 40 | 3,4 | — | | 16 | 37 | — | — | 0,21 |
| ДШ40-0,006-22,5 ДШ40-0,01-22,5 | | 13,22, б 13,22, а | 34 40 | 3,8 | 32 | 25 50 | М4 4,5 | — — | 12 | 14,5 16 | — 45 | — — | — — | 0,34 0,38 |
| ДШ48-0,025-22,5 | | 13,22, б | 48 | | | 40 | 32 | М5 | — | — | 16,5 | — | — | — |
| ДШ80-0,16-22,5 | | 13,22, а | 80 | 8 | 80 | 100 | 7 | — | 20 | 25 | 86 | — | — | 2,5 |

Момент сопротивления M_F обычно выбирают равным номинальному моменту ШД $M_{ном} = (0,4...0,5) M_{ст\ max}$ для того, чтобы ШД не выпадал из синхронизма при разгоне и торможении из-за появления инерционного момента, величина которого ограничивается максимальной частотой приемистости $f_{n, \max}$.

Под приемистостью ШД f_n понимают наибольшую частоту следования управляющих импульсов, при которой возможен пуск ШД из состояния покоя без потери шага. Приемистость ШД характеризует его быстродействие. После разгона в установившемся режиме инерционные нагрузки исчезают и частота следования импульсов при номинальном моменте может быть значительно выше. Предельные динамические характеристики показаны на рис. 13.20; на котором кривая 1 соответствует разгону (торможению) ШД, а кривая 2 — установившемуся режиму следования импульсов.

Технические характеристики шаговых электродвигателей с активным ротором серий ДШ, ДШ-А, ДШ-В, ШДА, ШДМ приведены в табл. 13.11, а их основные размеры и

масса — в табл. 13.12. Обозначение габаритных и установочных размеров шаговых электродвигателей серий ДШ, ДШ-А, ДШ-В, ШДА приведено на рис. 13.21, а электродвигателей

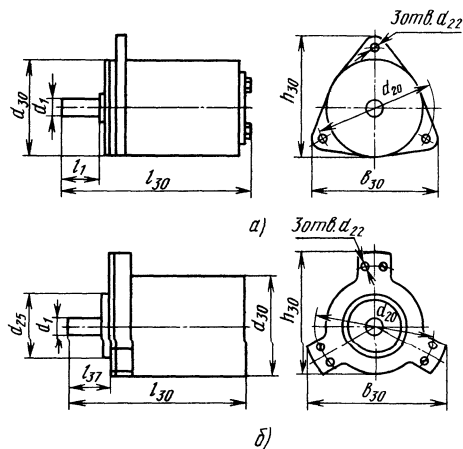


Рис. 13.21. Обозначение габаритных и установочных размеров шаговых электродвигателей сер. ДШ, ДШ-А, ДШ-В, ШДА: а — треугольный фланец; б — фланец

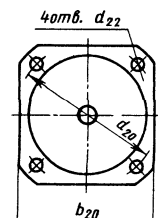
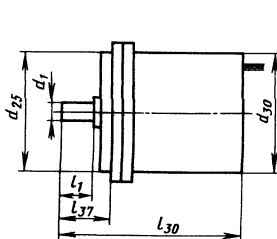
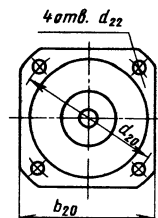
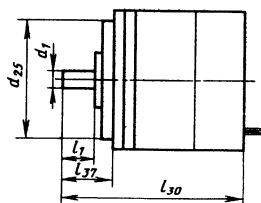
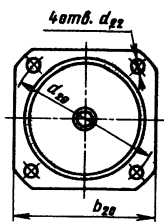
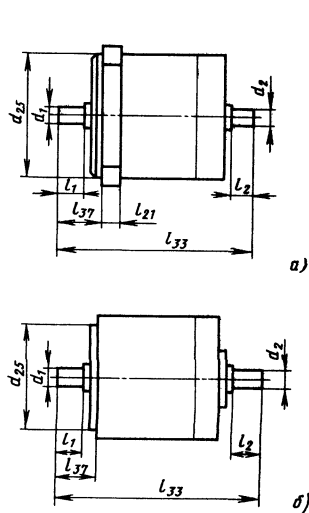


Рис. 13.22. Обозначение габаритных установочных размеров шаговых электродвигателей сер. ШДМ, ДШ с выходом вала на две стороны:
а — с фланцем, б — без фланца

Рис. 13.23. Обозначение габаритных и установочных размеров шаговых электродвигателей серий ШДР

13.13. Технические характеристики четырехфазных шаговых электродвигателей с пассивным ротором

| Тип двигателя | Шаг, ° | $M_{ном}$, Н·м | $I_{ном}$, А | Приемистость f_n , шаг/с | | $J_n \cdot 10^7$, кг·м ² | Максимальный статический момент $M_{ст max}$, Н·м | U, В | Вибрационные нагрузки | |
|---------------|--------|-----------------|---------------|----------------------------|--------------|--------------------------------------|--|------|-----------------------|-----------------------------|
| | | | | номинальная | максимальная | | | | Частота, Гц | Ускорение, м/с ² |
| ШДР-231 | 9 | 0,001 | 0,85 | 700 | 1500 | 0,1 | 0,0125 | 27 | 5—300 | 50 |
| ШДР-321 | 6,43 | 0,004 | 1,0 | 700 | 1500 | — | 0,0045 | — | — | — |
| ШДР-521 | 9 | 0,008 | 2,5 | 500 | 1500 | 5 | 0,054 | 28 | 50—1000 | 100 |
| ШДР-523 | 3 | 0,02 | 1,0 | 500 | 1500 | 20 | 0,16 | 9 | | |
| ШДР-711 | 3 | 0,03 | 2,9 | 400 | 1100 | 30 | 0,12 | 10 | — | — |
| ШДР-711В | 3 | 0,03 | 2,9 | 400 | 1100 | 30 | 0,12 | 27 | 5—3000 | 150 |
| ШДР-721 | 3 | 0,01 | 6,5 | 425 | 1100 | 280 | 0,19 | 27 | — | — |
| ШДР-5 | 2,14 | 0,015 | 1,2 | 400 | 1100 | 50 | 0,3 | 27 | 10—2000 | 50 |
| ДШ46-0,004-5 | 5 | 0,004 | 3,9 | 1000 | 1200 | 0,16 | 0,022 | 27 | 1—3000 | 200 |
| ДШ65-0,06-3 | 3 | 0,06 | 1,3 | 600 | 680 | 16 | 0,3 | 27 | 1—3000 | 200 |
| ДШ78-0,16-1 | 1 | 0,16 | 6,4 | 550 | 630 | 100 | 0,56 | 27 | 1—3000 | 200 |

13.14. Основные размеры (мм) и масса шаговых электродвигателей с пассивным ротором

| Тип двигателя | № рис | d_{30} | d_1 | d_{25} | d_{20} | d_{22} | l_{30} | l_1 | l_{37} | b_{20} | Масса, кг |
|---------------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|-----------|
| ШДР-231 | 13,22, а | 35 | 2,5 | 15 | 38,6 | 2,3 | 83 | 12 | 17,3 | 35 | 0,21 |
| ШДР-521 | 13,22, а | 48 | 3 | 42 | 54,5 | 3,5 | 98 | — | 20 | 48 | 0,46 |
| ШДР-711 | 13,22, б | 60 | 3 | 56 | 70 | 4,5 | 69 | 16 | 25 | 62 | 0,38 |
| ШДР-711В | | | | | | 4,5 | 72 | 19 | | | 0,42 |
| ШДР-721 | | | | | | 3,5 | 83 | 16 | | | 0,6 |
| ШДР-5 | — | 58 | 3 | 28 | 65 | 3,5 | 50 | — | 15 | 70 | 0,28 |
| ДШ46-0,004-5 | 13,22, а | 46 | 2,8 | 50 | 60 | 4,5 | — | 10 | 14,5 | 52 | 0,36 |
| ДШ-0,006-3 | | 65 | 8 | 60 | 75 | 5,8 | — | 20 | 24,5 | 67 | 1,2 |
| ДШ78-0,16-1 | | 78 | 12 | 80 | 100 | 7 | — | 30 | 35 | 86 | 2,3 |

серий ШДМ, ДШ34, ДШ40, ДШ48, ДШ80 с выходом вала на две стороны — на рис. 13.22.

Электродвигатели с выходом вала на две стороны имеют следующие габаритные размеры: ШДМ-2Ф $l_{33}=86$ мм, $l_2=10$ мм, $d_2=2,8$ мм; ШДМ-7Ф (А) $l_{33}=152$ мм, $l_2=16$ мм, $d_2=7$ мм; ДШ40-0,01-22,5 $l_{33}=97$ мм, $l_2=10$ мм, $d_2=2,8$ мм; ДШ48-0,025-22,5 $l_{33}=88$ мм, $l_2=12$ мм, $d_2=3,8$ мм; ДШ80-0,16-22,5 $l_{33}=157$ мм, $l_2=16$ мм, $d_2=6$ мм; ДШ46-0,004-5 $l_{33}=80$ мм, $l_2=10$ мм, $d_2=2,8$ мм; ДШ65-0,06-3 $l_{33}=140$ мм, $l_2=20$ мм, $d_2=8$ мм; ДШ78-0,16-1 $l_{33}=170$ мм, $l_2=23$ мм, $d_2=10$ мм.

Технические характеристики шаговых электродвигателей с пассивным ротором серии ШДР и ДШ приведены в табл. 13.13, а их основные размеры и масса — в табл. 13.14. Обозначение габаритных и установочных размеров этих электродвигателей приведено на рис. 13.23.

13.3. Типовые узлы электрических схем станка на бесконтактных элементах

Электрические схемы автоматизированных систем управления в металлорежущих станках могут строиться с использованием релейно-контакторных аппаратов, принцип работы которых основан на перемещении контакт-деталей после подключения катушки контактора к электрической сети. Эти же схемы могут также быть построены на бесконтактных логических элементах, которые в настоящее время вытесняют релейно-контакторные аппараты. Функциональное назначение тех и других элементов одинаковое.

Релейно-контакторные и бесконтактные элементы выполняют одинаковые логические функции и могут использоваться для разработки автоматизированных систем управления на единой теоретической основе — алгебре логики Д. Буля. Например, при замыкании (рис. 13.24, а) и размыкании контактов (рис. 13.24, б) выполняются логические функции — соответственно ДА и НЕТ. При подклю-

чении (ДА) катушки контактора к электрической сети происходит замыкание (ДА) контакта, т. е. выполняется логическая функция ДА. Если при подключении катушки контакты размыкаются (НЕТ), то выполняется логическая функция НЕ. Выполнение логических функций И, ИЛИ зависит от схемы соединения механических контактов: последовательное соединение контактов соответствует выполнению логической функции И (рис. 13.24, в), а параллельное включение соответствует выполнению логической функции ИЛИ (рис. 13.24, г).

Применение бесконтактных логических элементов целесообразно в сложных схемах, когда число входных сигналов в схеме в несколько раз превышает число выходных сигналов. Существуют рекомендации по определению границ применения логических элементов одного типа и другого. Релейно-контакторные аппараты применяют в системах управления небольшой сложности. При решении более сложных задач блок ИСУ может быть построен в виде цифровых аппаратных средств или программных устройств. Аппаратные средства и программное устройство взаимосвязаны. Любой процесс, реализуемый программным путем, может быть преобразован в эквивалентный процесс, реализуемый аппаратными средствами, и наоборот.

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) является центральным компонентом любого многофункционального автомата, информационной системы управления. Назначение АЛУ — выполнять заданный набор арифметических и логических операций обычно над двумя многоарядными операндами (числами, представленными в двоичном коде). Набор операций, выполняемых АЛУ, определяется в зависимости от области применения и его функционального назначения. Арифметические операции выполняются на базе логических операций, максимальное число которых для двух переменных ($n=2$) равно $F=2^{2^n}=16$. Полный набор 16 логических функций для двух переменных (А и В) будет следующим: постоянный нуль $F_0=0$; конъюнкция $F_1=A \cdot B$ (логическое умножение); запрет по В $F_2=A \cdot \bar{B}$; тождественность $F_3=A$; запрет по А

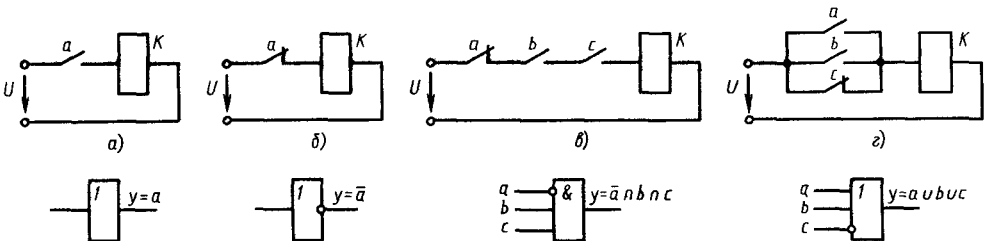


Рис. 13.24. Логические функции ключевых электросхем

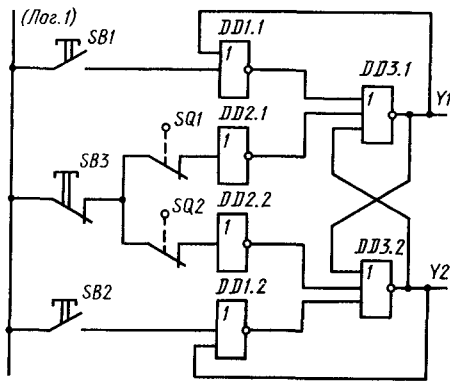


Рис. 13.25. Система управления на логических элементах

$F_4 = \bar{A} \cdot B$; тождественность $F_5 = B$; исключающая ИЛИ $F_6 = A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B$ (суммы по модулю 2); дизъюнкция $F_7 = A + B$ (логическое сложение); стрелка Пирса $F_8 = A + B$; равнозначность $F_9 = A \cdot B + \bar{A} \cdot \bar{B}$; инверсия $F_{10} = \bar{B}$, $F_{12} = \bar{A}$; импликация от B к A $F_{11} = A + \bar{B}$; импликация от A к B $F_{13} = \bar{A} + B$; штрих Шеффера (И—НЕ) $F_{14} = \bar{A} \cdot B$; постоянная единица $F_{15} = 1$. Весь набор этих функций имеет микросхема К155ИПЗ (АЛУ).

Для построения ИСУ небольшой сложности обычно используют не весь набор логических функций, а только часть его (3—6 логических функций). Например, при построении функциональных узлов ИСУ комбинационного типа, таких как сумматоры, шифраторы, мультиплексоры, построенных аппаратными средствами, используют только три логические функции: дизъюнкция (ИЛИ), конъюнкция (И), инверсии (НЕ). В ИСУ, построенных на элементах средней интеграции, используются функциональные блоки сложения, вычитания, сравнения, сдвига, счета и т. д. Такие ИСУ изготавливают на печатных платах. Более сложные ИСУ используют большие интегральные микросхемы (БИС) или сверхбольшие (СБИС) в виде набора элементов микропроцессорных комплектов, контроллеров, программируемых таймеров и т. д.

На рис. 13.25 приведен фрагмент системы управления на логических элементах совместно с коммутационными устройствами: контакторные ключи с кнопочным управлением $SB1$, $SB2$, $SB3$ и конечными выключателями $SQ1$, $SQ2$. Вращение электропривода вперед осуществляется при высоком напряжении сигнала $Y1$, а вращение назад при высоком напряжении сигнала $Y2$. Устойчиво длительное время удерживаются сигналы $Y1$ и $Y2$ элементом памяти (триггером), собранным на двух

элементах ЗИЛИ—НЕ ($DD3.1$, $DD3.2$) с обратными связями. Управление формируется логическими элементами 2ЛИ—НЕ ($DD1.1$, $DD1.2$), НЕ ($DD2.1$, $DD2.2$). Начало движения обеспечивается в любом направлении кнопками управления $SB1$ (вперед), $SB2$ (назад). Движение может быть прекращено конечными выключателями $SQ1$ (вперед), $SQ2$ (назад) или кнопкой $SB3$ (стоп).

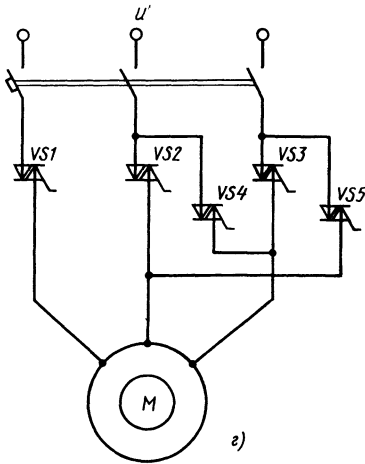
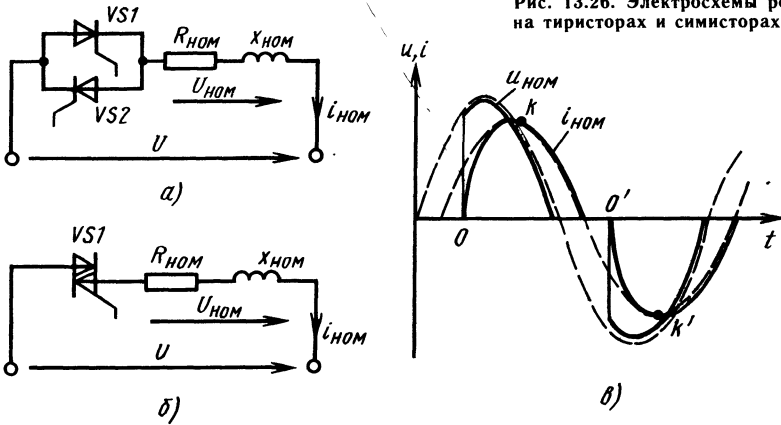
Схемы на бесконтактных логических элементах позволяют обеспечивать электрические блокировки. В схеме, показанной на рис. 13.25, сигнал входа $Y1$ подается на вход элемента $DD3.2$, отключая сигнал выхода $Y2$ (назад) и запрещающая его появление. Аналогичным образом сигнал выхода $Y2$ блокирует появление сигнала $Y1$. Схемы проектируют на основании таблиц переходов и карт Карно.

Основными силовыми бесконтактными электронными коммутационными элементами являются тиристоры и транзисторы. На силовых тиристорах строят однофазные и трехфазные регуляторы переменного напряжения, которые широко используют в электроприводах с асинхронными двигателями. Основными элементами такого регулятора являются встречно-параллельно включенные тиристоры $VS1$ и $VS2$ (рис. 13.26, а), которые подключают нагрузку (активную или активно-индуктивную) в сеть. Вместо встречно-параллельно включенных тиристоров можно устанавливать один симистор $VS1$ (рис. 13.26, б). Тиристоры и симистор представляют собой безработдеющие бесконтактные ключи, с помощью которых можно изменять среднее значение напряжения и тока на нагрузке. Принцип регулирования напряжения — это коммутация тиристоров или симистора со сдвигом фазы относительно напряжения сети (рис. 13.26, в).

Трехфазные регуляторы переменного напряжения (рис. 13.26, г) состоят из трех одинаковых однофазных регуляторов, которые используют для подключения трехфазной симметричной нагрузки, например трех фаз асинхронного двигателя. Такая нагрузка обычно требует симметричного регулирования, т. е. одинакового угла включения каждого тиристора, начиная его отсчет от нуля фазного напряжения каждой фазы.

Особенности выбора параметров тиристоров и симисторов заключаются в том, что обмотки статора и ротора трехфазного асинхронного двигателя имеют магнитную связь между собой. Поэтому в них наводится ЭДС, которая существенно изменяет форму фазного напряжения. Это определяет отличительные особенности выбора тиристоров по напряжению и току. Например, для нереверсивных (рис. 13.27) и для реверсивных систем управления силовые тиристоры (бесконтактные ключи),

Рис. 13.26. Электросхемы регуляторов напряжения на тиристорах и симисторах



подключающие фазные обмотки статора асинхронного двигателя к сети переменного тока, следует выбирать по максимальному напряжению (классу) и по пусковому току двигателя согласно зависимости $U = 1,2U_{мн}k_1k_2$, где $U_{мн}$ — амплитуда линейного напряжения сети, В; $k = 1,05...1,07$ — коэффициент допустимого повышения напряжения сети; $k_2 = 1,4...1,5$ — коэффициент допустимого повышения мощности для асинхронных двигателей мощностью до 4,5 кВт, учитывающий повышение напряжения на тиристорах вследствие наведения ЭДС в фазах асинхронного двигателя; $k_3 = 1,5...1,8$ — для асинхронных двигателей мощностью более 4,5 кВт.

Сила тока электродвигателя

$$I \geq k_3 I_{НОМ} / (k_4 k_5).$$

Здесь k_3 — коэффициент кратности пускового тока по отношению к номинальному $I_{НОМ}$; $k_4 = 1$ — коэффициент запаса для симисторов; $k_4 = 2,2$ — коэффициент запаса для встречно-параллельно включенных тиристорov; $k_5 = 0,5$ —

коэффициент запаса при естественном охлаждении с $I = 50$ А; $k_5 = 0,4$ — коэффициент запаса с $I = 100$ А; $k_5 = 0,3$ — коэффициент запаса с $I = 160...500$ А.

Включение и выключение тиристорov осуществляется устройством импульсно-фазового управления. Система импульсно-фазового управления (СИФУ) предназначена для изменения угла включения тиристорov в функции входного управляющего сигнала. Требования к СИФУ заключаются в обеспечении необходимого диапазона изменения углов, отпирающих тиристорov и обеспечивающих достаточную симметрию углов включения тиристорov в различных фазах.

Для выполнения своих функций СИФУ должна содержать три основных узла: узел синхронизации, фазосдвигающее устройство и формирователи импульсов тока управления тиристорov. Сложность СИФУ зависит от

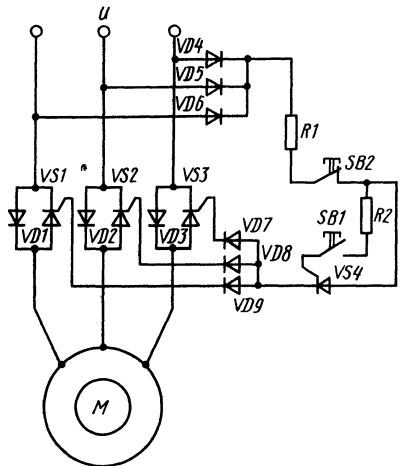


Рис. 13.27. Система управления асинхронным электродвигателем

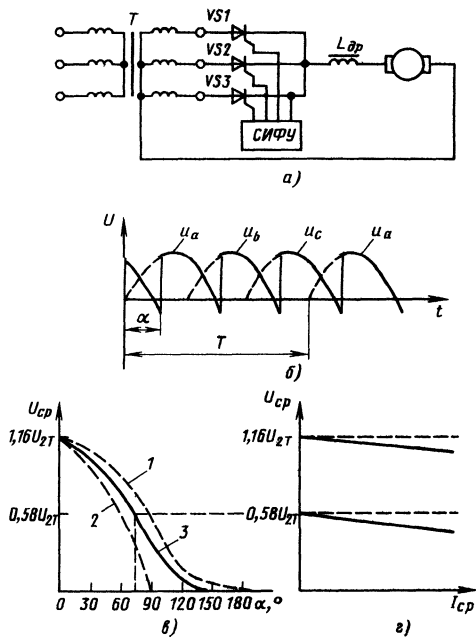


Рис. 13.28. Трехфазная нулевая схема регулируемого выпрямителя и ее характеристики

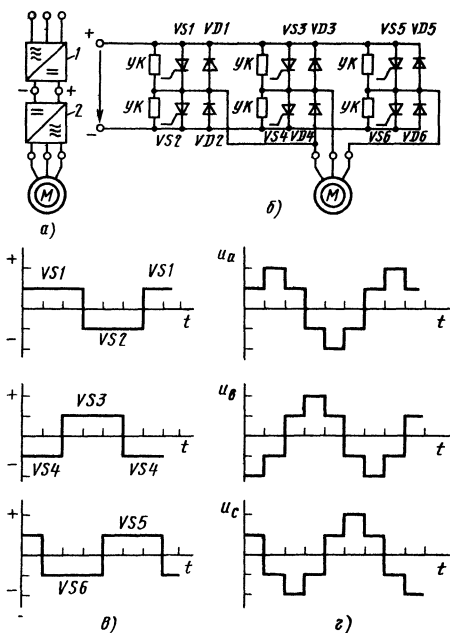


Рис. 13.29. Схемы (а, б) автономного инвертора для получения трехфазного переменного тока с регулируемой частотой и его характеристики (в, г): УК — устройство коммутации для выключения тиристор

функционального назначения. Наиболее простое СИФУ, если тиристоры работают в ключевом режиме без регулирования напряжения. На рис. 13.27 приведена схема системы управления для включения и отключения асинхронного двигателя без регулирования напряжения. СИФУ представляет собой трехфазный выпрямитель на трех диодах $VD4, VD5, VD6$, фазные напряжения которых подаются через диоды $VD7, VD8, VD9$ на управляющие входы тиристоров $VS1, VS2, VS3$, если ключ $SB1$ включен. Ток управления I_y , поданный на управляющие входы этих тиристоров, ограничивается резистором с сопротивлением R_1 и определяется по зависимости $I_y = 0,7U_{mл}/R_1$, где $U_{mл}$ — амплитуда линейного напряжения. Отключение асинхронного двигателя производится размыканием ключа $SB2$.

Трехфазная нулевая схема регулируемого выпрямителя (рис. 13.28), построенная на трех тиристорах, которые включены в фазы вторичной обмотки трансформатора, используется в качестве источника питания с регулируемым напряжением в цепи якоря двигателя постоянного тока типа 2П или высокомоментного двигателя типов ПВ, ДПУ. Наибольшее среднее напряжение регулируемого выпрямителя $U_{ср max} = 1,16U_{2T}$, где U_{2T} — фазное действующее напряжение вторичной обмотки трансформатора. Напряжение регулируется изменением угла включения α тиристоров.

На рис. 13.28, б приведены осциллограммы изменения напряжения на выходе регулятора при угле включения тиристоров $\alpha = 75^\circ$, а на рис. 13.28, в — регулировочная характеристика выпрямителя (кривая 3), которая изменяется в зависимости от индуктивности дросселя и индуктивности якоря. Штриховыми линиями 1 и 2 показаны границы изменения регулировочной характеристики при изменении индуктивности от нуля (кривая 1) до бесконечности (кривая 2).

На рис. 13.28, г приведены внешние характеристики выпрямителя.

В настоящее время в металлорежущих станках используют электроприводы с асинхронными двигателями переменного тока или вентильными двигателями*, регулирование частоты вращения которых осуществляется частотным преобразователем. Структурная схема частотного преобразователя (рис. 13.29, а) может состоять из регулируемого выпрямителя 1 и автономного инвертора 2, последовательно включенных. Регулируемый выпрямитель

* Вентильные двигатели имеют обмотку возбуждения, как у двигателя постоянного тока, и якорь, выполненный подобно фазному ротору асинхронного двигателя.

преобразует переменное напряжение в постоянное с изменяющейся величиной, а автономный инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное с регулируемой частотой. Таким образом регулируется на выходе частотного преобразователя частота переменного тока и величина напряжения.

Автономный инвертор напряжения (рис. 13.29, б) для получения трехфазного переменного напряжения с регулируемой частотой состоит из трех пар тиристоров, соединенных с тремя фазными обмотками электродвигателя. Тиристоры $VS1, VS3, VS5$ в открытом состоянии соединяют фазные обмотки с клеммой «+» источника питания, а тиристоры $VS2, VS4, VS6$ — с клеммой «-».

Временная диаграмма выходного напряжения зависит от последовательности коммутации тиристоров. Если использовать пофазную коммутацию тиристоров [два тиристора поочередно подключают одну фазу двигателя в течение половины периода к «+», а в течение другой половины периода к «-» ($\lambda = T/2$), причем коммутация тиристоров двух других фаз смещена во времени на $2/6$ части периода (рис. 13.29, в)], то в фазах электродвигателя будет ступенчато-переменное напряжение (рис. 13.29, г), имеющее сдвиг одной фазы относительно другой на $2/6$ части периода. Тиристоры автономного инвертора открываются при подаче импульсного напряжения на управляющие электроды, а закрываются приложением обратного напряжения к ним, сформированным специальным устройством коммутации (УК)*.

Для питания фазных обмоток шагового электродвигателя с электрическим дроблением шага широко применяют автономные полумостовые инверторы напряжения, в которых в качестве бесконтактных ключей используют биполярные транзисторы (рис. 13.30, а). В этом случае переменный ток в фазах электродвигателя может формироваться способом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Транзисторный преобразователь, регулирующий силу тока в фазах электродвигателя, работает в ключевом режиме. Это повышает КПД транзисторного преобразователя, облегчает условия работы силовых транзисторов выходного каскада. Система управления, построенная на цифровых микросхемах (также работающих в ключевом режиме), легко сопрягается с силовыми транзисторными преобразователями и составляет единую структуру цифрового регулятора тока в фазных обмотках электродвигателя.

* УК — устройство коммутации, используемое для закрытия тиристоров в сети постоянного тока.

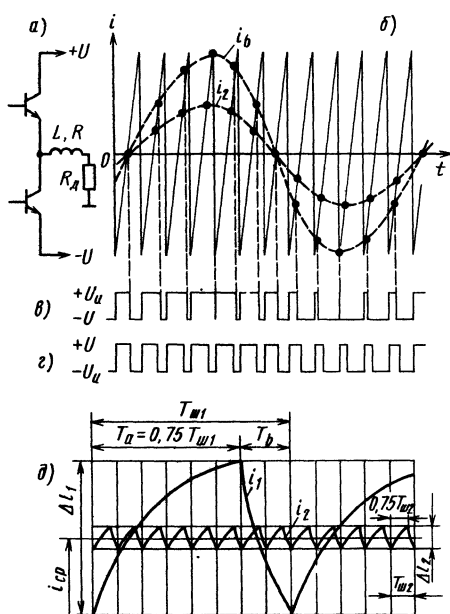


Рис. 13.30. Полумостовая схема автономного импульсного инвертора для получения переменного тока с регулируемой амплитудой и частотой

Сила тока в фазах электродвигателя регулируется способом ШИМ* (рис. 13.30, б), на рис. 13.30, в показано изменение скважности импульсов. Сила тока в фазах в этом случае изменяется по экспоненциальной зависимости, получая положительные и отрицательные приращения за период импульсной последовательности. Среднее значение тока определяется средним напряжением. Размах колебаний силы тока зависит от времени периода импульсной последовательности.

На рис. 13.30, д показаны графики изменения тока i_1 в фазах электродвигателя; $T_{ш1}$ — период коммутации транзисторных ключей низкой частоты ШИМа. При увеличении частоты коммутации транзисторных ключей в 8 раз (период $T_{ш2}$) величина размаха колебаний тока уменьшается. Скважность импульсов в первом и во втором случаях одинакова ($T_a = 0,75 T_{ш1}$; $T_a = 0,25 T_{ш2}$), средние значения силы тока в фазах электродвигателя тоже одинаковы, а размах колебаний во втором случае значительно меньше. Таким образом, автономный импульсный инвертор, построенный на двухтактном транзисторном преобразователе, позволяет формировать ток в фазах с требуемой точностью, регулируя частоту ШИМ и скважность

* ШИМ — широтно-импульсная модуляция.

импульсов. Амплитуда тока регулируется пределами изменения скважности. Например, график изменения тока i_1 (см. рис. 13.30, б) соответствует изменению скважности, показанному на рис. 13.30, в, а график изменения тока i_2 соответствует изменению скважности, показанному на рис. 13.30, г. Дискретно изменяя скважность импульсов, например с точностью $1/256$ частью периода, можно получить 256 средних значения тока, которые можно устанавливать на длительный промежуток времени при позиционировании электродвигателя или ступенчато изменять по любому закону с требуемой частотой.

Список литературы

1. **Справочник** по электрическим машинам: В 2-х т. Т. 1/И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. С. Малышев и др. Под общ. ред. И. П. Копылова. М.: Электроатомиздат, 1988. 456 с.
2. **Справочник** по электрическим машинам: В 2-х т. Т. 2/И. П. Копылов, Б. К. Клоков, М. П. Дорохин и др. Под общ. ред. И. П. Копылова. м.: Энергоатомиздат, 1989. 688 с.
3. **Электротехнический справочник**: В 3-х т. Т. 2/И. Б. Пешков, Ю. С. Пингаль, А. Н. Старостин и др. 7-е изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 712 с.

Проектирование гидравлических и пневматических схем станка

14.1. Структура, элементная база и области применения гидропневмоприводов

Гидравлический и пневматический приводы являются неотъемлемой частью современного станка и в значительной мере определяют его рабочие характеристики. Наиболее ответственным этапом в проектировании гидропневмосистем станка является разработка принципиальных схем. Гидравлическую и пневматическую схемы станка, как правило, вычерчивают отдельно, они представляют собой графическое изображение совокупности гидравлических и пневматических элементов и устройств, с помощью которых наиболее рациональным способом достигаются требуемые технические показатели станка. Основные элементы гидропневмосистем, их условные графические обозначения по ГОСТ 2.780—68, ГОСТ 2782—68, ГОСТ 2.784—70, ГОСТ 2.796—81 приведены в табл. 14.1.

Каждый элемент на принципиальной схеме имеет буквенное обозначение: А — устройство; АК — аккумулятор; Б — бак; БПВ — блок подготовки воздуха; Г — глушитель пневматический, ГМ — гидромотор; ГЗ — гидрозамок; ГЗМ — гидрозамок модульный; Д — двигатель поворотный; ДП — делитель потока; ДР — дроссель; ДРО — дроссель с обратным клапаном; ДКМ — дроссель с клапаном обратным модульный; К — клапан; КД — клапан давления; КО — обратный клапан; КОМ — клапан обратный модульный; КП — клапан предохранительный; КПМ — клапан модульный предохранительный; КР — клапан редукционный; КРМ — клапан редукционный модульный; МР — маслораспылитель; МН — манометр; КМН — кран переключения манометра; Н — насос; Р — распределитель; РД — реле давления; СД — сигнализатор давления; РП — регулятор потока; РПМ — регулятор потока модульный; Т — теплообменник; Ф — фильтр, ФВ — фильтр-влагоотделитель; Ц — цилиндр.

В пределах группы элементы могут иметь порядковые номера, например Ц1, Ц2, Ц3, Р1, Р2, Р3. При вычерчивании принципиаль-

ной схемы все элементы, как правило, изображают в исходном положении, например распределители при отключенных магнитах. Вблизи двигателей ставят стрелки с указанием направления действия: «Зажим», «Фиксация» и т. п. Составной частью принципиальной схемы является таблица с перечнем элементов, который записывают в алфавитном порядке с их буквенно-цифровым обозначением, наименованием, типоразмером и числом. В графе «Примечание» таблицы указывают основные параметры гидропневмоаппаратуры — условный проход, номинальное давление и расход, а у двигателей — диаметры поршня и штока, длину хода, частоту вращения и т. п. Элементы одного типа, например распределители Р3, ..., Р7, записывают в одну строку. Всем линиям связи присваивают порядковые номера 1, 2, 3, 4, ..., как правило в направлении потока. Номера ставят около обоих концов линий, дренажные линии нумеруют в последнюю очередь.

Наибольшее распространение в станкостроении получили гидросистемы с разомкнутой циркуляцией и параллельным соединением потребителей. Функциональные схемы таких гидросистем, как правило, одинаковые и обычно включают в себя энергетический агрегат (насосную установку), блок направляющей и регулирующей гидроаппаратуры, поток масла от которого подводится к объемным гидродвигателям (гидроцилиндрам, гидромоторам) и после использования вновь сливается в бак насосной установки (рис. 14.1).

Принципиальные гидросхемы различных станков различаются лишь типоразмерами и числом используемых гидродвигателей и способами их управления посредством выбора соответствующей гидроаппаратуры. Гидропривод получил достаточно широкое применение в станках ввиду следующих достоинств;

он может создавать значительные и регулируемые с высокой степенью точности силы и мощности при минимальных габаритных размерах и массе;

может бесступенчато регулировать скорость перемещения исполнительных органов простыми

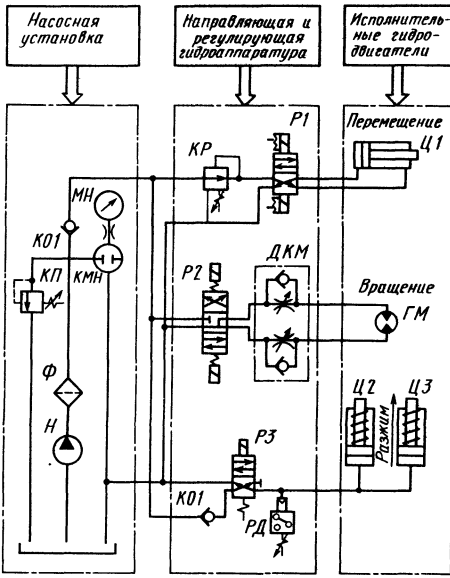


Рис. 14.1. Функциональная и принципиальная схемы гидросистемы

средствами, в том числе обеспечивать с помощью гидроцилиндров прямолинейные движения без кинематических преобразований;

имеет малую чувствительность к колебаниям нагрузки, может работать в напряженных динамических режимах, имеет простую защиту от перегрузок.

Недостатки гидропривода следующие: высокая чувствительность и загрязненность

рабочей жидкости, зависимость ее вязкости от изменения температуры, высокие требования к качеству изготовления элементов гидропривода, к культуре обслуживания, возможность загрязнения окружающей среды вследствие утечки рабочей жидкости, пожароопасность. Однако эти недостатки могут быть незначительны при правильном конструировании, изготовлении и эксплуатации гидроприводов.

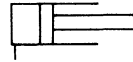
Наиболее эффективно применение гидропривода в механизмах смены инструмента, подач, копировальных суппортах, устройствах уравнивания, разгрузки, фиксации и зажима, устранения зазоров, переключения зубчатых колес, поворота столов и револьверных головок, перемещения пинолей и т. п.

Характерной особенностью применения пневмопривода в станках является преобладание магистрального источника подачи рабочего тела (газа) к потребителям, в то время как в гидроприводе используют в основном насосный и аккумуляторный источники. Рабочим телом в пневмоприводе является воздух с температурой 15—20 °С и давлением 0,4—0,6 МПа, который разводится по пневмоманистралям к потребителям от центральной компрессорной установки. Так как эти магистрали имеют достаточную протяженность и сжатый воздух в них загрязнен остатками воды, масла (в жидком и газообразном состоянии), а также твердыми включениями, то необходимой частью пневмосистемы каждого станка является наличие блока подготовки воздуха. В пневмоприводе отсутствуют сливные и дренажные линии, а отработавший газ выпускается через выхлопную пневмолинию в атмосферу, что упрощает эксплуатацию. В остальном принципы построения пневмосистемы и функции ее отдельных элементов (рис. 14.2) те же, что и гидропривода.

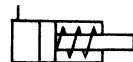
14.1. Условные графические обозначения элементов гидропневмосистем

Наименование и обозначение

Гидропневмоцилиндры:
одностороннего действия



с возвратной пружиной



плунжерный

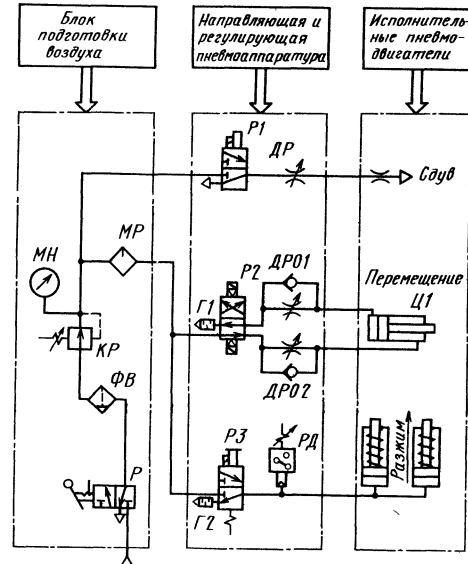
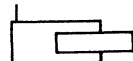
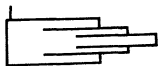

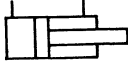

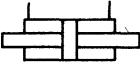

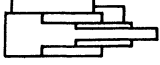

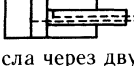

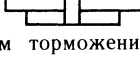
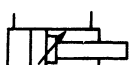

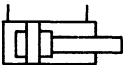


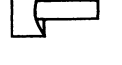
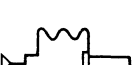
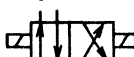

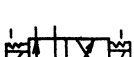
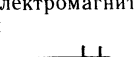
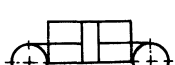
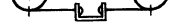
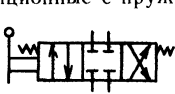


Рис. 14.2. Функциональная и принципиальная схемы пневмосистемы

| Наименование и обозначение | Наименование и обозначение |
|---|---|
| телескопический | Поворотный гидродвигатель |
|  |  |
| двустороннего действия с односторонним штоком | Поворотный пневмодвигатель |
|  |  |
| с двусторонним штоком | Гидромотор нерегулируемый |
|  |  |
| телескопический | Пневмомотор нерегулируемый |
|  |  |
| с подводом масла через односторонний шток | Насосы: |
|  | нерегулируемый |
| с подводом масла через двусторонний шток |  |
|  | регулируемый |
|  |  |
| с регулируемым торможением в конце хода с обеих сторон | Гидрораспределители: |
|  | с электрическим управлением |
|  | трехпозиционные с пружинным возвратом |
| мембранный |  |
|  | двухпозиционные с двумя электромагнитами |
|  |  |
| сильфонный | с двумя электромагнитами и фиксатором |
|  |  |
| сдвоенный | с одним электромагнитом и пружинным возвратом |
| поршневой с гибким штоком |  |
|  | с ручным управлением |
|  | трехпозиционные с пружинным возвратом |
| |  |

двухпозиционные с фиксатором



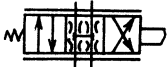
с электрогидравлическим управлением трехпозиционный с пружинным возвратом



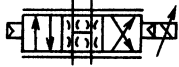
с управлением от кулачка



дресселирующие с механическим управлением (от копира)



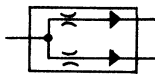
с электроуправлением



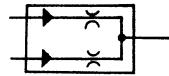
с пропорциональным управлением



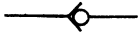
Делитель потока



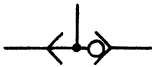
Сумматор потока



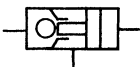
Обратные клапаны гидравлические и пневматические



Клапаны ИЛИ гидравлические и пневматические



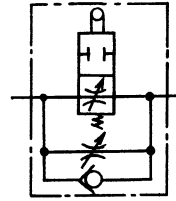
Гидрозамки односторонние



двухсторонние



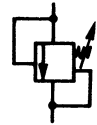
Дроссели тормозные гидравлические и пневматические



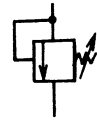
Вентили гидравлические и пневматические



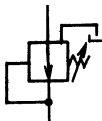
Гидроклапан давления (напорный золотник)



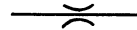
Предохранительный клапан



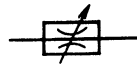
Редукционный клапан



Дроссели гидравлические (пневматические) нерегулируемые



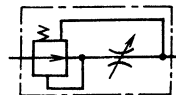
регулируемые



регулируемые с обратным клапаном



Регуляторы расхода жидкости



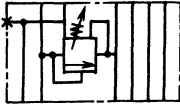
Наименование и обозначение

Наименование и обозначение

Реле давления гидравлическое

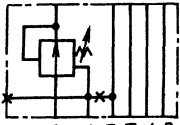


Модульная гидроаппаратура:
предохранительный клапан



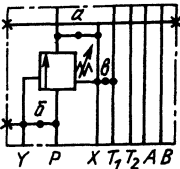
У Р T₁ T₂ А В

редукционный клапан



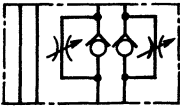
Р Х T₁ T₂ А В

гидроклапан давления



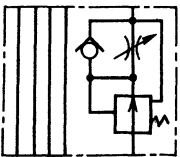
У Р Х T₁ T₂ А В

сдвоенные дроссели с обратным клапаном



Р Т А В

регулятор расхода



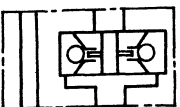
Р T₁ T₂ А В

обратный клапан



Р Т А В

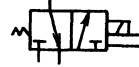
двусторонний гидрозамок



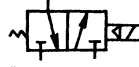
Р Т А В

Пневмораспределители:

с электрическим управлением трехлинейные двухпозиционные одномагнитные с пружинным возвратом и ручным дублированием

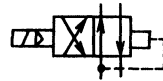


с электропневматическим управлением трехлинейный с одним электромагнитом

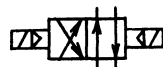


четырехлинейные

с одним электромагнитом



с двумя электромагнитами



пятилинейные с ручным дублированием двухпозиционные с одним электромагнитом



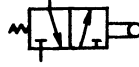
двухпозиционные с двумя электромагнитами



трехпозиционные с двумя электромагнитами



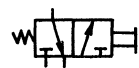
с механическим управлением



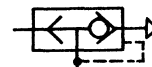
крановые двухпозиционные
















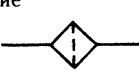
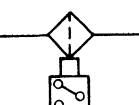


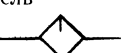





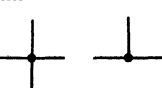


с управлением кнопкой или рукояткой

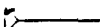




Пневмоклапаны быстрого выхлопа



| Наименование и обозначение |
|---|
| Пневмоклапан предохранительный |
|  |
| Пневмоклапан редукционный |
|  |
| Пневмоклапан предельного давления |
|  |
| Манометр (вакуумметр) |
|  |
| Реле давления пневматическое |
|  |
| Пневмоэлектропреобразователь |
|  |
| Гидробак |
|  |
| Заливная горловина |
|  |
| Аккумулятор пневмогидравлический |
|  |
| Пневмоемкость |
|  |
| Маслоохладитель |
|  |
| Реле контроля уровня: визуальное |
|  |
| с электрической сигнализацией |
|  |

| Наименование и обозначение |
|---|
| Реле контроля температуры |
|  |
| Фильтры: гидравлические |
|  |
| с электрической сигнализацией загрязнения |
|  |
| Фильтры-влагоотделители пневматические: с ручным отводом конденсата |
|  |
| с автоматическим отводом конденсата |
|  |
| Маслораспылитель |
|  |
| Пневмоглушитель |
|  |
| Рукава |
|  |
| Линии: основная (всасывающая, напорная, сливная) |
|  |
| управления |
|  |
| дренажа |
|  |
| Соединение линий |
|  |
| Перекрещивание линий |
|  |
| Линии: напорная гидравлическая |
|  |

| Наименование и обозначение | |
|----------------------------|---|
| напорная пневматическая |  |
| сливная гидравлическая |  |
| выхлоп пневматический |  |

Для пневмопривода характерны простота конструкции, надежность в эксплуатации, быстродействие, возможность получения высоких скоростей исполнительных органов, отсутствие загрязнения окружающей среды, пожарная безопасность. В то же время высокая сжимаемость воздуха не обеспечивает стабильности скорости и фиксации рабочих органов в промежуточных положениях, требует демпфирования в конце хода, и пневмопривод имеет большие габаритные размеры из-за малого давления рабочей среды, более низкий КПД, чем у гидропривода.

14.2. Исходные данные и порядок разработки гидропневмосхем

Разработку гидравлических и пневматических схем станка следует начинать с анализа технического задания. Этот документ составляет ведущий разработчик станка, он должен включать в себя:

назначение, общее описание работы и функциональную компоновку механических, гидравлических и электрических узлов станка;

предполагаемое размещение на станке гидравлических и пневматических двигателей, насосной установки, панелей с гидропневмоаппаратурой, общие принципы выполнения разводки гидропневмомагистралей;

полный перечень потребителей гидравлической и пневматической энергии с указанием для каждого двигателя диаметров поршня и штока, длины хода, скоростей перемещения и частот вращения, длины пути и времени разгона и торможения, приведенной к двигателю максимальной нагрузки;

желательные способы регулирования параметров (механическое ручное, с пульта управления, от УЧПУ и т. п.), число регулировок параметров, требуемый диапазон скоростей, точность регулирования и качество переходных процессов;

перечень блокировок, предотвращающих несовместимые и опасные движения исполнительных органов, в том числе при аварийных

режимах в работе станка (сгорание обмотки электромагнита, внезапное отключение электроэнергии, разрыв трубопровода и т. п.);

перечень средств контроля параметров диагностики технического состояния и индикации неисправностей гидропневмосистем станка;

циклограмму работы станка с указанием наименования переходов, последовательности работы гидропневмодвигателей, включения и выключения электромагнитов распределителей, срабатывания конечных выключателей, реле давления и других устройств;

требования к уровню шума, вибрации, температуре окружающей среды и условиям эксплуатации.

Ознакомившись с техническим заданием, разработчик гидропневмооборудования станка анализирует конструкцию и параметры исполнительных двигателей (подразд. 14.3) и определяет два важнейших энергетических параметра гидропневмосистемы: номинальное давление и максимальный расход.

Номинальный уровень давления в гидросистеме определяется необходимой силой (моментом), требованиями к габаритным размерам исполнительных двигателей, возможностью элементной базы гидропривода. Большинство элементов гидропривода рассчитаны на максимальное давление 25 — 32 МПа и только некоторые элементы (лопастные насосы, гидромоторы типа Г15, гидроцилиндры) на 6 — 16 МПа. Повышать давление целесообразно с точки зрения уменьшения габаритных размеров и массы гидравлических устройств, снижения трудоемкости выполнения гидроразводок за счет использования трубопроводов с малыми проходными сечениями. При уменьшении давления увеличивается ресурс работы гидропривода и повышаются возможности обеспечения требуемой герметичности. С учетом этого для гидроприводов станков можно рекомендовать номинальное давление 8 — 10 МПа, а при незначительных нагрузках на привод и при использовании более дешевых элементов и устройств — 5 — 6 МПа. Номинальное давление в пневмосистемах зависит от давления в заводской пневмосети и обычно составляет 0,4 — 0,6 МПа.

Выбранное номинальное давление в зависимости от конструктивных параметров исполнительных двигателей (диаметров поршня и штока рабочего объема гидромотора) определяет (см. подразд. 14.3) максимальную силу (момент), развиваемую исполнительным двигателем $F_{\max}(M_{\max})$, которые должны быть больше от усилия (момента) приведенной к исполнительному двигателю нагрузки, т. е.

$$F_{\max} \geq F_{ин} + F_{тр} + F_{п}; \quad (14.1)$$

$$M_{\max} \geq M_{ин} + M_{тр} + M_{п}, \quad (14.2)$$

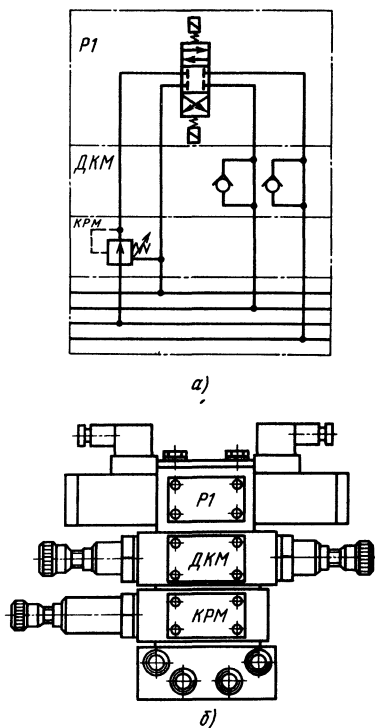


Рис. 14.3. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) функционального блока с односторонним расположением модульной гидроаппаратуры

где $F_{ин}(M_{ин})$, $F_{тр}(M_{тр})$, $F_{н}(M_{н})$ — соответственно приведенные силы (моменты) инерции, трения в рабочих органах станка, полезной нагрузки.

Максимальная сила (момент) на исполнительном двигателе должна на 10—20 % превышать силу (момент), создаваемую нагрузкой. При значительной разнице между этими силами необходимо поставить вопрос перед ведущим разработчиком станка о соответствующем изменении конструктивных параметров исполнительных двигателей. Уменьшение максимальной силы двигателей путем снижения подводимого давления хотя и возможно, но нежелательно, так как требует введения дополнительного регулирующего элемента (редукционного клапана) и ухудшает энергетические характеристики системы.

При определении максимальной подачи рабочей жидкости в гидросистему и сжатого воздуха в пневмосистему для каждого из исполнительных двигателей в зависимости от требуемой скорости перемещения определяют максимальный расход (см. подразд. 14.3). По циклограмме работы станка определяют число одновременно работающих двигателей

и суммируют значения их максимальных расходов. Самое большое из всех полученных значений увеличивают на 10—15% для компенсации утечек, определяя тем самым максимальную подачу жидкости (газа).

Значения номинального давления и максимальной подачи жидкости (газа) определяют энергетические характеристики гидропневмосистемы станка и с учетом характера работы потребителей являются основным критерием для выбора конструкции насосной установки и устройств подготовки воздуха (см. подразд. 14.5).

Схемы управления исполнительными двигателями разрабатывают в соответствии с требованиями технического задания на основе подбора необходимой гидропневмоаппаратуры по ее функциональному назначению и условному проходу (см. подразд. 14.4). Для сокращения протяженности трубопроводов и уменьшения их числа аппаратуру рекомендуется группировать в функциональные блоки, располагая их вблизи исполнительных двигателей станка. Расположение гидропанелей на насосной установке обеспечивает минимум наружных утечек, удобство регулировки и обслуживания, но целесообразно только для достаточно простых гидросистем. Одной из современных тенденций развития гидропривода является использование модульной гидроаппаратуры, которая имеет две стыковочные плоскости для гидроаппаратов, что позволяет собирать их в виде односторонних (рис. 14.3) и двусторонних (рис. 14.4) функциональных блоков. Буквами, выбиваемыми на плоскостях плит рядом с присоединительными отверстиями, обычно обозначают: p — давление, T — слив, A и B — подсоединение с исполнительным двигателем. При таком способе монтажа до минимума сокращается число трубопроводов, уменьшаются габаритные размеры и гидравлические потери в соединительных магистралях, а самое главное — становится возможным заменить всю многочисленную номенклатуру оригинальных гидропанелей несколькими унифицированными плитами. При этом резко сокращается время проектирования, появляется возможность эффективного применения САПР, уменьшается вероятность ошибок при проектировании и изготовлении, упрощаются монтаж и отладка гидрооборудования.

При разработке гидропневмосхем станков следует стремиться также к сокращению номенклатуры используемых элементов, к обеспечению заданных технических показателей с минимальным числом регулировок, отдавать предпочтение унифицированным и серийно выпускаемым комплектующим изделиям, проверенным и надежным техническим решениям.

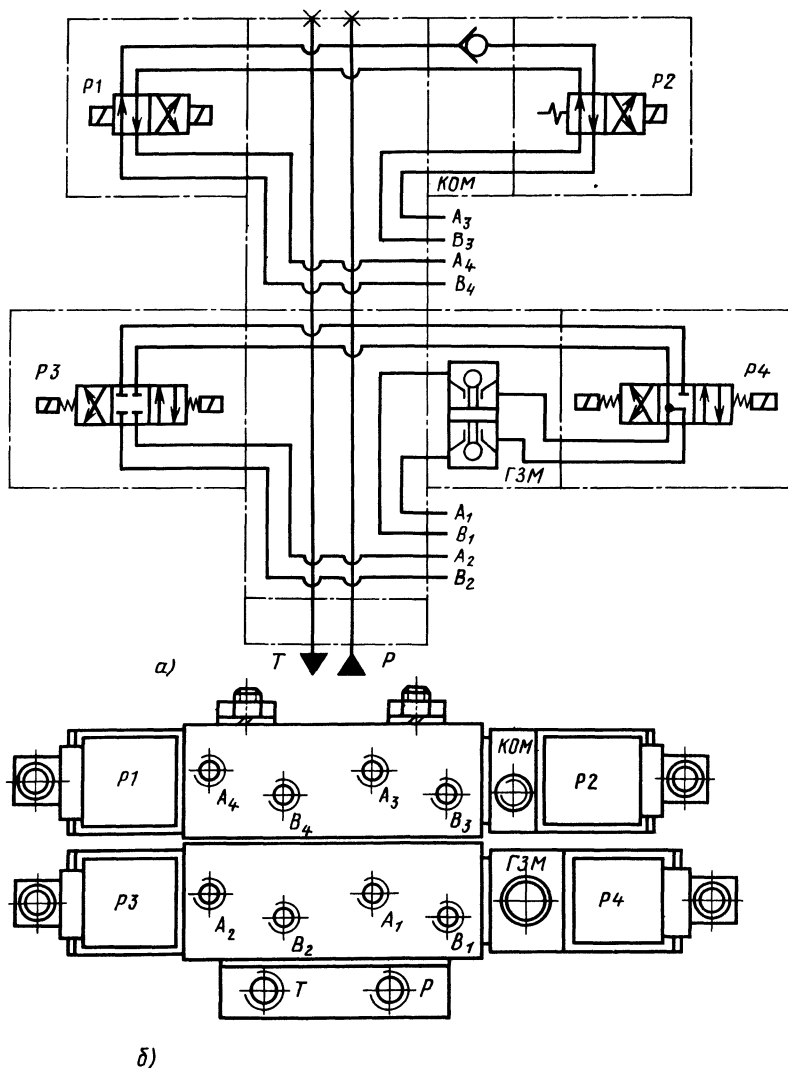


Рис. 14.4. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) функционального блока с двусторонним расположением модульной гидроаппаратуры

14.3. Гидравлические и пневматические исполнительные двигатели

Наибольшее распространение в станках, как наиболее простое средство обеспечения прямолинейных перемещений, получили двигатели с возвратно-поступательным движением — гидравлические и пневматические цилиндры, схемы которых приведены в табл. 14.1. Гидропневмоцилиндры одностороннего действия без возвратной пружины применяют в подъемных механизмах при длине перемещения до $8-10D$,

где D — диаметр поршня, когда давление в одну из сторон производится под действием внешних сил или собственного веса. Цилиндры с возвратной пружиной широко используются в зажимных, фиксирующих и переключающих устройствах при величине перемещения до $0,8-1,5D$. Плунжерные цилиндры просты в изготовлении (отпадает необходимость обработки внутренней поверхности цилиндра) и применяются главным образом для перемещения или разгрузки вертикально расположенных рабочих органов. В обоснованных случаях при ограничении места для размещения применяют телескопические цилиндры с более сложной

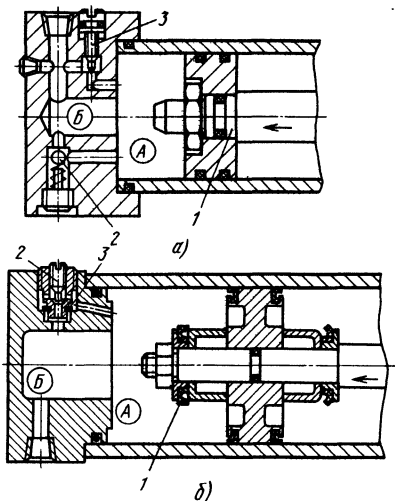


Рис. 14.5. Встроенные тормозные устройства гидроцилиндра (а) и пневмоцилиндра (б)

конструкцией и большей трудоемкостью изготовления.

Цилиндры с односторонним штоком двустороннего действия занимают меньше места, чем цилиндры с двусторонним штоком, и не требуют второго уплотнения для штока, однако ввиду разности площадей сила и скорость при движении поршня в обе стороны различны. В устройствах, где требуются одинаковые развиваемые силы, применяют цилиндры двустороннего действия с двусторонним штоком с длиной перемещения до 8—10D. У гидро-

цилиндров с неподвижным штоком и движущимся корпусом должны быть предусмотрены специальные отверстия для выпуска воздуха из верхних частей рабочих полостей цилиндра

Гидропневмоцилиндры могут иметь встроенные устройства для торможения поршня в конце хода для предотвращения удара (рис. 14.5). У гидроцилиндра при движении штока 1 влево его конический хвостовик в конце хода входит в полость Б, плавно уменьшая расход жидкости, перетекающей из полости А в полость Б, осуществляя тем самым торможение поршня, так как обратный клапан 2 при этом закрыт. После полного вхождения конического хвостовика в полость Б скорость движения поршня определяется практически только расходом масла через дроссель 3, регулировкой которого обеспечивается прохождение остатка пути с замедленной скоростью, предотвращая удар. Во время разгона поршня при его движении вправо жидкость под давлением проходит в полость А через обратный клапан, а после выхода конического хвостовика штока полость Б сообщается с полостью А напрямую. У пневмоцилиндра в конце хода штока манжета 1 входит в отверстие крышки, разделяя полость А и Б. В связи с этим воздух из полости А проходит в выхлопное отверстие Б только через дроссель 2, благодаря чему осуществляется мягкое торможение поршня. При подаче сжатого воздуха в отверстие Б отгибается эластичная прокладка 3, воздух пропускается в полость А, и возвратное движение штока начинается без задержки.

14.2. Основные параметры гидропневмоцилиндров

| Расчетный параметр | Расчетная зависимость | |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Поршневая полость | Штоковая полость |
| Эффективная площадь поршня S , см ² | $S_1 = D^2/127$ | $S_2 = D^2 - d^2/127$ |
| Сила, развиваемая цилиндром F , Н | $F_1 = 100(p_n S_1 - p_{св} S_2)\eta$ | $F_2 = 100(p_n S_2 - p_{св} S_1)\eta$ |
| Подача рабочей жидкости Q , л/мин | $Q_1 = v D^2/1270$ | $Q_2 = v(D^2 - d^2)/1270$ |
| Скорость перемещения v , м/мин | $v_1 = 1270 Q_1/D^2$ | $v_2 = 1270 Q_2/(D^2 - d^2)$ |
| Вытесняемый объем V , л | $V_1 = D^2 L/1270$ | $V_2 = (D^2 - d^2)L/1270$ |

Сильфонные и мембранные цилиндры обычно используют в приборных устройствах, и их применение целесообразно для обеспечения очень высокой степени герметичности при относительно небольших перемещениях. Сдвоенные пневмоцилиндры применяют в зажимных устройствах для увеличения силы при ограничении радиального размера цилиндра при длине перемещения до $0,8-1,5D$. В транспортирующих устройствах при необходимости уменьшения габаритов при значительной длине перемещения (до $20D$) применяют пневмоцилиндры с гибким штоком, имеющие, однако, более сложную конструкцию из-за технологических трудностей уплотнения гибкого штока.

Выбор типа и конструкции цилиндра обычно определяется компоновкой механических узлов станка и в большинстве случаев требует оригинальной разработки. Расчет основных параметров цилиндров как элемента гидропневмосистемы приведен в табл. 14.2. Основные параметры цилиндров регламентирует ГОСТ 6540—68, а требования к конструкции — ГОСТ 16514—87. При ходе поршня цилиндра больше $8-10D$, т. е. при длинном и тонком штоке, его рассчитывают на прочность и устойчивость, а тонкостенные корпуса цилиндров — на прочность и деформацию [6].

При разработке конструкции цилиндров важное значение имеет выбор типа уплотнений (рис. 14.6). Для неподвижных соединений рекомендуется применять уплотнения резиновыми кольцами 1 по ГОСТ 9833—73, которые отличаются простотой конструкции, минимальными размерами, низкой стоимостью и хорошей герметичностью. Ввиду ограниченной долговечности при работе в подвижных соединениях уплотнение резиновыми кольцами целесообразно применять в цилиндрах с длиной хода не более 2000 мм, скоростях перемещения до 0,5 м/с и эпизодическим режимом работы (рис. 14.6, а). Для предотвращения выдавливания колец в зазоры и повышения долговечности необходимо применять фторопластовые защитные шайбы 2.

При увеличении длины хода цилиндра от 0,3 до 2 м при интенсивной работе (до 20 перемещений в минуту) со скоростью до 0,5 м/с (гидроцилиндры) и до 1 м/с (пневмоцилиндры) рекомендуется применять (рис. 14.6, б) резиновые уплотнительные манжеты 3 по ГОСТ 14896—84 (гидроцилиндры) и ГОСТ 6678—72 (пневмоцилиндры). При повышенных требованиях к наружной герметичности для уплотнения штока применяют комбинированные уплотнения (рис. 14.6, в), в которых при перемещении поршня под давлением работает в основном резиновая манжета, а при отсутствии давления или утечках через манжету наружная герметичность обеспечивается

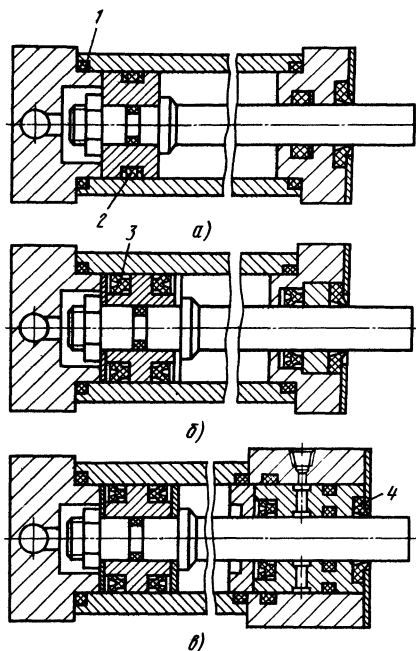


Рис. 14.6. Уплотнения гидравлических и пневматических цилиндров:

а — резиновыми кольцами; б — резиновыми манжетами; в — комбинированное с повышенной герметичностью по штоку

резиновым кольцом, при этом утечки направляются в дренажную магистраль станка. При повышенной запыленности окружающей среды и значительных перемещениях рекомендуется устанавливать резиновые грязеъемники 4 по ГОСТ 24811—81.

Для уплотнений гидроцилиндров, перемещающихся со скоростями до 3 м/с, рекомендуется применять шевронные резинотканевые уплотнения по ГОСТ 22704—77, а при скоростях до 7,5 м/с — чугунные поршневые кольца по ГОСТ 2 А54-1—72 [6].

Материал пневмоцилиндров должен обеспечить коррозионную стойкость и износостойкость. Для этого в крышке для перемещения штока устанавливают бронзовую втулку, а сам шток и гильзу цилиндра хромируют. Значительно снижает износ зеркала пневмоцилиндра капроновая наплавка на поршень. Уплотнения пневмоцилиндров смазывают распыленным маслом, подаваемым в сжатый воздух с помощью маслораспылителей.

14.4. Типовые схемы управления исполнительными двигателями

Для управления исполнительными двигателями используют направляющую и регулирующую аппаратуру. К направляющей аппаратуре от-

носятся распределители, обратные клапаны, гидрозамки, вентили и другие устройства, в которых направление потока рабочей жидкости (газа) достигается путем полного открытия или полного закрытия проходного сечения. Регулирующие аппараты — гидроклапаны давления, дроссели, регуляторы и делители потока, дросселирующие гидрораспределители — изменяют давление или расход рабочей среды путем частичного регулируемого открытия проходного сечения.

Основным элементом, с помощью которого осуществляются пуск и остановка исполнительного двигателя, а также изменяется направление его движения, является распределитель. В гидроприводе станков наибольшее распространение получили распределители золотникового типа с электромагнитным управлением (табл. 14.1). При значительной подаче рабочей жидкости (более 60 л/мин) применяют двухкаскадные распределители с электрогидравлическим управлением. Значительно реже используют распределители с ручным управлением и механическим управлением от кулачка. По числу подключаемых внешних линий используют в основном четырехлинейные и пятилинейные распределители, а по числу фиксированных позиций золотника — двухпозиционные и трехпозиционные. Число позиций изображают соответствующим числом квадратов, а направление потоков рабочей жидкости в каждой позиции — линиями со стрелками. По способу установки золотника различают распределители с пружинным возвратом или с фиксацией золотника во всех позициях. Распределители в схемах изображают в исходной позиции, к которой подводят линии связи. Чтобы представить действие распределителя в другой рабочей позиции, необходимо мысленно передвинуть соответствующий квадрат на место исходной позиции, оставляя линии связи в прежнем положении.

Необходимость различных вариантов соединения гидролиний в фиксированных положениях или в момент переключения золотника реализуется путем применения распределителей с различными исполнениями по гидросхеме (табл. 14.3). В соответствии с ГОСТ 26890—86 присоединительные каналы аппаратов обозначают следующим образом: *P* — основная напорная линия (подвод); *A*, *B* — отверстия присоединения аппарата к потребителю; *T* — основная сливная линия (слив); *X*, *Y*, *V* — отверстия потока управления, *L* — слив утечек, *M* — отверстие для манометра.

Для применения в гидроприводах станков рекомендуется использовать отечественные распределители типов В6, В10, В16, Р102, Р103 и распределители производства НРБ—ВРХ06, РХ10, РХ20, особенности конструкции и основ-

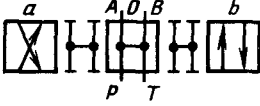
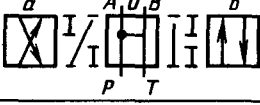


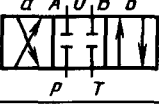
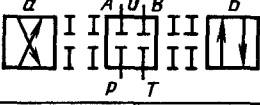
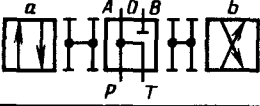
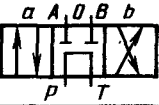

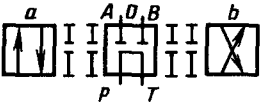


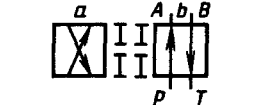
ные характеристики которых рассмотрены в работах [3, 6]. При применении электромагнитного управления рекомендуется использовать распределители с магнитами постоянного тока напряжением 24 В, допускающие вдвое большее число циклов срабатываний и обеспечивающих лучшую безопасность, чем магниты переменного тока, которые к тому же могут сгорать при заклинивании золотника.

В пневмоприводе станков наиболее часто используют двухпозиционные, трех-, четырех- и пятилинейные распределители с электропневматическим управлением (см. табл. 14.1). При малом расходе воздуха (до 0,2 м³/ч) применяют трехлинейные двухпозиционные распределители с прямым электромагнитным управлением. В ряде случаев применяют крановые распределители, а также распределители с пневматическим и механическим управлением. Для удобства отладки распределители с электрическим управлением могут иметь кнопку ручного дублирования. Выпускаемые отечественной промышленностью распределители типов П-РЭ, В63, В64, П-Р13 имеют клапанное распределение потоков воздуха или распределение плоским золотником, а у распределителей мод. 211, 212, 311, выпускаемых по ГОСТ 21251—85Е, распределение осуществляется цилиндрическим золотником [10]. Клапанные распределители и распределители с плоским золотником имеют более простую и надежную конструкцию, менее склонны к заклиниванию из-за загрязнения воздуха и недостаточной смазки, чем золотниковые распределители, в которых хорошая герметичность достигается путем применения эластичных уплотнений. Существенный недостаток пневмораспределителей с плоским золотником — недопустимость подпора на выхлопе, который может привести к отрыву золотника от плоскости примыкания.

При разработке схем управления гидропневмоприводами важное значение имеет согласование расходов потребляемых исполнительными двигателями с пропускной способностью распределителей и другой гидропневмоаппаратуры, характеризующейся обычно условным проходом. При номинальном давлении в гидросистеме 6—8 МПа и пневмосистеме 0,4—0,6 МПа рекомендуется использовать данные, указанные в табл. 14.4.

Эти данные являются ориентировочными и должны уточняться в каждом конкретном случае. Так, при более высоком давлении или кратковременной работе потребителей расход может быть выше номинального. При длинных и протяженных трубопроводах их внутренний диаметр должен быть увеличен на 2—3 мм по сравнению с условным проходом аппаратов, причем диаметр сливного трубопровода должен быть на 1—2 мм больше напорного.

14.3. Схемы соединения каналов гидрораспределителей с различными исполнениями по гидросхеме

| № схемы | Условное обозначение | Схемы соединения каналов при переключении |
|------------|---|---|
| 14 |  |  |
| 24 |  |  |
| 34 |  |  |
| 44 |  |  |
| 54 |  |  |
| 64 |  |  |
| 64A |  |  |
| 574 |  |  |
| 574A |  |  |

В ответственных случаях должны подробно рассматриваться характеристики каждого из аппаратов и проводиться соответствующие расчеты [5, 6].

При всем многообразии схем управления исполнительными двигателями станка их проектирование может быть сведено к решению достаточно узкого круга типовых задач, которые можно классифицировать по функциональным признакам:

гидравлические (пневматические) приводы зажимных устройств и перемещения с цикловыми системами управления;

гидравлические приводы уравновешивания; электрогидравлические приводы с пропорциональным управлением и с управлением от УЧПУ.

В гидropневмоприводах зажимных устройств требуется обеспечивать силу зажима или разжима исполнительных органов станка, отрегулировать эту силу и не допускать аварийных

14.4. Данные для определения диаметра условного прохода в зависимости от подачи жидкости (газа)

| Номинальная подача | | | Диаметр условного прохода, мм | Присоединительная резьба по ГОСТ 6111—52 |
|--------------------|-------------------|-------|-------------------------------|--|
| масла | воздуха | | | |
| л/мин | м ³ /ч | л/мин | | |
| 3 | 0,12 | 2 | 2,5 | K 1/8 |
| 6 | 0,3 | 5 | 4 | K 1/8 |
| 12 | 0,6 | 10 | 6 | K 1/8, K 1/4 |
| 40 | 1,2 | 20 | 10 | K 1/4, K 3/8 |
| 80 | 3 | 50 | 16 | K 1/2 |
| 160 | 5 | 80 | 20 | K 3/4 |

гидроцилиндров целесообразно осуществлять посредством реле давления *РД1*, а при одном гидроцилиндре — конечным выключателем.

Если необходимо изменить в процессе работы силу зажима, можно применить схему, показанную на рис. 14.7, б, у которой сила зажима регулируется посредством модульного редукционного клапана *КРМ*, настраиваемого по манометру *МН*. При использовании самотормозящего зажимного механизма сила разжима должна быть больше силы зажима вследствие того, что коэффициент трения покоя при разжиге больше коэффициента трения движения при зажиме. В несамотормозящем зажимном механизме сила разжима может быть меньше силы зажима. Применение самотормозящих зажимных устройств практически предотвращает самопроизвольный разжим даже при падении давления.

ситуаций при падении давления, разрыве трубопроводов, прекращении подачи электроэнергии и т. п. На рис. 14.7, а приведена одна из наиболее распространенных схем зажимного механизма, у которого зажим осуществляется пружинами, а разжим — путем подачи давления в гидроцилиндры разжима *Ц1*, ..., *Ц4* при включении электромагнита гидрораспределителя *Р1*. Для надежной работы механизма сила, создаваемая давлением, должна в 1,5—2 раза превышать силу, создаваемую пружинами. При кратковременном падении давления в напорной гидравлической линии, например при резких изменениях потребляемого расхода в гидросистеме станка, сохранение давления в гидроцилиндрах разжима обеспечивается посредством модульного обратного клапана *КОМ*. Контроль за давлением разжима при управлении группой из нескольких

На рис. 14.7, в приведена схема пневматического зажимного механизма. Применение клапанов быстрого выхлопа *КБВ1* и *КБВ2* позволяет значительно увеличить скорость срабатывания пневмоцилиндров *ЦР1*, *ЦР2* благодаря быстрому прохождению воздуха непосредственно в атмосферу при включении пневмораспределителя *Р1*. Для увеличения быстродействия длина трубопроводов, соединяющих клапан быстрого выхлопа с пневмоцилиндром, должна быть минимальной. Для зажима обрабатываемой заготовки в патронах станков токарной группы применяют гидравлические и пневматические вращающиеся цилиндры, особенности конструкции и управление которыми рассмотрены в работах [6, 9].

В приводах перемещения с цикловыми электрическими системами управления регулирова-

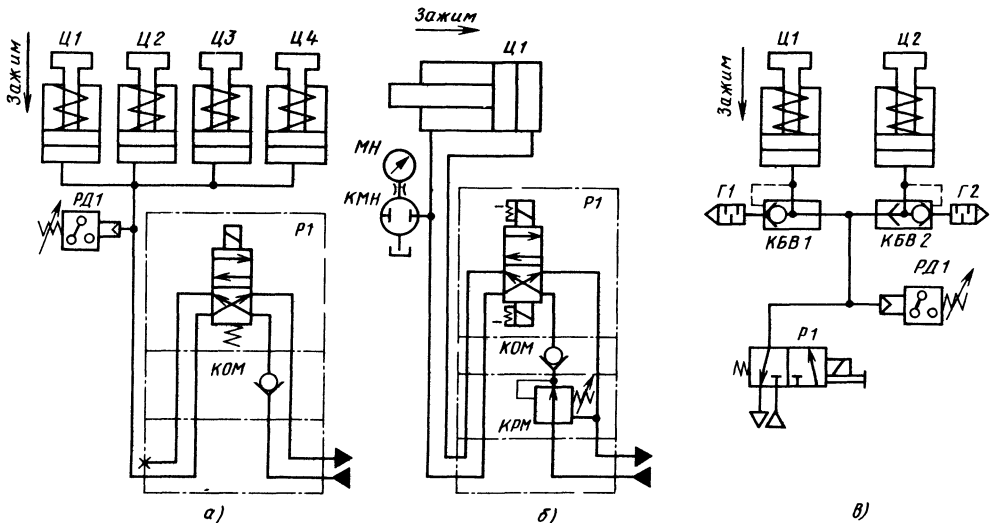


Рис. 14.7. Схемы управления зажимными устройствами с гидравлическим разжимом (а), гидравлическим зажимом (б), пневматическим разжимом (в)

ние скорости осуществляют обычно посредством различных дроссельных устройств, а позиционирование производится с помощью жестких упоров с допусковой погрешностью 0,1—1,0 мм с предварительным (по необходимости) торможением исполнительного двигателя. При отсутствии жестких требований к стабильности скорости перемещения гидропривода целесообразно применять схему регулирования с дроселированием на выходе, используя модульные сдвоенные дроссели с обратным клапаном типа ДКМ (рис. 14.8, а, рис. 14.9), которые позволяют производить независимую регулировку скорости при движении поршня в обоих направлениях. При необходимости обеспечить постоянную скорость движения при переменных нагрузках вместо дросселя используют модульный двухлинейный регулятор потока (рис. 14.8, б). Положение штока гидроцилиндра в крайних положениях обычно контролируют с помощью электрических конечных выключателей. При относительно коротком времени включения электромагнита гидрораспределителя, например при расфиксации рабочих органов, целесообразно использовать двухпозиционный распределитель с пружинным возвратом (см. рис. 14.8, а). При длительной остановке исполнительного двигателя в одном положении, например при переключении блока шестерен, применяют двухпозиционные гидрораспределители с фиксатором (рис. 14.8, б).

При значительных массах вертикально перемещаемых узлов во избежание аварийной ситуации при внезапном отключении электроэнергии или падении давления в напорной гидролинии используют (рис. 14.9, а) односторонний гидрозамок в комбинации с трехпозиционным распределителем, выполненным по 34-й схеме соединения каналов (см. табл. 14.3). Подключать гидрозамок в этом случае необходимо как можно ближе к гидроцилиндру для предотвращения самопроизвольного перемещения исполнительных органов при повреждениях или разрыве трубопроводов. При длительной остановке исполнительного органа его вертикальное перемещение под действием собственного веса будет зависеть от утечек через поршень гидроцилиндра и через гидрозамок. Если в соответствии с условиями работы станка такое перемещение недопустимо, то необходимо предусмотреть соответствующие зажимные или фиксирующие устройства. При горизонтальном положении гидроцилиндра для надежной фиксации штока в крайних или промежуточных положениях при действии различных по направлению нагрузок используют двусторонние гидрозамки модульного исполнения (рис. 14.9, б).

При регулировании скорости пневмопривода

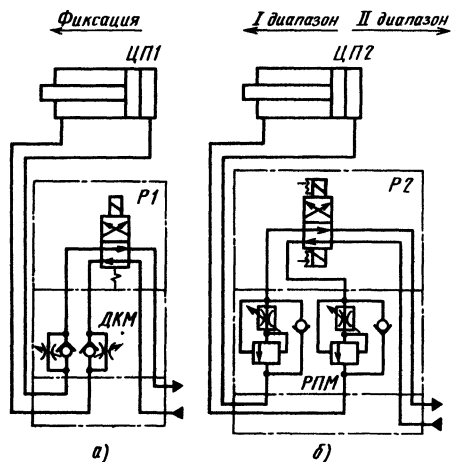


Рис. 14.8. Схемы гидропривода перемещения с регулированием скорости дросселями с обратным клапаном (а) и регулятором потока (б)

наибольшее распространение ввиду малой стоимости, простоты конструкции и настройки получили схемы с дроселированием на выходе с использованием пневмодросселей ДКО1 и ДКО2 с обратными клапанами (рис. 14.10, а, б).

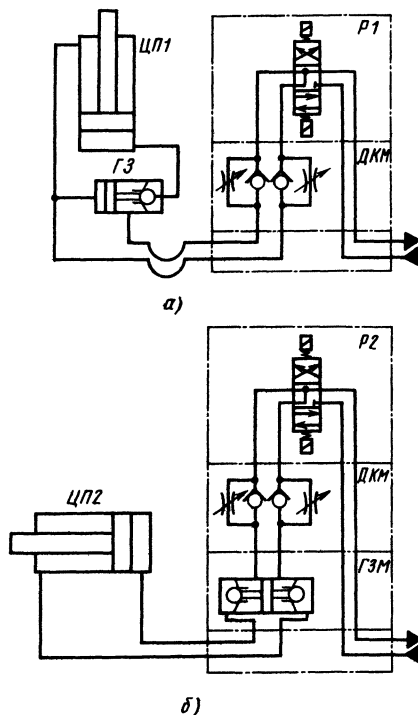


Рис. 14.9. Схемы гидропривода перемещения с применением одностороннего (а) и двустороннего (б) гидрозамков.

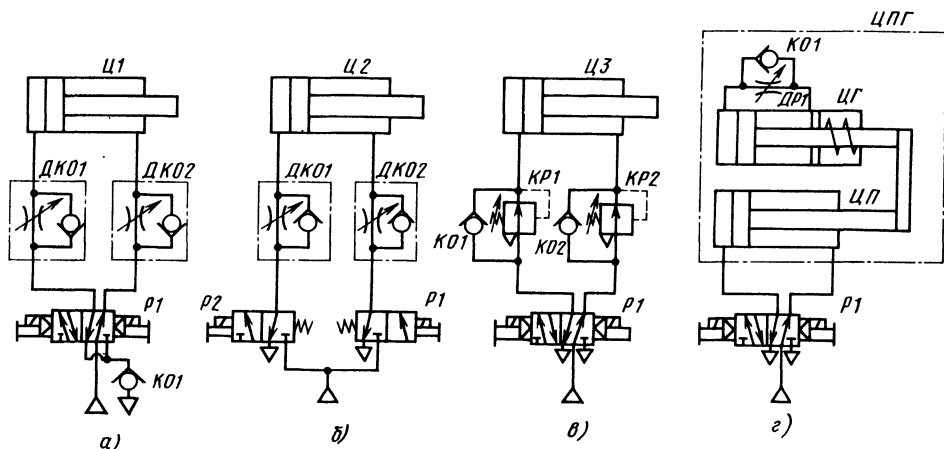


Рис. 14.10. Схемы пневмопривода перемещения с регулированием скорости:

а — дросселями на входе; б — дросселями на выходе; в — редукционным клапаном; г — гидравлическим дросселем

Во избежание рывка при трогании поршня с места рекомендуется установить в выхлопной магистрали подпорный клапан КО1 (рис. 14.10, а). При необходимости остановки пневмопривода в крайних или промежуточных положениях может быть применена схема с двумя двухпозиционными трехлинейными пневматическими распределителями P1 и P2 (рис. 14.10, б). Регулировать скорость движения пневмопривода можно с помощью регуляторов давления KP1 и KP2 в сочетании с обратными клапанами КО1 и КО2 (рис. 14.10, в), что облегчает настройку и стабилизирует характеристики, но при этом увеличиваются стоимость, габаритные размеры и масса по сравнению с этими параметрами у устройств дроссельного регулирования.

Если необходима высокая стабильность движения при изменении нагрузки, целесообразно использовать пневмогидравлические цилиндры (рис. 14.10, г), у которых при рабочей подаче одновременно с движением поршня пневмоцилиндра ЦП происходит вытеснение масла из штоковой полости гидроцилиндра ЦГ через дроссель ДР1, регулирующий подачу. Ускоренное движение подачи при обратном ходе обеспечивается пропуском масла через обратный клапан КО1. Компенсация объема масла из-за разности площадей поршня гидроцилиндра достигается путем применения в гидроцилиндре второго подпружиненного поршня. Основным условием обеспечения работоспособности конструкции является достижение высокой степени герметичности деталей гидроцилиндра, особенно по наружным утечкам.

Одной из проблем, возникающих при проектировании гидропневмопривода, является обеспечение безударной остановки поршня в крайних положениях. Обычно можно счи-

тать срабатывание привода безударным, если скорость поршня в конце хода не превышает 0,05—0,3 м/с при массе движущихся частей привода 3—20 кг [2]. При этом большим значениям массы соответствуют меньшие значения скорости. Уменьшать скорость поршня на протяжении всего хода можно только для короткоходовых проводов или при невысоких требованиях к быстродействию. При значительных скоростях перемещения и длинноходовых цилиндрах необходимо обеспечить торможение поршня в конце хода.

Схемы управления перемещением цилиндров с внутренними тормозными устройствами (рис. 14.11, а, рис. 14.12, а) обеспечивают компактность и малые габаритные размеры привода, особенно если затруднено применение электрических конечных выключателей, сигнализирующих о перемещениях исполнительных органов. К недостаткам внутренних тормозных устройств относятся невозможность регулирования длины тормозного пути, неудобное расположение мест регулировок на станке, трудоемкость и высокие требования к точности расчета, значительное усложнение конструкции цилиндров (см. рис. 14.5). Применение серийно выпускаемых путевых дросселей типа МДО для торможения гидроцилиндров (рис. 14.11, б) и тормозных пневмодросселей типа П-ДТ (рис. 14.12, б) позволяет использовать при настройке оптимального режима торможения два параметра: длину тормозного пути и площадь сечения канала дросселя. К недостаткам этого способа торможения относится громоздкость конструкции системы ввиду необходимости расположения тормозных дросселей рядом с гидроцилиндром.

Перспективной и универсальной является схема управления перемещением и торможением

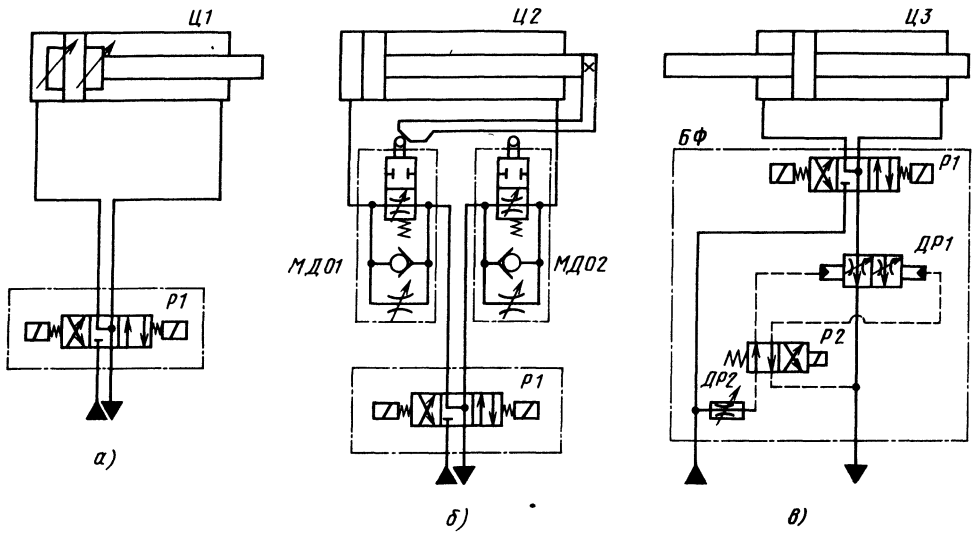


Рис. 14.11. Схемы торможения гидропривода:

а — с помощью внутренних тормозных устройств; б — с помощью путевых дросселей; в — с помощью функционального тормозного блока

нием гидропривода с помощью функционального блока (рис. 14.11, в). Направление движения поршня определяется трехпозиционным гидрораспределителем $P1$. Дроссель $DP1$ золотникового типа имеет в своих крайних положениях два регулируемых проходных сечения и управляется тормозным распределителем $P2$, с помощью которого осуществляется переключение дросселя $DP1$ с максимального расхода на минимальный. Скорость этого переключения, т. е. эффективность и плавность торможения, регулируются дросселем $DP2$. Включение тормозного распределителя $P2$ осуществляется от электрических малогабаритных

конечных выключателей, взаимодействующих со штоком гидроцилиндра.

Для пневмоприводов при значительной инерционной нагрузке можно рекомендовать схему торможения, показанную на рис. 14.12, в [3]. Направление перемещения и фиксация поршня в крайних положениях здесь обеспечиваются соответствующим включением электромагнитов пневмораспределителя $P1$. При срабатывании электрического конечного выключателя (начало торможения) тормозной пневмораспределитель $P2$ включается таким образом, что выхлопная полость цилиндра соединяется через обратный клапан KO с питающей магистралью.

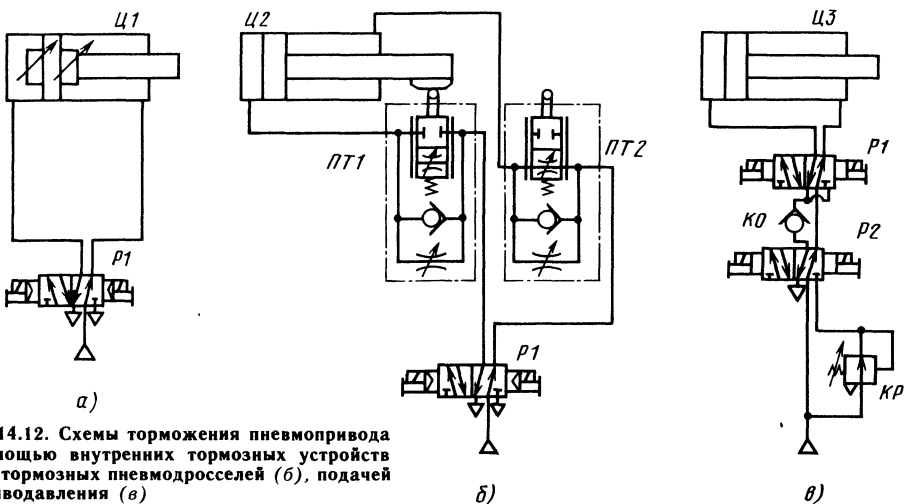


Рис. 14.12. Схемы торможения пневмопривода с помощью внутренних тормозных устройств (а), тормозных пневмодросселей (б), подачи противодавления (в)

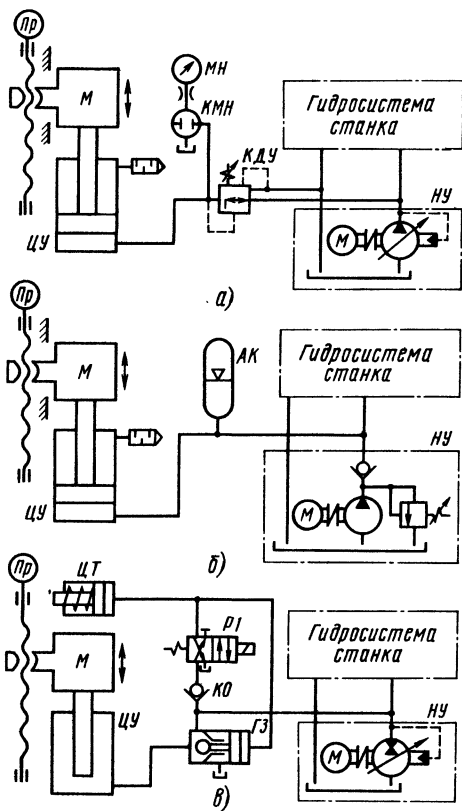


Рис. 14.13. Схемы гидравлического уравнивания с применением клапана давления (а), аккумулятора (б), регулируемого насоса (в)

Это обеспечивает возврат воздуха в пневмосеть при превышении давления в выхлопной полости выше давления в пневмосети. Настройкой редукционного клапана КР обеспечивается постоянный подпор давления в рабочей полости при торможении, т. е. регулируется эффективность торможения и устраняется возможный отскок.

В связи с повышением требований к точности обработки, увеличением скоростей и ускорений перемещения рабочих органов станков стали широко применять устройства гидравлического уравнивания вместо ранее применявшихся противовесов в виде металлических или бетонных грузов. Для станков малых и средних размеров применяют (рис. 14.13, а) схему управления давлением в гидроцилиндре уравнивания ЦУ с помощью клапана уравнивания КДУ типа ПГ 57-6, который сочетает свойства редукционного и переливного клапанов. При остановке или движении подвижного узла вверх клапан работает как редукционный, понижая до требуемого значения давление в гидроцилиндре уравни-

вания, которое определяется настройкой клапана. При движении узла вниз клапан работает как переливной, поддерживая с незначительным отклонением настроенное давление и перепуская в линию слива масло, вытесняемое из цилиндра уравнивания.

Для сокращения непроезводительных потерь при вытеснении рабочей жидкости и обеспечения практически любых скоростей перемещения рабочих органов применяют систему уравнивания с гидроаккумулятором (рис. 14.13, б). Заполнение и вытеснение масла в цилиндре уравнивания при использовании этой схемы должны обеспечиваться соответствующим вытеснением и заполнением маневрового объема аккумулятора при незначительном изменении давления в гидросистеме (не более 1,0—1,5 МПа), при котором сохраняется нормальная работа привода вертикального перемещения и гидросистемы станка. Применение схемы с аккумулятором является наиболее простым, экономичным и эффективным способом уравнивания, с небольшими (до 1 л) объемами заполнения цилиндров уравнивания.

При увеличенных объемах заполнения для сохранения незначительного изменения давления в гидросистеме необходимо использовать аккумуляторы со значительными конструктивным объемом, габаритами и массой. В этих случаях эффективно, особенно для станков крупных размеров, использовать схему уравнивания с регулируемым насосом, который при заполнении маслом цилиндров уравнивания работает в насосном режиме, а при вытеснении — в моторном, с рекуперацией выделяемой энергии в электросеть (рис. 14.13, в). Применение в схеме цилиндра тормоза ЦТ для зажима привода вертикального движения и гидрозамка ГЗ, управляемых от распределителя Р1, обеспечивает надежную остановку вертикально перемещаемых устройств в тяжелых станках с несамотормозящей передачей, даже в случаях аварийного падения давления в напорной магистрали. Использование обратного клапана КО обеспечивает нормальную работу вертикального привода при кратковременном уменьшении давления, вызванном включением в работу других потребителей энергии в гидросистеме станка.

Одна из современных тенденций развития гидроприводов в станках — использование гидроаппаратуры с пропорциональным управлением [3]. Пропорциональные гидроаппараты являются аналогом обычных гидроаппаратов по принципу действия, габаритным и присоединительным размерам, у которых вместо устройств, работающих в релейном режиме (включено, выключено) или при фиксированной настройке установлен пропорциональный

электромагнит. Он позволяет в зависимости от подаваемого электрического сигнала управлять по требуемому закону давлением, направлением и скоростью потока рабочей жидкости. В этом случае можно наиболее полно и эффективно реализовать преимущества гидропривода (простота конструкции и силовые характеристики), а его наиболее трудно-реализуемые функции управления и автоматической регулировки параметров можно обеспечивать с помощью электронных устройств с непосредственным управлением от УЧПУ.

На рис. 14.14, а приведена схема перемещения поршня гидроцилиндра с использованием пропорционального гидрораспределителя РПИ. Электрические команды от устройства цикловой автоматики УЦА определяют, как и в обычной схеме, направления движения и начало торможения, а скорость перемещения и требуемый закон торможения зависят от регулировок в блоке управления БУ. По сравнению со схемой, приведенной на рис. 14.11, в, значительно упрощается конструкция привода, обеспечиваются легкодоступность и удобство регулировки его параметров.

Применение пропорционального управления может быть эффективным при решении задач уравнивания, особенно когда в зависимости от положения рабочего органа сила уравнивания должна регулироваться (рис. 14.14, б). В этом случае изменение нагрузки на привод в зависимости от угла поворота платформы (или массы устанавливаемого изделия) приводит к изменению тока в приводном электродвигателе. Это изменение тока посредством устройства преобразования УП в виде соответствующего электрического сигнала через блок управления БУ передается на пропорциональный электромагнит специального клапана уравнивания КУП. В качестве такого клапана с небольшими доработками можно использовать серийно выпускаемый клапан уравнивания типа ПГ57-6 (см. рис. 14.13, а). У него вместо механизма ручного регулирования устанавливаются пропорциональный электромагнит, посредством которого изменяют давление в цилиндре уравнивания до значения, определяемого минимальной нагрузкой на привод. Если привод наклонного стола управляется от УЧПУ, то в качестве задающего сигнала можно использовать ошибку рассогласования, обеспечивая регулированием давления в цилиндре ее минимальное значение.

Применение гидроаппаратов с пропорциональным управлением особенно эффективно при увеличении числа исполнительных двигателей. Однако по быстродействию, коэффициенту усиления, чувствительности и другим параметрам регулировочной характеристики эти аппараты уступают дросселирующим усилителям мощ-

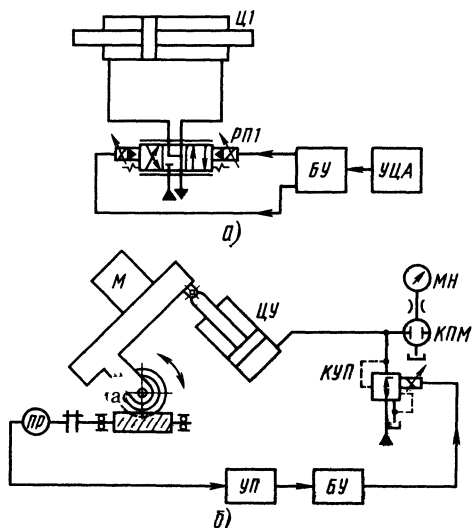


Рис. 14.14. Схемы электрогидравлических приводов перемещения (а) и разгрузки (б) с пропорциональным управлением

ности. Последние применяют в следящих электрогидравлических приводах с управлением от УЧПУ, когда требуется высокая точность позиционирования.

На рис. 14.15, а приведена схема ротационного электрогидравлического шагового привода ЭГШП типа Э32Г18-2, получившего широкое распространение в отечественном станкостроении благодаря освоенному серийному производству, простоте конструкции, отладки и эксплуатации [6]. В этом приводе при повороте шагового двигателя ШД через прецизионную винтовую передачу ВП дросселирующий распределитель ДР получает осевое смещение. Поток масла поворачивает вал гидромотора в том же направлении, в котором вращается вал ШД. Через шлицевое соединение ШС и винтовую передачу ВП дросселирующий распределитель ДР возвращается в исходное положение, после чего вращение гидромотора останавливается. Принцип действия линейных ЭГШП (рис. 14.15, б) тот же, что и гидравлических ЭГШП. Однако здесь в качестве гидродвигателя используется гидроцилиндр, в котором линейное перемещение поршня через несамотормозящую винтовую передачу ВП преобразуется в соответствующий угол поворота винта, обеспечивая через шестеренную передачу обратную связь по положению дросселирующего распределителя ДР. Поскольку угловая дискрета ЭГШП (угол поворота вала на один импульс) составляет $1,5^\circ$, то расстояние, на которое перемещается исполнительный орган, определяется числом поданных на вход ЭГШП импульсов, а скорость перемещения — частотой

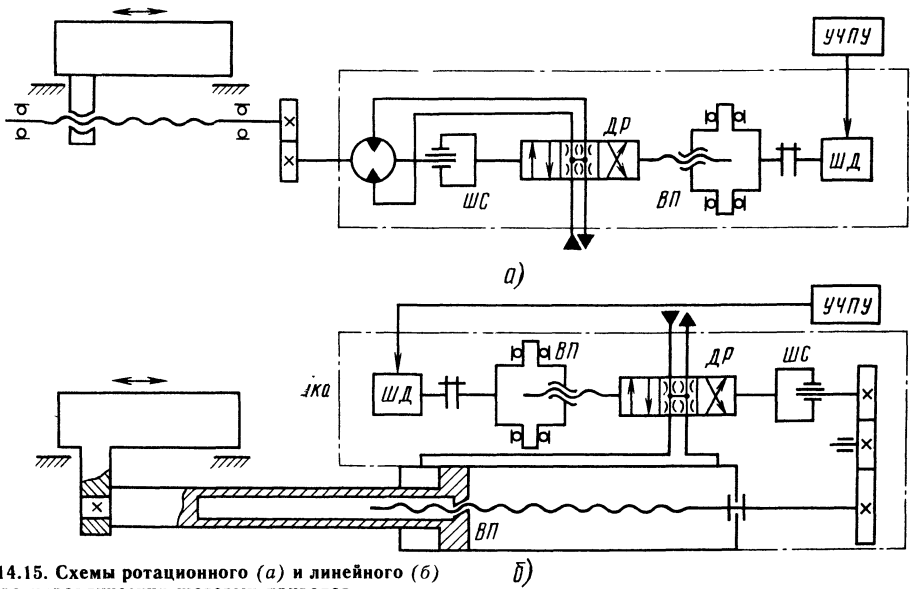


Рис. 14.15. Схемы ротационного (а) и линейного (б) электрогидравлических шаговых приводов

их следования. ЭГШП имеют ограничения по максимальной частоте импульсов до 8 кГц, что при линейной дискрете перемещения, равной 0,005 мм, ограничивает максимальную скорость движения рабочих органов до 2,4 м/мин

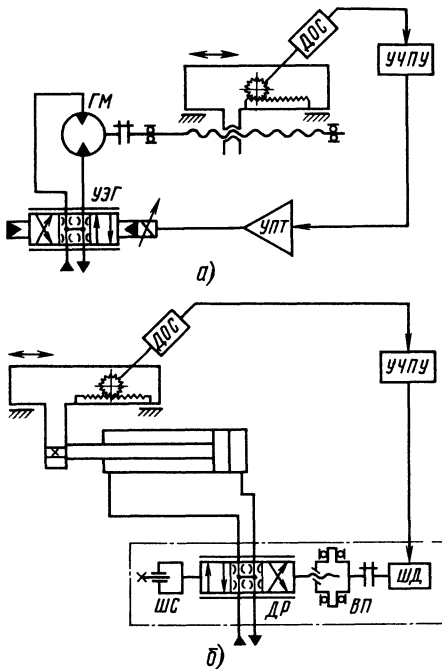


Рис. 14.16. Схемы электрогидравлических следящих приводов дроссельного регулирования (а) и широкодиапазонного цифрового шагового привода (б)

при современных требованиях в станках 10–12 м/мин.

Ограничения по скорости отсутствуют в электрогидравлическом следящем приводе дроссельного регулирования, построенном по схеме, показанной на рис. 14.16, а. Согласно этой схеме перемещение исполнительного органа станка задается от УЧПУ, в котором при сравнении задающего сигнала и сигнала от датчика обратной связи (ДОС) формируется в аналоговом виде сигнал рассогласования (ошибки) ΔU . Этот сигнал преобразуется в усилителе постоянного тока (УПТ) в ток управления, который поступает в обмотки электрогидравлического усилителя мощности (УЭГ), управляющего вращением гидромотора ГМ, а следовательно, перемещениями исполнительного органа в сторону уменьшения сигнала рассогласования. Достижение требуемых статических и динамических характеристик привода определяется его коэффициентом усилителя по скорости и выбором типа корректирующего воздействия, реализуемых соответствующими регуляторами в УПТ. Динамические качества привода в значительной мере зависят также от динамических характеристик механических узлов станка, особенно когда для повышения точности обратной связи по положению охватывается сам исполнительный орган. Максимальная скорость перемещения при условии компенсации скоростной ошибки в УЧПУ зависит только от соответствующего подбора типоразмеров гидродвигателя и усилителя мощности [4].

В ЭНИМС были созданы широкодиапазонные приводы нового поколения с обратной

связью по положению (рис. 14.16, б). В таком приводе используют стандартный узел управления с шаговым двигателем, в котором шлицевая втулка закреплена, а поэтому шаговый двигатель не вращается, а лишь поворачивается на определенный угол, пропорциональный скорости движения. Такое построение привода при сохранении высокой надежности сквозной цифровой формы передачи управляющих сигналов с выходом на шаговый двигатель позволяет при точности перемещения до 0,01 мм достигать максимальной скорости 50—60 м/мин, которая ограничивается лишь допустимой частотой считывания информации измерительной системы.

14.5. Кондиционеры рабочей жидкости и сжатого воздуха

Надежность работы, длительность эксплуатации, энергетические характеристики станка в значительной степени зависят от качества подготовки рабочей жидкости (газа) и способах подачи их в гидроневмосистему.

В гидроприводах станков рабочая жидкость наряду с передачей энергии исполнительным двигателям предохраняет их внутренние полости от коррозии, обеспечивает смазывание узлов трения и отвод от них теплоты. Рабочие жидкости гидросистем должны длительное время сохранять свои физические свойства и химический состав, обладать хорошей смазывающей способностью, противозадирными и антикоррозийными качествами, сопротивляемостью вспениванию, должны иметь антикави-

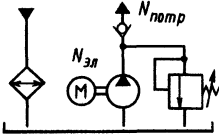
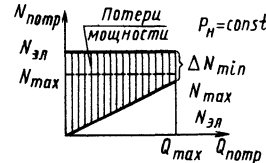
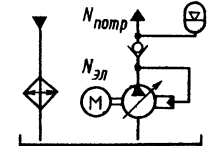
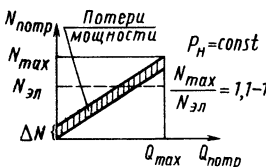
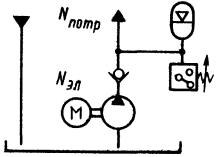
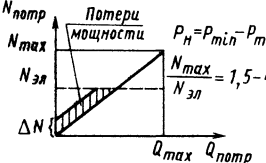
тационные свойства, хорошую теплопроводность, нетоксичность, совместимость с материалами уплотнительных устройств, низкую стоимость. Наилучшим образом удовлетворяют этим требованиям минеральные масла, получаемые путем перегонки нефти.

Характеристики наиболее распространенных марок масел, рекомендуемых к применению в станках, приведены в табл. 14.5. Вязкость минеральных масел, определяемая способностью жидкости сопротивляться относительному сдвигу ее слоев, значительно меняется в зависимости от температуры и давления. При уменьшении температуры от 50 до 20 °С вязкость масла увеличивается в 3—5 раз, а при повышении давления до 15 МПа возрастает на 25—30 %. Это изменение вязкости ухудшает стабильность характеристик привода, условия смазывания трущихся поверхностей, демпфирующие свойства. Поэтому температуру масла в гидросистемах станков необходимо стремиться поддерживать постоянной, и более вязкие масла следует применять в гидроприводах, работающих при повышенном давлении. Способность масла сопротивляться окислению оценивается по кислотному числу, которое определяется числом миллиграммов едкого кали (KOH), необходимого для нейтрализации свободных кислот в 1 г масла. Окисление масла приводит к необходимости его замены ввиду появления осадков смолистых веществ, вызывающих зарастивание малых отверстий, заклинивание трущихся деталей, уменьшение способности масла выделять воду и воздух. При увеличении температуры масла от 50 до 70 °С срок эксплуатации его уменьшается вдвое

14.5. Характеристики минеральных масел, рекомендуемых к применению в гидросистемах станков

| Масло | ГОСТ или ТУ | Кинематическая вязкость, мм ² /с, при 50 °С | Температура, °С | | Кислотное число, мг KOH на 1 г масла |
|----------------------------|------------------|--|-----------------|-------------------|--------------------------------------|
| | | | застывания | вспышки | |
| ИГП-18 ИГП-30 ИГП-38 | ТУ 38101413 — 78 | 16,5 — 20,5 28 — 31 35 — 40 | —15 | 170 200 210 | 0,6 — 1 |
| ВНИИ НП-403 | ГОСТ 16728 — 78 | 25 — 35 | —10 | 190 | 0,7 — 1,1 |
| ИГНСп-20 ИГНСп-40 | ТУ 38101798 — 79 | 19 — 23 38 — 42 | —15 | 170 210 | 2,5 |
| Турбинное Тп22 | ГОСТ 9972 — 74 | 20 — 23 | | —10 | 180 |
| Турбинное Т22 | ГОСТ 32 — 74 | | | | |
| Турбинное Т30 | | 28 — 32 | —10 | | |
| И-20А И-30А И-40А | ГОСТ 20799 — 55 | 17 — 23 28 — 33 35 — 45 | —15 | 190 210 | 0,05 |

14.6. Способы подачи рабочей жидкости насосных установок

| Принципиальная схема | Использование мощности | Эффективная область применения |
|---|---|---|
|  |  | <p>Гидропроводы с постоянным или эпизодическим (с разгрузкой насоса) потреблением рабочей жидкости, с одним или несколькими значениями давления, мощностью до 3 кВт</p> |
|  |  | <p>Гидроприводы с изменяющимся потреблением рабочей жидкости, с одним или несколькими значениями давления, мощностью выше 3 кВт</p> |
|  |  | <p>Гидроприводы с низким уровнем шума, эпизодическим потреблением рабочей жидкости объемом до 2 — 3 л, с одним значением давления, мощностью 2 — 5 кВт</p> |

в связи с резким возрастанием скорости окислительных реакций. Для увеличения срока службы масла и обеспечения незначительного изменения вязкости температуру рабочей жидкости в гидросистемах станков рекомендуется поддерживать в пределах 30—40 °С. Преимущественно следует применять масла марки ИГП, которые содержат антиокислительную, противоизносную, антикоррозийную и противопенную присадки. Масла марок ИГНСп имеют присадки, обеспечивающие плавность скольжения, что позволяет применять их в станках, где рабочая жидкость одновременно используется для смазывания направляющих. Турбинные масла имеют очень хорошие физико-химические свойства, но производятся в ограниченном количестве. Масло марки И рекомендуется применять в качестве заменителей или в простых гидросистемах, к надежности которых не предъявляются высокие требования.

Для длительной и безотказной эксплуатации гидросистем станков необходимо обеспечить чистоту рабочей жидкости. ГОСТ 17216—17 устанавливает 19 классов чистоты жидкостей, которые различаются числом и размерами находящихся в жидкости частиц загрязнений. Для гидроприводов станков рекомендуется использование рабочей жидкости с 7 до 12-го классов чистоты, в которой допускается присутствие механических частиц размером не более 10—25 мкм.

Необходимая степень фильтрации рабочей жидкости, требуемый температурный режим и достаточная для работы исполнительных двигателей мощность потока обеспечиваются в гидросистемах станков отдельным устройством — насосной установкой. Использование насосной установки в качестве дополнительного агрегата станка создает известные эксплуатационные неудобства, так как она занимает определенную площадь, увеличивает металлоемкость, потребляет электроэнергию, нагревает рабочую жидкость и является дополнительным источником шума. Поэтому важное значение имеет выбор рациональной конструкции насосной установки. Определяющее значение при этом имеет выбор эффективного способа регулирования подачи рабочей жидкости (табл. 14.6).

Традиционный способ регулирования подачи жидкости в гидросистему посредством клапана давления имеет низкие энергетические характеристики. Выбор мощности электродвигателя насоса $N_{эл}$ (кВт) в этом случае определяется выражением

$$N_{эл} = \frac{p_n Q_{max}}{61,2\eta}, \quad (14.3)$$

где p_n (МПа) и Q_{max} (л/мин) — соответственно номинальное давление и максимальная потребляемая подача в гидросистеме; η — полный КПД насоса; $\eta = 0,6...7$ — для лопастных насо-

сов, $\eta = 0,8 \dots 0,85$ — для аксиально-поршневых насосов.

Так как p_n и Q_{\max} выбирают с некоторым запасом, а значения мощности электродвигателя, рассчитанные по выражению (14.3), округляются до большего числа, то даже в наиболее благоприятном случае при $Q_{\text{потр}} = Q_{\max}$ имеется излишек непроеводительной мощности $\Delta N_{\text{мин}}$, который тратится только на нагревание рабочей жидкости. При прекращении потребления рабочей жидкости исполнительными двигателями практически вся мощность электродвигателя переходит в теплоту. Поэтому в этих случаях для уменьшения непроеводительных потерь применяют различные системы разгрузки, используют двухпоточные насосы и разделительные панели [6, 9], которые хотя и дают определенный энергетический эффект, но приводят к усложнению конструкции насосной установки.

Одним из способов улучшения энергетических характеристик насосных установок является использование регулируемых насосов, у которых при постоянном давлении нагнетания подача насоса изменяется автоматически при изменении расхода в гидросистеме. В этом случае потери мощности ΔN определяются только потерями в самом насосе и системе управления его подачи и не зависят от подачи насоса. С учетом циклограммы работы гидродвигателей мощность, вырабатываемая насосом при $Q_{\text{потр}} = Q_{\max}$, может быть больше мощности приводного электродвигателя $N_{\text{эл}}$ за счет его перегрузки, допускаемой, например, при повторно-кратковременном режиме работы. Предельным значением, ниже которого не следует понижать приводную мощность электродвигателя, является

$$N_{\text{эл}} \leq \frac{1}{K_m} \frac{p_n Q_{\max}}{61,2 \eta}, \quad (14.4)$$

где $K_m = 1,7 \dots 2,2$ — допустимый коэффициент перегрузки асинхронных двигателей серии 4А по моменту.

Применение сложных по конструкции регулируемых насосов не исключает в большинстве случаев использования теплообменников и гидроаккумуляторов. Поэтому применение такой достаточно сложной и дорогой гидравлической системы оправдано при необходимости реализации достаточно высоких мощностей гидропривода (выше 3 кВт).

При эпизодическом режиме работы гидродвигателей наилучшие энергетические характеристики насосных установок могут быть достигнуты при использовании простых по конструкции насосов постоянной подачи в сочетании с гидроаккумуляторами. В этом случае непроеводительные потери мощности ΔN определяются только КПД насоса и имеют место при его работе на подзарядку аккумулятора, а в остальное время электродвигатель насоса может быть отключен и потери мощности при этом полностью отсутствуют. В то же время при разрядке гидроаккумулятора кратковременная отдача мощности в гидросистему может быть очень большой. На рис. 14.17 показаны характерные режимы работы и основные параметры насосной установки с гидроаккумулятором. Исходные данные для выбора оптимальных параметров этой гидросистемы следующие: $\Sigma V_{\text{гд}}$ — суммарный объем, необходимый для реализации цикла работы гидродвигателей (см. табл. 14.2); $\Sigma Q_{\text{ут}}$ — суммарный объем утечек исполнительных двигателей, направляющей и регулирующей аппаратуры; $t_{\text{ц}}$ — время цикла, соответствующее заполнению объема $\Sigma V_{\text{гд}}$; $t_{\text{мин}}$ — гарантированное минимальное время (пауза) между циклами; $t_{\text{пер}}$ — желаемое время перерыва в работе насоса под нагрузкой; p_{\max} , $p_{\text{мин}}$ — допустимые максимальные и минимальные значения номинального давления в гидросистеме, при которых обеспечивается нормальная работа потребителей.

Для определения требуемой подачи насоса Q_n , мощности электродвигателя $N_{\text{эл}}$, конструктивного (полного) объема аккумулятора $V_{\text{ак}}$, давления его заряда $p_{\text{зар}}$ и давления включения в работу насоса $p_{\text{вкл}}$ рассмотрим четыре

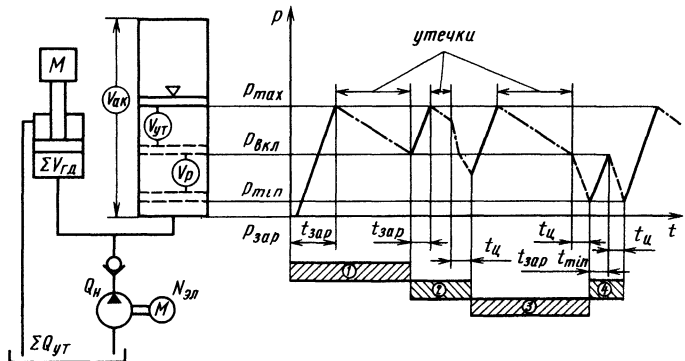


Рис. 14.17. Изменение параметров гидросистемы с аккумулятором в зависимости от режимов работы: сплошная линия — работа насоса, штрих-пунктирная — аккумулятора, штриховая — насоса и аккумулятора

характерных режима работы гидросистемы. Режим 1 характеризует начало работы насосной установки. Перед запуском насоса разделитель аккумулятора находится в крайнем нижнем положении, газовая полость аккумулятора занимает полный объем $V = V_{ак}$ при давлении $p = p_{зар}$. После включения насоса благодаря сжатию газа происходит заполнение маневрового объема аккумулятора V_m , и при достижении давления в гидросистеме $p = p_{max}$ подача насоса отключается. Дальнейшее поддержание давления в гидросистеме осуществляется аккумулятором, и при отсутствии работы потребителей его вытесняемый объем расходуется на утечки, т. е.

$$V_{ут} = \Sigma Q_{ут} t_{пер}. \quad (14.5)$$

При уменьшении давления до $p = p_{вкл}$ включается подача насоса, и цикл работы повторяется.

Режим 2 является наиболее типичным для работы гидросистемы, когда после зарядки аккумулятора и некоторой компенсации утечек за счет объема $V_{ут}$ начинается цикл работы гидродвигателей. В этом случае после вытеснения объема $V_{ут}$ при уменьшении давления до $p = p_{вкл}$ включается подача насоса, и дальнейшее завершение цикла обеспечивается одновременной работой насоса и расходом резервного объема V_p . Режим 3 является критическим в работе гидросистемы и представляет собой частный случай режима 2, когда окончание вытеснения объема $V_{ут}$ совпадает с началом цикла работы гидродвигателей, который должен полностью обеспечиваться вытеснением резервного объема V_p при давлении $p \geq p_{min}$, т. е.

$$V_p \geq \Sigma V_{гк} + \Sigma Q_{ут} t_{ц} - Q_n t_{ц}. \quad (14.6)$$

Режим 4 является продолжением режима 3, когда подача насоса Q_n должна за время $t_{мин}$ обеспечить заполнение объема V_p , достаточного для заполнения цикла работы гидродвигателей по условию (14.6), т. е.

$$Q_n \geq \frac{\Sigma V_{гк} + \Sigma Q_{ут} t_{ц}}{t_{мин}}. \quad (14.7)$$

При этом мощность электродвигателя насоса $N_{эл}$ (кВт) с учетом допустимого коэффициента перегрузки электродвигателя по моменту $K_m = 1,7 \dots 2,2$ при повторно-кратковременном режиме работы

$$N_{эл} \leq \frac{1}{K_m} \frac{p_{max} Q_n}{61,2 \eta}. \quad (14.8)$$

Конструктивный (полный) объем гидроаккумулятора при выполнении условий (14.5) и (14.6) определяется выражением

$$V_{ак} = \frac{V_{ут} + V_p}{p_{зар} \left(\frac{1}{p_{min}} - \frac{1}{p_{max}} \right)}. \quad (14.9)$$

Для более полного использования объема аккумулятора рекомендуемое давление его зарядки $p_{зар} = (0,8 \dots 0,9) p_{min}$.

В настоящее время серийно выпускается достаточно широкая номенклатура насосных установок, в которых реализуются рассмотренные выше различные способы регулирования подачи насоса. Основные типоразмеры, технические данные и общий вид насосных установок, рекомендуемых для применения в станках, приведены в табл. 14.7, а их принципиальные схемы и особенности конструкции рассмотрены в работах [3, 6].

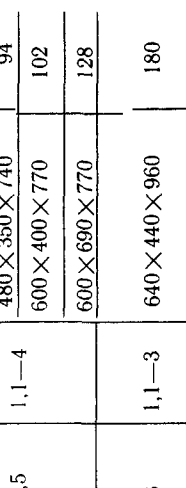
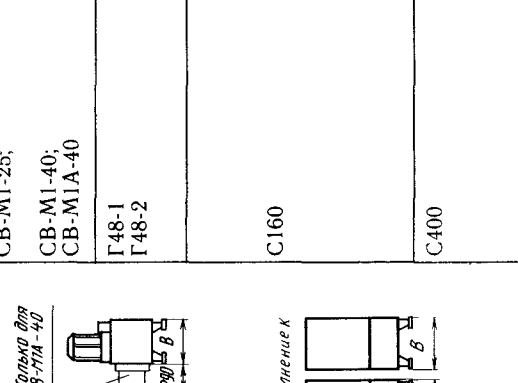
Использование сжатого воздуха в пневмосистемах станков требует проведения определенного комплекса мероприятий по его кондиционированию, т. е. очистке и сушке, подаче смазочных материалов к трущимся поверхностям пневматических устройств, борьбе с шумом, а также загрязнением окружающей среды при выхлопе сжатого воздуха в атмосферу. В сжатом воздухе, поступающем по цеховой пневмосети от центральной компрессорной установки, всегда содержится вода, минеральное масло, различные кислоты, щелочи и механические частицы. Эти вредные для пневматических систем примеси могут находиться в сжатом воздухе в виде пара и конденсата, образуя часто водомасляные эмульсии с очень высокой вязкостью. Загрязнения сжатого воздуха, оказывая физическое, химическое и электролитическое воздействия на пневмоустройства, снижают их долговечность и безотказность в 3—7 раз, а выход устройств из строя по той же причине составляет до 80 % общего числа отказов. Степень очистки воздуха классифицирует ГОСТ 17433—80, согласно которому установлено 15 классов чистоты. Для каждого класса чистоты воздуха имеются требования, лимитирующие наличие воды, масла и механических примесей. Так, для регулирующей и направляющей аппаратуры, пневмоцилиндров при высоких требованиях к надежности рекомендуется степень очистки сжатого воздуха не выше 5—7-го классов, что соответствует максимальным размерам твердых частиц не более 25...40 мкм, причем вода и масло в жидком состоянии не допускаются.

Кондиционирование воздуха для подачи его в пневмосистему станков обычно осуществляется посредством блока подготовки воздуха (рис. 14.18). Наибольшее распространение в качестве фильтров-влагоотделителей ФВ получили устройства центробежного типа, в которых твердые частицы, капли воды и масла, нахо-

дящиеся в потоке сжатого воздуха, поступающего в входное отверстие 1, закручиваются по спирали крыльчаткой 2 и отбрасываются на внутренние стенки резервуара 3. Под крыльчаткой находится керамический фильтр 4, через который поток очищенного воздуха направляется в выходное отверстие 5. Отражатель 6 перегораживает внутреннюю полость резервуара и предотвращает захват влаги, скопившейся на дне резервуара, потоком сжатого воздуха. Уровень конденсата в резервуаре 3 контролируется визуально, и по мере его накопления он удаляется вручную с помощью устройства 7.

Выпускаются также фильтры-влажнотделители с автоматическим конденсатоотводчиком. Максимальные размеры отделяемых частиц для фильтров-влажнотделителей центробежного типа составляют 5—40 мкм, степень отделения капельной влаги 80—90 % в зависимости от расхода воздуха. Для регулирования и стабилизации давления в пневмосистеме станка в составе блока подготовки воздуха используют редукционные пневмоклапаны КР, для обеспечения нормальной работы которых давление на выходе клапана должно быть меньше давления в цеховой пневмосети. В редукционном клапане давление пружины 8 уравновешивается давлением сжатого воздуха, действующего на мембрану 9. Если давление на выходе падает ниже заданной величины, то указанное равновесие нарушается, мембрана 9 прогибается и через толкатель 10 отжимает клапан 11, увеличив проходное отверстие для воздуха и компенсируя тем самым падение давления на выходе. Настройку редуцированного давления осуществляют регулировочным вин-

14.7. Технические характеристики насосных установок, рекомендуемых к применению в станках

| Общий вид | Тип | Вместимость бака, л | Насос | | P_{max} , МПа | $N_{\text{эл}}$, кВт | Габаритные размеры $L \times B \times H$, мм | Масса, кг |
|--|------------------------|---------------------|---|-------------------------|------------------------|------------------------|---|-----------|
| | | | Тип | Подача, л/мин | | | | |
|  <p>Здесь же для CB-M1A-40</p> | CB-M1-25; | 25 | БГ12-2М, один поток | 3,3—19,4 | 12,5 | 1,1—4 | 480×350×740 | 94 |
| | CB-M1-40; CB-M1A-40 | 40 | | 3,3—25 | | | 600×400×770 | 102 |
| | Г48-1 Г48-2 | 63 | Г12-3М: один поток два потока | 10—40 10/10—15/40 | 6,3 | 1,1—3 | 640×440×960 | 180 |
|  <p>Исполнение К</p> | C160 | 160 | БГ12-2М: один поток два потока | 5,4—33 5,4/5,4—9/25 | 12,5 | 2,2—11 | 990×640×1600; 990×640×1800; 990×640×2000 | 187—634 |
| | C400 | 400 | НП _р Р50/16, регулируемый НП _р Р80/16, регулируемый НП _р Р125/16, регулируемый | 3—63,5 3—97 3—152 | 16,0 | 4—15 15—37 22—45 | 1500×850×1810 1500×850×2010 1500×850×2210 | 270—940 |

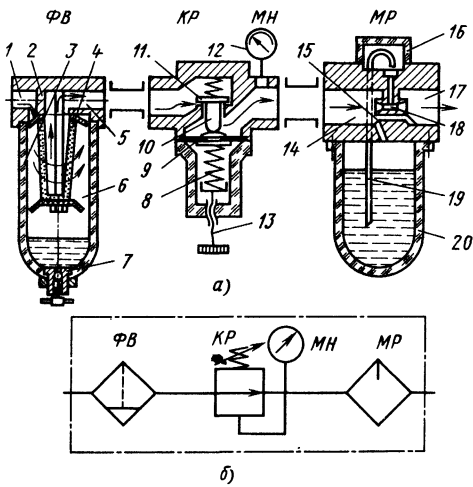


Рис. 14.18. Функциональная (а) и принципиальная (б) схемы блока подготовки воздуха

том 13, а контроль выполняют по манометру 12. Для смазывания трущихся пар пневматических устройств и предохранения их внутренних поверхностей от коррозии наибольшее распространение получили маслораспылители МР, у которых смазочный материал в пневмосистему подается в виде аэрозолей. Поток воздуха, подведенный к отверстию 14 маслораспылителя МР, делится на две части: 1) проходящую по каналу 15 к выходному отверстию 17; 2) проходящую по каналу эжектирующего сопла 18, на выходе которого происходит местное понижение давления вследствие увеличения скоростного напора. Это снижение давления вызывает всасывание масла по трубке 19 из резервуара 20, которое в виде капель поступает в камеру, образованную прозрачным колпачком 16, а оттуда направляется через отверстия в корпусе в поток проходящего сжатого воздуха.

В настоящее время серийно выпускают достаточно широкую номенклатуру блоков подготовки воздуха, основные типы, параметры и принципиальные схемы которых рассмотрены в работе [10]. Конструкции различаются условным проходом, устройствами подключения к це-

ховой пневмосети, способами контроля давления, наличием или отсутствием маслораспылителей. Одной из современных тенденций в развитии пневмопривода является использование в пневматической аппаратуре и устройствах, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, самосмазывающихся пластических материалов, позволяющих полностью устранить или резко сократить загрязнение окружающей среды при выхлопе сжатого воздуха в атмосферу.

Список литературы

1. **Богданович Л. Б.** Гидравлические приводы. Киев: Вища школа, 1980. 232 с.
2. **Выбор** и расчет оптимальных способов и схем торможения пневмодвигателей: Методические рекомендации. М.: ВНИИГидропривод, 1986. 60 с.
3. **Гидравлическое оборудование:** Каталог. М.: ВНИИМАШ: 1979. 600 с.
4. **Лещенко В. А.** Гидравлические следящие приводы для станков с программным управлением. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
5. **Пневматические устройства и системы** в машиностроении: Справочник/Е. В. Герц, А. И. Кудрявцев, О. В. Ложкин и др.; Под общ. ред. Е. В. Герц. М.: Машиностроение, 1981. 408 с.
6. **Свешников В. К., Усов А. А.** Станочные гидроприводы: Справочник. М.: Машиностроение, 1988. 512 с.
7. **Скрицкий В. Я., Рокшевский В. А.** Эксплуатация промышленных гидроприводов. М.: Машиностроение, 1984. 176 с.
8. **Слюсарев А. И.** Гидравлические и пневматические элементы и приводы промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1989. 168 с.
9. **Столбов Л. С., Перова А. Д., Ложкин О. В.** Основы гидравлики и гидропривод станков. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.
10. **Элементы и устройства пневмоавтоматики высокого давления:** Каталог/А. И. Кудрявцев, О. В. Ложкин, А. Я. Оксененко и др.; Под ред. А. И. Кудрявцева и А. Я. Оксененко. М.: НИИМАШ, 1982. 156 с.

Глава 15

Системы управления

15.1. Классификация и структура систем управления

Управление металлорежущими станками — это воздействие на его механизмы и устройства для выполнения требуемого технологического процесса обработки заготовки с заданными точностью, производительностью и себестоимостью обработки.

Управление станком состоит из получения информации о цели управления, о результатах управления (перемещениях рабочих органов, срабатывании различных механизмов), анализа полученной информации, выработки решения и исполнения принятого решения.

Управление станком может выполняться оператором (вручную) или без его непосредственного участия — системой автоматического управления.

При управлении вручную оператор использует свой опыт и сведения о методах обработки, последовательности выполнения технологических переходов, применяемых режимах обработки, возможностях и особенностях конструкции применяемого станка, режущих инструментов и др. На основе разработанной технологической карты или своего опыта и знаний он выбирает нужный режущий инструмент, зажимные и другие приспособления, мерительный инструмент, осуществляет их установку, наладку и подналадку. И затем выполняет управление процессом обработки, получая соответствующее его квалификации качество обработки и производительность.

Управление упрощается, а доля участия оператора в нем снижается при применении устройств цифровой индикации и управления (УЦИУ). Схема самого простого УЦИУ показана на рис. 15.1. При перемещении рабочего органа 1 станка (стола, суппорта, шпиндельной бабки) подвижная часть 5 измерительного преобразователя (ИП), связанная с рабочим органом, проходя относительно неподвижной части 4 ИП, преобразует перемещение в пропорциональное ему число импульсов, которые поступают в счетчик 2 и индицируются на цифровом табло 3.

Начало отсчета может быть совмещено с любой точкой контролируемого перемещения путем установки счетчика на нуль. В качестве ИП в УЦИУ применяются импульсные фотоэлектрические ИП со штриховыми шкалами, а также фазовые ИП (сельсины и индуктоины).

УЦИУ классифицируют по следующим уровням автоматизации станков:

измерительный уровень (И), когда УЦИУ выполняет только функции отсчета перемещений;

уровень выдачи рекомендаций оператору станка (Р), когда УЦИУ осуществляет функцию предварительного набора перемещений. В этом случае оператор набирает требуемые величины перемещений рабочих органов, а затем перемещает их вручную до достижения нулевых показаний на цифровом табло УЦИУ;

уровень выдачи оператору рекомендаций, записанных в рабочей программе (РП), когда на цифровом табло по программе высвечиваются требуемые значения и направления перемещения и оператор вручную их обрабатывает;

управляющий уровень (У), когда УЦИУ выполняет функции предварительного набора перемещений и их автоматической отработки. Оператор в этом случае только нажимает на кнопку, а станок обрабатывает заданные перемещения. При этом команды позиционирования выдает УЦИУ;

управляющий программный уровень (УПУ), когда УЦИУ работает автоматически по программе, т. е. выполняет функции, аналогичные функциям устройства числового программного управления.

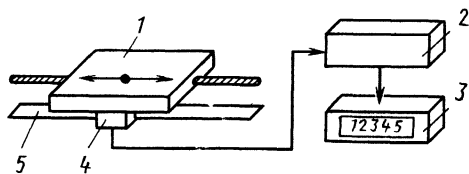


Рис. 15.1. Схема простейшего устройства цифровой индикации (УЦИУ)

15.1. Технические характеристики некоторых УЦИУ

| Характеристика | Модели УЦИУ отечественной разработки | | | | | Модели фирмы Heidenhain | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|----------------|---------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| | Ф5147 | Ф5291 | Ф5134 | Ф5246 | ЛьюМО-11 | VRZ316 | VRZ753 | VRZ965 | TNC135 |
| Уровень автоматизации | И | И | У | У | (УПУ) | И | И | РП | (УПУ) |
| Число координат | 1; 2 | 1; 10 | 1; 2 | 1; 10 | 2; 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Дискретность отсчета, мкм | 1; 10 | 1; 10 | 1; 10 | 1; 10 | 2; 10 | 5; 10 | 5; 10 | 5; 10 | 5 |
| Наличие опорной точки | — | + | — | + | + | + | + | — | — |
| Наличие коррекции инструмента | — | — | — | + | + | — | — | + | + |
| Число кадров программы | — | — | — | — | 100 | — | — | 400 | 500 |
| Тип измерительного преобразователя | Сельсин, индуктосин | Индуктосин | Сельсин, индуктосин | Сельсин | Фотоэлектрический импульсный | — | — | Фотоэлектрический импульсный | — |
| Габаритные размеры, мм | 200 × 80 × 135 | 325 × 80 × 300 | 200 × 80 × 190 | 325 × 140 × 340 | 460 × 230 × 210 | 262 × 82 × 302 | 270 × 221 × 155 | 289 × 290 × 188 | 281 × 274 × 221 |

Примечания: 1. Знак «+» — функция предусмотрена, знак «—» — не предусмотрена.
2. Габаритные размеры УЦИУ мод. Ф5147 и Ф5134 указаны без учета размеров блока преобразования.

Кроме режимов работы, отвечающих разным уровням автоматизации, УЦИУ может иметь также и другие режимы, например записи программы, самодиагностирования и т. д.

По функциональным возможностям УЦИУ разделяют на две группы: УЦИУ общего назначения без ориентации их технологических функций на определенную группу станков, выполняющие только простейшие функции цифрового отсчета величин перемещений; УЦИУ, функционально ориентированные на определенный тип станков.

Наряду с отечественными УЦИУ мод. Ф5071, Ф5147, Ф5290, Ф5291, Ф5095, Ф5134, Ф5246, размер 2М1104, ЛьюМО-61 и др. широко применяются УЦИУ, выпускаемые фирмами Heidenhain (Германия), Sony Magnescale (Япония), RSF Elektronik (Австрия), Tri-omcs (США), Bausch and Lomb (США) и др.

В табл. 15.1 приведены технические характеристики некоторых УЦИУ.

Для обозначения отечественных металлорежущих станков с УЦИУ в наименовании модели станка добавляют индекс Ф1 (например, модель 2Н636ГФ1).

Подробное описание конструкций и примеров применения УЦИУ различных уровней приведено в работах [18, 24].

При автоматическом управлении металлорежущим станком функции его управления выполняет система автоматического управления (САУ), работающая по заранее составленной управляющей программе, вводимой в систему управления с помощью соответствующего программносителя.

Функционирование станка при автоматическом управлении определяется его структурой и алгоритмом управления, заложенными в данную систему управления. При этом структура станка определяет его состав и связь между рабочими органами, вспомогательными механизмами и устройствами. Алгоритм управления, по которому работает система управления, предписывает последовательность выполнения различных функций управления станком.

Под управляющей программой (УП) понимают совокупность команд на языке программирования, соответствующую заданному алгоритму функционирования станка по обработке конкретной заготовки. УП включает, как правило, команды трех категорий:

технологические, обеспечивающие управление перемещениями рабочих органов станка с заданными подачами на требуемые расстояния в процессе обработки;

цикловые, осуществляющие переключение скоростей, подач, выбор и смену инструментов, смену палет с заготовками, включение и отключение подачи охлаждающей жидкости, контроль точности обработки и др.;

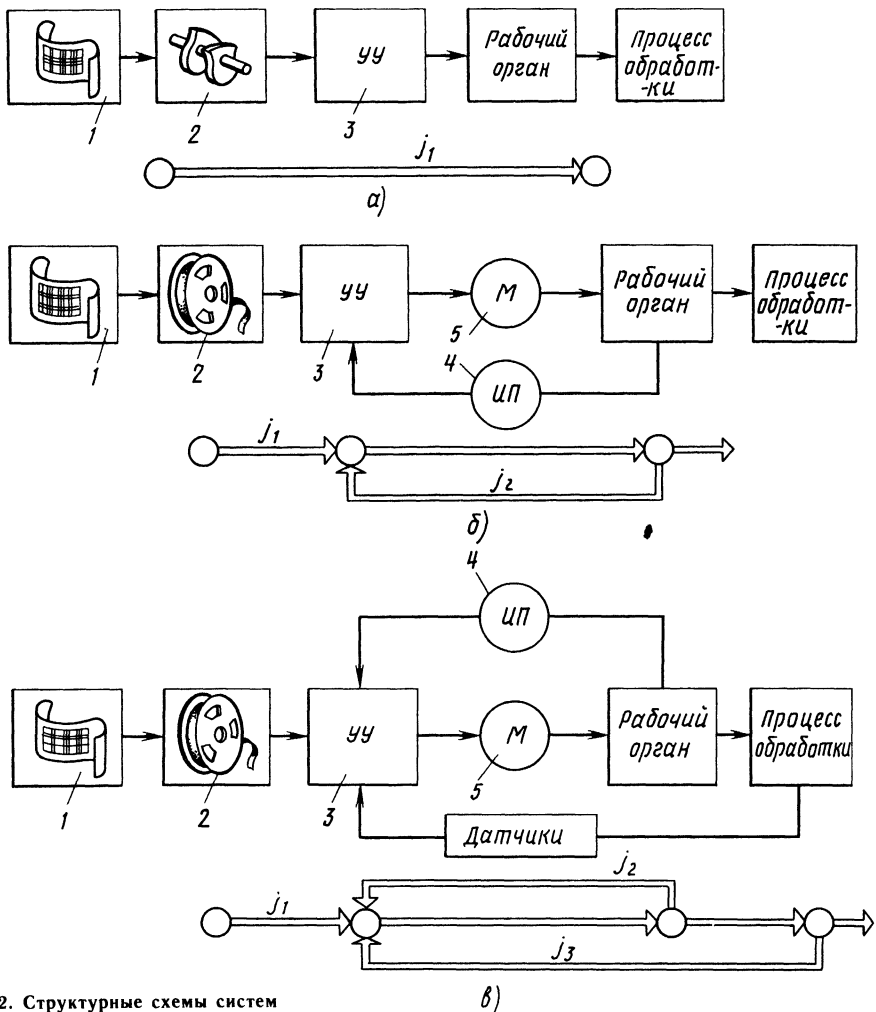


Рис. 15.2. Структурные схемы систем автоматического управления:

а — разомкнутая; б — замкнутая с ИП по положению рабочих органов станка; в — адаптивная

служебные или логические, обеспечивающие правильность отработки станков всех указанных выше задаваемых ему команд.

Носитель данных, на котором записана УП, называют *программоносителем*. В качестве программоносителя используют кулачки, копии, линейки с упорами, перфоленты, магнитные ленты, а также запоминающие устройства различного типа.

САУ металлорежущими станками классифицируют по различным признакам в зависимости от задач их практического применения.

Широко применяют классификацию САУ по информационным признакам, под которыми понимают число и структуру потоков информации при управлении различными металлорежущими станками. Чем полнее информация, используемая в САУ, тем выше качество ее

работы и шире ее функциональные возможности.

Источником информации, поступающей в САУ на входе, является ИП, а в качестве обратной связи могут использоваться потоки информации, характеризующие состояние процесса отработки информации (положения рабочих органов станка, уровень вибраций, температурных деформаций, размеры обрабатываемой заготовки); информация о возмущениях, действующих на процесс обработки, которые не зависят от процесса управления (например, припуск, твердость материала, температура окружающей среды и др.).

Перечисленные источники информации используют в САУ в различных сочетаниях, образуя определенную структуру САУ (рис. 15.2).

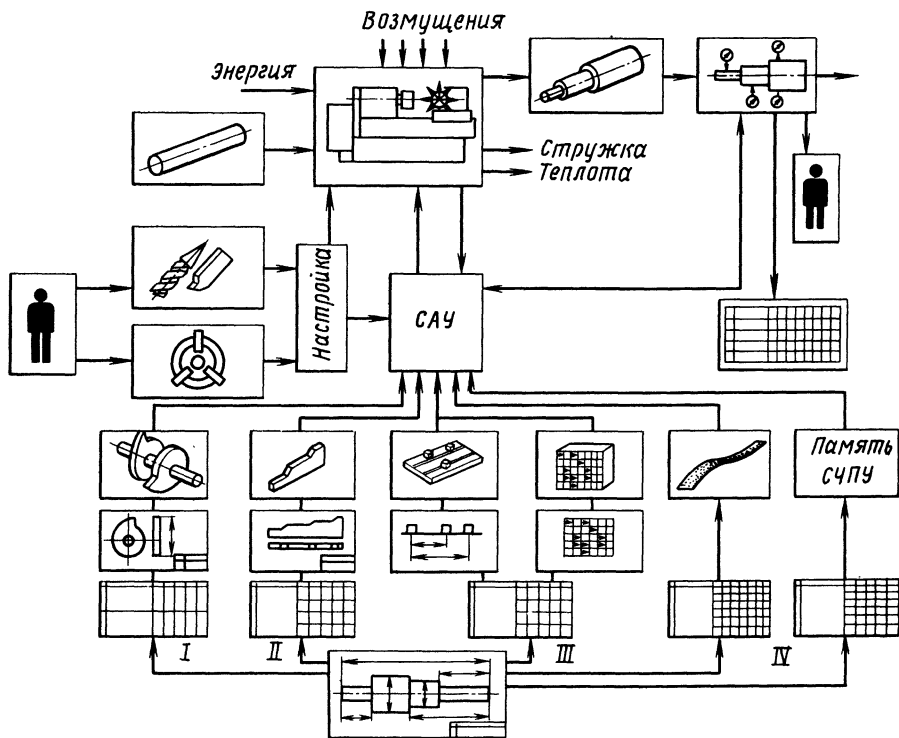


Рис. 15.3. Различные варианты систем автоматического управления станком

В разомкнутых системах управления (см. рис. 15.2, а) имеется только прямой поток информации j_1 , и устройство управления (УУ) не контролирует действительное положение рабочего органа станка, поэтому точность его перемещения будет зависеть от точности передаточных механизмов привода подачи.

Разомкнутыми системами управления являются системы управления с распределительным валом (РВ), механические копировальные системы, системы ЧПУ с приводами подач, в которых используются шаговые электродвигатели.

Замкнутые системы управления подразделяют на три подгруппы:

с обратной связью по положению рабочих органов станка (стола, салазок, шпиндельной бабки) — поток информации j_2 от измерительного преобразователя (ИП). К этой группе относятся следующие копировальные системы, большинство современных систем ЧПУ;

с обратной связью по положению рабочих органов станка и с компенсацией погрешностей станка (тепловых деформаций, износа, вибраций и др.). В этих системах имеются дополнительные датчики, измеряющие погрешности станка и также передающие сигналы в УУ для коррекции начальной информации;

адаптивные, в которых кроме обратной связи по положению рабочих органов станка (поток информации j_2) имеется обратная связь (поток информации j_3 от соответствующих датчиков) по параметрам процесса обработки (силе резания, крутящему моменту, температуре в зоне резания, амплитуде вибраций и др.), что позволяет учитывать и компенсировать влияние на точность обработки колебаний припуска на заготовке, твердости обрабатываемого материала, износа режущего инструмента и других факторов, которые носят случайный характер, и их предусмотреть заранее невозможно. Эти системы управления являются самыми сложными, но обеспечивают высокую точность, оптимальную производительность и минимальную себестоимость обработки.

По характеру управляющих сигналов различают непрерывные (аналоговые) и дискретные системы автоматического управления. Непрерывные сигналы являются непрерывными функциями времени. Дискретной системой управления является система, содержащая хотя бы одно звено дискретного действия.

На рис. 15.3 показаны различные варианты существующих систем автоматического управления станками:

I — системы управления с РВ и кулачками,

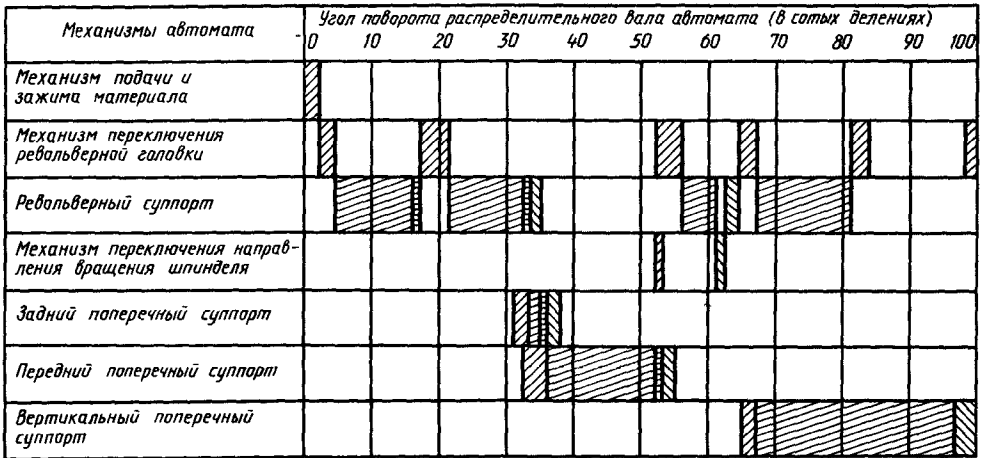


Рис. 15.4. Циклограмма работы токарно-револьверного автомата

где УП задается в аналоговом виде — в виде рабочих и командных кулачков, устанавливаемых на РВ в соответствии с разработанной циклограммой;

II — копировальные системы управления, где УП также задается в аналоговом виде — в виде копира;

III — системы циклового программного управления (ЦПУ), в которых размерная информация задается в аналоговом виде путевыми упорами, устанавливаемыми на сменных линейках, и цикловая — в цифровом виде набором на пульте управления;

IV — системы ЧПУ, в которых УП задается в цифровом виде и либо вводится с помощью перфоленты, либо набирается на пульте непосредственно оператором и вводится в память системы управления, либо подается от ЭВМ более высокого уровня управления.

Системы автоматического управления могут строиться на механической, гидравлической, пневматической, пневмогидравлической, электрической, электрогидравлической и электронной основах.

В системах управления с РВ за счет применения дисковых и цилиндрических кулачков, установленных на РВ, обеспечивается управление большим числом различных рабочих органов с надежной и максимальной синхронизацией их движений. Путем построения циклограммы (рис. 15.4) для этих систем управления заранее проектируют и рассчитывают рабочий цикл обработки заготовок любой сложности за определенный промежуток времени $T = t_p + t_{в.х.}$, соответствующий одному обороту РВ. Здесь t_p и $t_{в.х.}$ — соответственно суммарное время несовмещенных рабочих и вспомогательных ходов.

Системы управления с РВ по принципу совершения вспомогательных ходов подразделяют на три группы [23].

1. Системы управления с РВ, в которых частота вращения РВ для каждой настройки гитары сменных зубчатых колес $У$ постоянна в течение всего времени рабочего цикла T (рис. 15.5, а). Поэтому при изменении (например, увеличении) времени рабочих ходов пропорционально изменяется (увеличивается) время вспомогательных ходов, хотя эти вспомогательные ходы можно было бы выполнить за меньшее время.

Исходя из этого данную группу систем управления применяют в металлорежущих автоматах для обработки достаточно простых деталей небольшого диаметра (например, в автоматах продольного точения 1Р103, 1103, 1В06А, 1Б10П, 1М10В, а также зарубежных автоматах фирм Tornos (Швейцария), Strohm (Германия), Bechler (Швейцария) и др. Подробное описание систем управления с РВ первой группы, а также автоматов с данными системами управления приведено в работах [5, 11].

2. Системы управления с РВ, в которых РВ в течение рабочего цикла T имеет две разные частоты вращения (рис. 15.5, б): вращение с малой частотой через гитару сменных зубчатых колес $У$, когда выполняются рабочие ходы, и вращение с максимально возможной частотой (исходя из прочности механизмов вспомогательных ходов) по кинематической цепи с постоянным передаточным отношением i , когда выполняются все вспомогательные ходы. Поэтому данную группу систем управления с РВ наиболее эффективно применять при обработке наиболее сложных и трудоемких деталей.

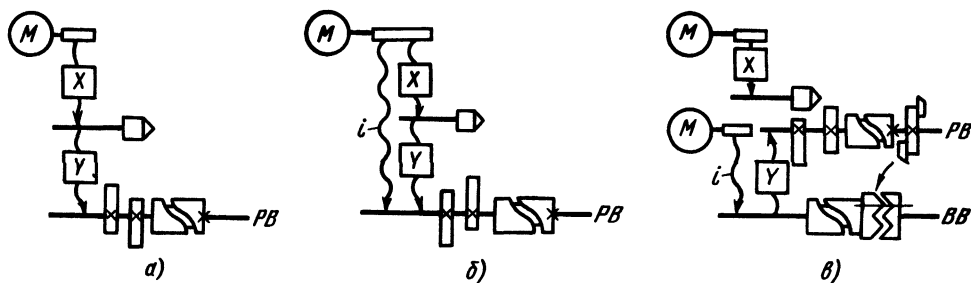


Рис. 15.5. Принципиальные схемы автоматов с системами управления с РВ: а — группа I; б — группа II; в — группа III

Системами управления с РВ второй группы оснащают многшпиндельные автоматы и полуавтоматы [например, 1Б216, 1Б240, 1Б290, 1Б240П и др., а также автоматы фирм Gilde-meister (Германия), Асme—Gridley (США) и др.]. Подробное описание данной группы систем управления с РВ, а также автоматов и полуавтоматов с данными системами управления приведено в работах [5, 21].

3. Системы управления (рис. 15.5, в), имеющие РВ, который вращается так же, как в системах первой группы, с одной скоростью при выполнении всех рабочих и части вспомогательных ходов (подвод и отвод поперечных суппортов). Остальные вспомогательные ходы (подача и зажим прутка, поворот револьверной головки, переключение частоты и направления вращения шпинделя и др.) выполняются с помощью вспомогательного вала (ВВ), который вращается с максимально возможной постоянной для данного автомата частотой по цепи с постоянным передаточным отношением i . Выполнение вспомогательных ходов с помощью ВВ управляется командными кулачками, установленными на РВ. Эти системы управления применяют на автоматах для обработки деталей средней трудоемкости. Системами управления с РВ третьей группы оснащают токарно-револьверные автоматы [например, 1Д112, 1Д118, 1Б124, 1Б136, 1Е125, 1Е140, автоматы фирм Index (Германия), Traub (Германия), Tagex (Швейцария) и др.]. Подробное описание систем управления с РВ третьей группы и различных типов токарно-револьверных автоматов, а также вопросы проектирования и расчета кулачковых механизмов для систем управления с РВ рассмотрены в работах [5, 17], а также во втором томе данного справочника.

В копировальных системах управления (механических и следящих) программносителем является копир (плоский или объемный), представляющий собой прототип обрабатываемого изделия или его частей.

В механических копировальных системах ко-

пир выполняет функции управления и подачи режущего инструмента, воспринимая силы резания, а в следящих копировальных системах он осуществляет только функцию управления (рис. 15.6). Функцию рабочей подачи выполняет силовой следящий привод 3 (электрический или гидравлический), получающий сигналы управления 4 от копировальной головки 6 и обеспечивающий шпиндельной бабке 2 следующее движение подачи $D_{scн}$. Это происходит при задающем движении $D_{с3}$ стола 9 с копиром 8 на расстоянии Δl и подъеме шупа 7 относительно копировальной головки 6 на величину Δl .

В результате при обработке заготовки 1 режущий инструмент перемещается со скоростями подач $v_{scн}$ и $v_{с3}$ с получением результирующей скорости подачи v_{sp} .

Рассмотренный принцип работы следящих копировальных систем позволяет изготавливать копир из легкообрабатываемого материала, снижать его износ и тем самым повышать точность обработки. Резко сокращаются трудоемкость и стоимость изготовления копира.

Применяют электрические [25], гидравлические [7], электрогидравлические и другие

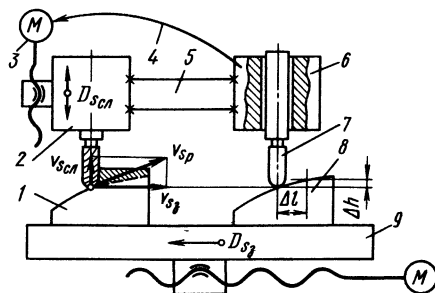


Рис. 15.6. Структурная схема следящей копировальной системы управления:

1 — заготовка; 2 — шпиндельная бабка с фрезой, имеющая следующее движение $D_{scн}$; 3 — силовой следящий привод; 4 — сигнал управления; 5 — жесткая механическая обратная связь; 6 — копировальная головка; 7 — шуп; 8 — копир; 9 — рабочий стол, имеющий постоянное задающее движение $D_{с3}$

следящие копируемые системы управления в основном на токарных и фрезерных станках.

Копируемые системы управления, как и системы управления с РВ, большей частью просты по конструкции, надежны в работе и имеют невысокую стоимость. Однако преобразование числовой информации чертежа изделия в аналоговый вид (кулачки, копиры) требует трудоемкого проектирования, изготовления физических аналогов и их последующей наладки на станке. Это приводит к низкой мобильности данных систем управления (особенно систем управления с РВ), а указанное преобразование числовой информации УП приводит к погрешностям передачи информации, возникающим при изготовлении кулачков и копиров и вследствие их изнашивания в процессе эксплуатации.

В системах циклового программного управления (ЦПУ) одна часть УП — информация о цикле и режимах обработки — задается в числовом виде с использованием в качестве программносителей как электромеханических информационных носителей (штекерные и коммутационные поля, программные барабаны, диодные перепрограммируемые матрицы, разъемы, перфокарты и др.), так и электронных носителей, построенных на основе больших интегральных схем (БИС) полупостоянных запоминающих устройств с электрической перезаписью информации.

Другая часть УП — размерная информация, характеризующая перемещения рабочих органов станка, — устанавливается с помощью путей упоров на специальных линейках или барабанах. Для каждой координаты настраивают и устанавливают свою линейку.

На рис. 15.7 показана типовая структурная схема системы ЦПУ. Информация о цикле и режимах обработки задается блоками задания и поэтапного ввода УП. Блок задания УП (программатор) представляет собой чаще всего штекерную панель. Блок поэтапного ввода УП выполняют в виде электронной или релейной счетно-распределительной схемы, построенной на шаговых искателях, электромагнитных реле или логических элементах.

Далее информация передается в блок электроавтоматики, предназначенный для усиления и распределения команд, поступающих на исполнительные механизмы $ИМ_1—ИМ_n$ чаще всего через электромагнитные муфты привода подач, коробки скоростей и др.

Блоки системы ЦПУ выполняют на основе электрических, пневматических или гидравлических элементов.

В настоящее время в качестве блока автоматки используют *программируемые командопанели* ПК, которые, как и обычные релей-

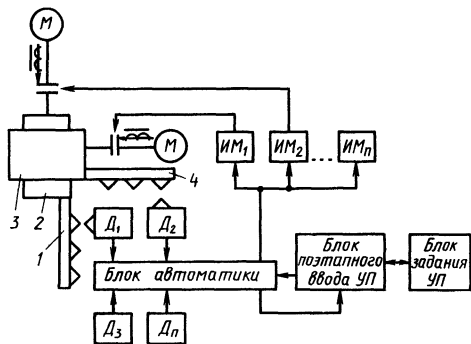


Рис. 15.7. Структурная схема системы ЦПУ

ные устройства, выполняют логические функции и функции выдержки времени.

ПК представляют собой совокупность аппаратных и программных средств, позволяющих имитировать работу любой схемы, состоящей из конечного числа взаимодействующих между собой реле, временных датчиков, счетных схем. На ПК осуществляются сбор и логическая обработка сигналов, поступающих от датчиков, конечных переключателей, кнопок, а также формирование команд позиционного управления объектом — включение и выключение различных исполнительных механизмов и т. п.

Основное отличие ПК от заменяемых ими электрических устройств управления обычного типа — построение не по схемному, а по программному принципу. Соответственно этому для автоматизации различных циклов не требуется индивидуального комплектования аппаратурой и монтажа соединений, необходимо лишь выбрать одно из стандартных исполнений ПК (требуемый набор блоков) по количественным параметрам (число входов и выходов) и задать программу, обеспечивающую исполнение нужного цикла работы. Обычно ПК имеют модульное построение, позволяющее наращивать число выходов и входов.

Другое существенное отличие ПК — исполнение их на современной элементной базе: интегральных схемах, запоминающих элементах, мощных полупроводниковых выходных элементах, что повышает надежность их работы, а также возможность стандартного исполнения ПК для станков с различными циклами.

Принцип программирования ПК достаточно прост. Каждая программная команда соответствует релейному входу, выходу или управляющей функции. Одна команда языка, как правило, представляет собой одну логическую связь. Программа, описывающая работу технологического процесса, является списком команд, которые выполняются последовательно и циклически. Язык программирования состоит из

15.2. Технические характеристики ПК некоторых типов (на 1990 г.)

| Тип | Фирма-изготовитель, страна | Максимальное число | | Выходные сигналы | Время сканирования 1К слов, мс |
|-------------|----------------------------|--------------------|----------|---|--------------------------------|
| | | входов | выходов | | |
| ПК | Россия | 256 | 256 | $U_{\sim} = 24 \text{ В}; I = 0,2 \text{ А};$ $U_{\sim} = 24 \text{ В}, I = 2 \text{ А}$ | 3 |
| PC-4000 | Bosch (Германия) | 256, 512 | 256, 512 | $U_{\sim} = 24 \text{ В}, I = 0,2 \text{ А}; U_{\sim} =$ $= 24 \text{ В}, I = 0,75 \text{ А}; U_{\sim} = 24 \text{ В},$ $I = 2 \text{ А}$ | 5,1 |
| FPC | Festo (Австрия) | 512 | 512 | $U_{\sim} = 20...50 \text{ В}, I = 2 \text{ А};$ $U_{\sim} = 20...50 \text{ В}, I = 1 \text{ А}$ | — |
| PLC-1774 | Allen Bradley (США) | 1024 | 1024 | $U_{\sim} \leq 220 \text{ В}, U_{\sim} \leq 120 \text{ В}$ | 2,5 |
| Fanuc-PC(A) | Fanuc (Япония) | 192 | 128 | $U_{\sim} = 30 \text{ В}, I = 200 \text{ мА};$ $U_{\sim} = 30 \text{ В}, I = 40 \text{ мА}$ | 30 |

целых чисел, обозначающих операнды (номера контактов реле, число тактов счета и времени), и имен операторов.

В табл. 15.2 приведены технические характеристики ПК некоторых типов.

Размерная информация в системах ЦПУ задается путевыми упорами на линейках 1 и 4 (см. рис. 15.7), закрепленных, например, на продольном 3 и поперечном 2 суппортах. При перемещении линеек упоры воздействуют на микропереключатели D_1 — D_n , выдающие сигнал об окончании обработки каждого этапа.

Точность срабатывания и остановки рабочего органа составляет $\pm 0,015 \text{ мм}$. В настоящее время применяют бесконтактные (индуктивные) путевые переключатели.

Рассмотренный способ задания УП в системах ЦПУ позволяет сократить время их переналадки по сравнению с временем переналадки ранее описанных систем управления. Трудоемкими остаются только установка и настройка путевых упоров. Однако их не надо каждый раз изготавливать заново (как кулачки и копиры), и настройку можно делать заранее вне станка, так как линейки выполняют съемными.

Задание размерной информации с помощью путевых упоров обуславливает дискретный способ управления (выдачу команд управления только в местах установки упоров). Управление перемещениями возможно только при их выполнении по прямолинейному циклу. Это значительно ограничивает технологические возможности станков с ЦПУ, а также может приводить к «нежесткости» цикла обработки ($T \neq \text{const}$), что затрудняет совмещение рабочих и вспомогательных ходов (например, на агрегатных станках с головками с гидроприводом).

15.2. Системы числового программного управления и варианты их построения

Числовым программным управлением (ЧПУ) металлорежущим станком (ГОСТ 20523—80) называют управление обработкой заготовки на станке по управляющей программе, в которой данные заданы в цифровой форме.

Под *системой ЧПУ* понимают совокупность функционально взаимосвязанных и взаимодействующих технических и программных средств, обеспечивающих числовое программное управление станком.

Основой системы ЧПУ является *устройство ЧПУ (УЧПУ)*, выдающее управляющие воздействия на исполнительные органы станка в соответствии с УП и информацией о состоянии управляемого станка. Для выполнения функций управления в состав УЧПУ должны входить следующие взаимосвязанные и взаимодействующие составные части: технические средства и программное обеспечение (системное, технологическое и функциональное).

Принципиальное отличие систем ЧПУ от ранее рассмотренных систем автоматического управления заключается в способе расчета и задания УП, а также ее передачи для управления рабочими органами станка.

В системах ЧПУ вся информация УП подготавливается и передается рабочим органам станка только в цифровой (дискретной) форме. Траектория движения режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки представляется в виде ряда его последовательных положений, каждое из которых определяется числом. Вся информация УП (размерная, тех-

| Объем ППЗУ | Временная задержка | Число счетчиков (их объем) | Число команд для программирования | Сложные логические команды | Мультиплексирование входов и выходов | Интерфейс |
|------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| 4K×16 | 0,08 с—3 ч | 128 ($N \leq 128$) | 64 | Есть | Есть | Выносной, встроенный |
| 4K×16 | 0,05—30 с | Набирается по программе | 16 | Нет | Нет | Встроенный |
| 16K×8 | 0,1 с—16,6 ч | 64 ($N \leq 256$) | 64 | Нет | Нет | Встроенный |
| 8K×16 | 0—999 с | 188 ($N \leq 999$) | 16 | Нет | Нет | Встроенный |
| 2K×16 | 50 мс—3276,7 с | 2 ($N = 1—9999$) | 34 | Есть | Только для связи с CNC | Встроенный |

нологическая и вспомогательная), необходимая для управления обработкой заготовки и представленная в текстовой или табличной форме с помощью символов (цифр, букв, условных знаков), кодируется и пробивается на восьми дорожковой перфоленте, записывается на магнитной ленте или вводится в память системы управления непосредственно с помощью клавиш на пульте управления или из ЭВМ верхнего уровня управления УЧПУ преобразует эту информацию в управляющие команды для исполнительных механизмов станка и контролирует их выполнение

По структуре построения различают УЧПУ двух видов аппаратные (типа NC — Numerical Control), программируемые (типа CNC — Computerized Numerical Control) В соответствии с этим различают аппаратные и программируемые системы ЧПУ, построенные на базе этих УЧПУ

Аппаратным УЧПУ называют устройство, алгоритмы работы которого реализуются схемным путем и не могут быть изменены после изготовления устройства Эти УЧПУ построены по принципу цифровой модели, где все операции, составляющие алгоритм работы, выполняются параллельно с помощью отдельных цепей или устройств (блоков), реализующих ту или иную функцию (агрегатно блочное построение) Поэтому изменять структуру этих УЧПУ можно только путем перепайки схем Дополнительные функции в таких УЧПУ должны предусматриваться заказчиком уже на стадии проектирования Ограничивается вмешательство оператора в отработку УП

В настоящее время в нашей промышленности применяют следующие основные типы аппаратных УЧПУ для токарных станков — «Кон

тур 2ПТ», Н22, для фрезерных станков — «Контур-3П», Н33, для координатно расточных станков — «Размер 2М», П33, для шлифовальных станков — Ш 111М, П 111, для электроэрозионных станков — «Контур 2П 67»

Описание аппаратных УЧПУ и их применение на различных станках приведены в работе [2]

Программируемым УЧПУ называют устройство, алгоритмы работы которого реализуются с помощью программ, вводимых в его память, и могут быть изменены после изготовления этого устройства

Принципиальным отличием программируемых УЧПУ от аппаратных является их структура, соответствующая структуре управляющей ЭВМ и включающая аппаратные средства и программное обеспечение (ПО), под которым понимают совокупность программ и документации на них для реализации целей и задач, выполняемых системой ЧПУ при управлении станком

В состав программируемой системы ЧПУ входит минимум одна микроЭВМ, основой которой является микропроцессор Он представляет собой цифровую БИС преимущественно монолитной структуры и реализует логические и арифметические операции Поэтому эти системы ЧПУ называют также микропроцессорными

Возможности программируемых систем ЧПУ зависят также от объема их запоминающих устройств (памяти) Эти системы могут иметь три типа запоминающих устройств

оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) с высоким быстродействием, допускающее считывание и запись информации в режиме реального времени RAM (Random access memory) Эти ОЗУ используются для временно-

15.3. Классификация программируемых УЧПУ станками (ГОСТ 21021 — 85)

| Признак | Класс УЧПУ | | | |
|---|---|---|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Число управляемых приводов координатных перемещений: всего одновременно управляемых число независимых групп приводов координатных перемещений | 1 — 3 До 3 — | 2 — 3 2 — 3 1 | 2 — 5 2 — 4 1 и 2 | 5 — 12 До 12 1 — 3 |
| Основной способ подготовки УП | У станка, непосредственно на пульте оператора | Вне станка на специальных средствах | У станка с помощью встроенных средств программирования | Различный, в зависимости от требований |
| Языки, представляемые пользователю: язык подготовки и редактирования УП | ИСО, типовые макрокоманды, параметрическое программирование | ИСО, макрокоманды, параметрическое программирование | ИСО и макрокоманды на уровне данных чертежа детали | Различный в зависимости от требований |
| язык формирования специальных подпрограмм и циклов | — | | Имеется | |
| язык программирования электроавтоматики станка | — | | Имеется | |
| Форма ввода и редактирования УП | Диалоговая жесткая | Покадровая с элементами диалога | Диалоговая гибкая | Имеется |
| Встроенные средства сервиса | Цифровые линейки или малый алфавитно-цифровой дисплей | Алфавитно-цифровой дисплей | Графический дисплей или алфавитно-цифровой дисплей | Имеется |
| Внешний программоноситель | Перфолента или мини-кассета | Перфолента или статическая память | | Перфолента, статическая память и другие носители |
| Число дискретных входов и выходов | — | Наращиваемое до 256 | | |
| Аналоговые входы и выходы, кроме управления приводами координатных перемещений | — | По заказу | | |

го хранения данных (УП, различных видов коррекций подач, частоты вращения шпинделя, радиуса и длины инструментов и др.) в ходе реализации УП;

постоянное программируемое запоминающее устройство (ПЗУ), только считываемое, не меняющее своего содержания в ходе нормальной работы УЧПУ и сохраняющее информацию при отключении электропитания — PROM (Programmable read — only memory). Применяется

для хранения программ функционирования (внутреннее программное обеспечение собственно микропроцессора и прикладное программное обеспечение УЧПУ) и постоянных данных. Кроме алгоритмов управления в постоянной памяти УЧПУ, как правило, хранятся и типовые, наиболее распространенные технологические циклы обработки, которые дополняются в каждом конкретном случае только цифровыми данными по перемещениям;

15.4. Перспективные показатели УЧПУ нового поколения, рекомендуемые на стадии формирования технического задания на их разработку

| Показатель | Класс УЧПУ | | | |
|---|------------|-------------|------------------------|------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Дискретность задания перемещений, мм | 0,01 | 0,01; 0,001 | 0,01; 0,001; 0,0001 | 0,01; 0,001; 0,0001 |
| Максимальное значение рабочей подачи, м/мин, при дискретности, мм: 0,01 — 0,001 до 0,0001 | 10 — | 25 — | 25 10 | 25 10 |
| Максимальное значение ускоренных перемещений, м/мин, при дискретности, мм: 0,01 — 0,001 до 0,0001 | 15 — | 30 — | 50 15 | 50 15 |
| Максимальный объем потребительского запоминающего устройства (для УП, циклов, параметров, констант), К байт | — | 125 | 500 | 2000 |
| Потребляемая мощность, кВт·А, не более | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 0,8 |
| Масса, кг, не более, исполнения: шкафное блочное | — 665 | 200 100 | 210 120 | 250 140 |

перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) — REPROM (Reprogrammable read — only memory). Содержание ППЗУ может быть изменено многократно. При этом при электрическом стирании памяти число циклов перепрограммирования составляет 10^4 — 10^5 , а при ультрафиолетовом стирании число циклов перепрограммирования не превышает 100.

Программируемые УЧПУ классифицируются по числу управляемых координат и соответственно объему интерфейса связи со станком: не более трех управляемых координат (например, 2У22, 2У32);

четыре — шесть управляемых координат (например, 2С42, «Микро-8С», «Fanuc 6М»);

более шести управляемых координат (например, 2С85, «Fanuc 9», «Sinumerik 8М»).

Наряду с однопроцессорными системами ЧПУ применяют мультипроцессорные системы, где каждый микропроцессор имеет свое функциональное назначение. Например, в системе ЧПУ, выполненной на четырех микропроцессорах, один микропроцессор выполняет управление ввода-вывода, включая программируемое адаптивное управление (согласующее устройство), второй рассчитывает траекторию перемещения и коррекции, третий осуществляет позиционирование и регулирование положения, четвертый работает с дисплеем и обеспечивает режимы индикации данных.

Мультипроцессорные системы ЧПУ позволяют реализовать ряд новых функций: вводить новую УП во время отработки на станке предыдущей УП, проводить диалоговое задание УП с графическим отображением на дисплее траек-

тории движения режущего инструмента. Применение этих систем ЧПУ значительно расширило число управляемых осей координат станка.

По совокупности признаков программируемые УЧПУ в соответствии с ГОСТ 21021—85 подразделяют на четыре класса. В пределах каждого класса УЧПУ станками подразделяют на различные технологические модификации. К первому классу относятся наиболее простые УЧПУ, предназначенные для автоматизированных станков с прямоугольным формообразованием. Второй класс образуют УЧПУ для станков, работающих в условиях среднесерийного производства и выпускаемых крупными сериями (токарные, фрезерные, многоцелевые и др.). К третьему классу относятся УЧПУ, применяемые на станках и гибких производственных модулях, работающие в условиях мелкосерийного и единичного производства. Четвертый класс наиболее сложных УЧПУ предназначен для комплектации тяжелых и уникальных станков и станочных модулей.

Параметры указанных групп УЧПУ приведены в табл. 15.3 и 15.4.

Первая серия отечественных УЧПУ реализована на двух специализированных микроЭВМ «Электроника НЦ-31» и «Электроника НЦ80-31». Последняя система обладает модульной структурой и позволяет увеличивать число управляемых координат наращиванием модулей, в том числе и ПК.

Другая серия УЧПУ выпускается на базе микроЭВМ «Электроника-60» и сводится практически к трем весьма близким модификациям УЧПУ типов 2Р22, 2С42 и 2С85.

УЧПУ типа «Электроника НЦ-31» предназ-

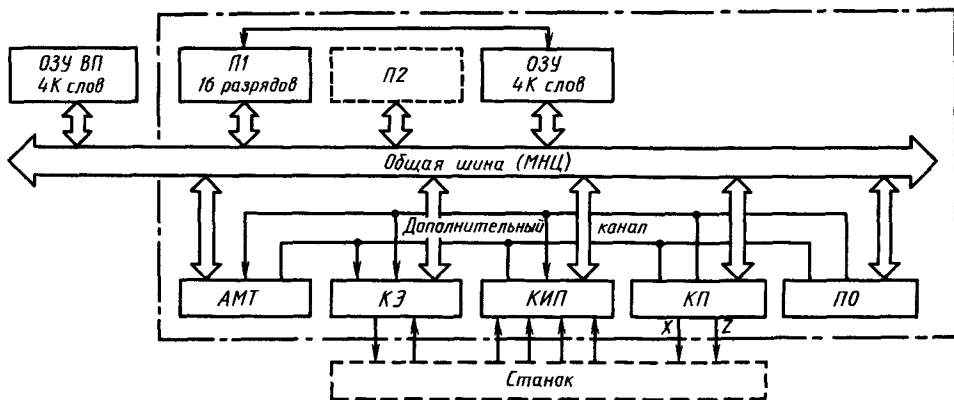


Рис. 15.8. Структурная схема УЧПУ «Электроника НЦ-31»:

МНЦ — магистраль типа «общая шина» микросистемных вычислительных средств ряда НЦ; П1, П2 — главный и вспомогательный процессоры, каждый с ПЗУ на 8К слов; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство на 4К слов; АМТ — адаптер магистрали МНЦ и программируемый таймер; КЭ — командоаппарат электроавтоматики станка; КИП — командоаппарат импульсных преобразователей угла поворота в код по осям X, Z, штурвала и шпинделя станка; КП — командоаппарат привода по осям X, Z станка; ПО — модуль пульта оператора; ОЗУ ВП — внешняя кассета памяти на 4К слов

начено главным образом для токарных станков (рис. 15.8). Оно встраивается в станок, обеспечивает контурное управление при следящем приводе подачи и импульсных измерительных преобразователях.

Ввод УП в данном УЧПУ может быть выполнен с клавиатуры УЧПУ, с кассеты электронной памяти и по каналу связи от ЭВМ верхнего уровня. Вычислительная часть УЧПУ состоит из процессора П1 (П2), ОЗУ (4К слов), адаптера магистрали и таймера. Базовое программное обеспечение заносится в масочное ПЗУ на этапе изготовления УЧПУ.

ПК электроавтоматики (16 входов и выходов) обеспечивает электрическое согласование сигналов между УЧПУ и электрооборудованием станка, а также осуществляет прерывание процессора при поступлении сигнала электроавтоматики. Программное обеспечение данного УЧПУ позволяет работать в режиме обучения.

Подробное описание этого УЧПУ приведено в работе [8].

Программируемые УЧПУ серии 2Р, 2С и 2М имеют ряд модификаций как в шкафом исполнении, так и с выносным дисплейным пультом, устанавливаемом на станке.

В качестве типового примера УЧПУ этой серии на рис. 15.9 показана структурная схема УЧПУ типа 2Р32.

Центральный процессор 5 через шинный согласователь связан каналом (типа общей шины) с остальными модулями УЧПУ. Канал состоит из 39 линий связи, из которых 16 служат для передачи адреса и данных. Управление каналом выполняется центральным процессором (быстродействие примерно 250 тыс. опера-

ций/с). К каналу присоединены модуль запоминающего устройства П1, модуль связи с пультом 3 оператора и дисплеем, модули связи 16 и 17 соответственно приводов подачи и привода главного движения, модуль связи 15 с ИП обратной связи, модуль 10 ввода-вывода сигналов управления электроавтоматики станка.

Хотя в состав большинства УЧПУ этой серии входит фотосчитывающее устройство, УП может целиком храниться в памяти. Поэтому в процессе работы станка считывание УП с перфоленты не производится. В некоторых модификациях УЧПУ данной серии (например, 2С42-65, 2Р32М) имеется блок связи с ЭВМ верхнего уровня, что позволяет использовать эти УЧПУ в составе гибких производственных систем.

Системы ЧПУ серии 2С, построенные на основе УЧПУ типа 2С42, предназначены для управления станками со следящим приводом подачи и с индуктивными (типа индуктосин или резольвер) или фотоэлектрическими импульсными ИП. Подробнее описание УЧПУ этой серии приведено в [14, 15].

Примером мультипроцессорного УЧПУ является УЧПУ серии «Электроника МС 2101».

В зависимости от типа управляемого станка и задач управления в состав УЧПУ «Электроника МС 2101» входят два-три блока, каждый из которых имеет отдельную микроЭВМ.

Первый дисплейный блок (микроЭВМ «Электроника МС 12401.1») предназначен для управления устройством ввода-вывода, хранения, обработки и отображения информации и передачи ее в другой блок. Через этот блок оператор осуществляет связь с системой управления. Объем основной памяти этого блока

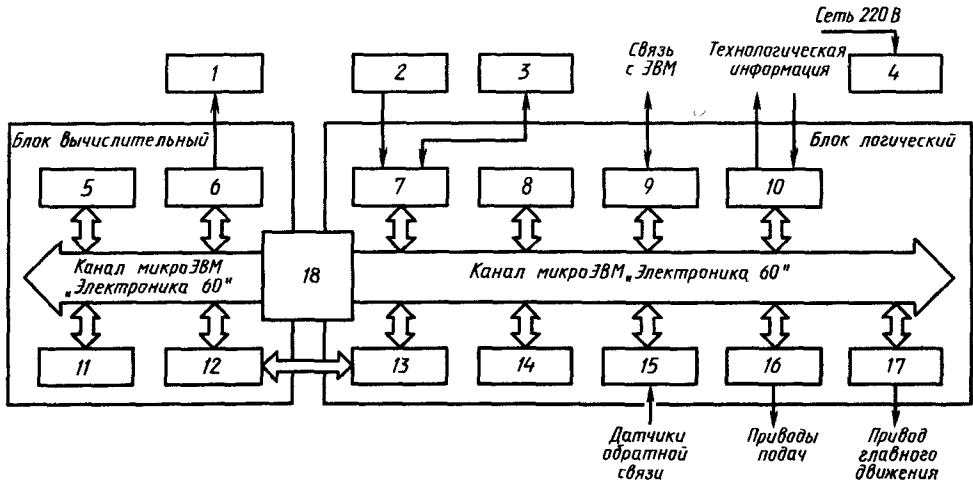


Рис. 15.9. Структурная схема УЧПУ типа 2P32:

1— ленточный перфоратор; 2— фотосчитывающее устройство; 3— пульт оператора; 4— аппаратура электропитания, включения и вентиляции; 5— центральный процессор; 6— устройство управления; 7— интерфейс пульта оператора; 8— модуль умножения (если привод шаговый); 9— интерфейс ЭВМ; 10— ввод (вывод) технологической информации; 11— специальное постоянное запоминающее устройство; 12— согласователь шинный; 13— модуль обмена; 14— модуль ОЗУ; 15— модуль связи с ИП; 16— модуль управления приводами подачи, 17— модуль управления приводами главного движения; 18— адаптер

56К байт, внутренней памяти на цифровых магнитных доменах (ЦМД)—32К байт. Кроме того, к нему подключается кассета внешней памяти на ЦМД, обеспечивающая сохранение информации.

Второй блок (микроЭВМ «Электроника НМС 12402.1») предназначен для управления приводами подачи рабочих органов и электроавтоматикой станка.

Первый блок УЧПУ устанавливают на станке со стороны оператора, а второй встраивают в станок или в шкаф электрооборудования.

Подробное описание данного УЧПУ приведено в работах [8, 14].

Основные характеристики УЧПУ типа 2С42

| | |
|---|--|
| Число управляемых координат | До 8 (одновременно — в зависимости от ПО, но не более 4) |
| Число цифроаналоговых преобразователей для управления приводом (выход ± 10 В) | 8 |
| Число входов (выходов) для управления электроавтоматикой | 160 (64), в том числе входов с прерыванием 24 |
| Число каналов ввода аналоговых сигналов | 2 |
| Вместимость дисплея | 16 строк по 32 символа |

| | |
|---|---|
| Вид постоянных циклов | С81—С89 (расширение при изменении ПО) |
| Дискретность задания перемещений | 0,01 или 0,001 мм; 0,01° или 0,001° |
| Максимальная скорость подачи, м/мин: | |
| рабочей | 5 |
| ускоренного хода | 15 |
| Максимальное программируемое перемещение по координатам, мм | 9999,999 |
| Объем памяти, К байт: | |
| ОЗУ | 48 (в том числе 8К байт с автономным питанием и сохранением информации в течение 120 ч) |

| | |
|---|----------|
| ППЗУ (с ультрафиолетовым стиранием) | 48 |
| Коррекция на радиус и длину инструмента (две коррекции в одной УП на один инструмент), мм | 999,999 |
| Число пар коррекций | 99 |
| Максимальное смещение нуля отсчета по каждой координате, мм | 9999,999 |
| Параметры цифроаналогового преобразователя для управления приводом: | |

| | |
|---|-------|
| диапазон преобразования | 10000 |
| погрешность преобразования, %: | |
| 5 мВ—10 В | 3 |
| 1—5 мВ | 10 |
| 0—1 мВ | 50 |
| Параметры аналого-цифрового преобразователя (входы от датчиков контроля): | |
| диапазон преобразования | 1024 |
| погрешность преобразования, дискреты, %: | |
| 0—80 мВ | 2 |
| 80 мВ—10 В | 4 |

Примечание. ПО предусматривает следующие дополнительные режимы: выход рабочего органа в нулевую точку станка; возврат на траекторию перемещения; цикл разгона и торможения; зеркальная обработка УП; коррекция рабочих подач; компенсация зазоров и накопленных погрешностей; измерение заготовки и коррекция УП.

За рубежом УЧПУ выпускают как специализированные [например, Bosch, Siemens, Heidenhain, IBN (Германия), General Electric, Allen Bradley (США), Fanuc (Япония), OSAI (Италия), NUMSA (Франция), Philips (Голландия)], так и станкостроительные [например, Index, Traub, Gildemeister, Deckel; Maho, Boehlinger (Германия), Okuma, Yamazaki (Япония), Cincinnati Milacron (США), Matra-Maurhin (Франция)] фирмы.

В нашей промышленности наиболее широкое применение получили УЧПУ, выпускаемые фирмами Siemens, Bosch, Fanuc, а также другими фирмами.

Фирма Siemens разработала гамму УЧПУ типа Sinumerik, включающую в себя УЧПУ восьми моделей, отличающихся функциональными возможностями и соответственно стоимостью.

Наиболее простыми являются УЧПУ мод. Primo S и Primo SG (применяется, в частности, для управления шлифовальными станками).

Для небольших и средних металлорежущих станков широко применяют УЧПУ мод. 810 и 820. УЧПУ мод. 820, являющееся модификацией УЧПУ мод. 810, имеет большие функциональные возможности в отношении подготовки УП. Оно оснащено двенадцатидюймовым цветным дисплеем. Эти и последующие модели УЧПУ выпускают в двух основных вариантах: с индексом TE (например, мод. 810TE) — для токарных станков, и с индексом ME (например, мод. 850ME) — для фрезерных и многоцелевых станков.

УЧПУ мод. 810 размещено в одном корпусе (панель управления, микроЭВМ устройства и

встроенный ПК). Панель управления имеет монохроматический девятидюймовый дисплей, панель индикации состояний работы и контроля, панель с кнопками адресов, чисел и функций, встроенный пульт управления станком.

Микропроцессорная часть управления содержит до пяти измерительных контуров, имеет контурное управление по двум координатам (мод. 810TE), две встроенные вспомогательные координаты (например, для управления инструментальной револьверной головкой или загрузочным устройством), управление шпинделем, память для УП на 48К байт и для стандартных циклов на 128К байт.

Встроенный ПК содержит память для прикладных программ на 1000 команд, имеет 128 входов и 64 выхода.

Данное УЧПУ обеспечивает скорость рабочей подачи до 15 м/мин и скорость вспомогательного хода до 24 м/мин при дискретности 0,001 мм.

УЧПУ мод. System 3TE фирмы Siemens имеет управление по трем осям (X, Z и C), линейную и круговую интерполяцию любых двух осей, винтовую и цилиндрическую интерполяцию и широкие технологические возможности. В максимально расширенном варианте вместимость памяти этого УЧПУ достигает 128К байт, оно имеет 9999 адресуемых программ и 999 адресуемых подпрограмм. В памяти одновременно могут храниться максимум 200 главных программ и подпрограмм.

УЧПУ мод. System 8, а также мод. 850 и 880 относятся к устройствам с большими функциональными возможностями. УЧПУ мод. 850 и 880 применяют также для управления гибкими производственными модулями. УЧПУ мод. System 8 имеет вместимость памяти для УП в максимальном варианте до 256К байт, а УЧПУ мод. 850 и 880 — соответственно 1152К байт и 1280К байт. Число управляемых осей, включая шпиндели, соответственно для этих УЧПУ 11, 12 и 30 при числе программируемых шпинделей соответственно 1, 4 и 6.

Фирма Bosch выпускает УЧПУ типа Alpha (Alpha 2 и Alpha 3), Micro (Micro 5Z, Micro 8) и CC (CC100, CC200 и CC300).

УЧПУ мод. Alpha 2 с управлением по двум осям предназначено для токарных станков. В качестве дополнительного устройства оно имеет графическое программирующее устройство мод. PEG, позволяющее проводить программирование непосредственно у станка в процессе обработки. УЧПУ мод. Alpha 3 имеет три и более управляемых оси и предназначено для фрезерных, токарных и других станков. Обе модели УЧПУ типа Alpha имеют компактную конструкцию с десятидюймовым дисплеем, устанавливаемым непосредственно на станке.

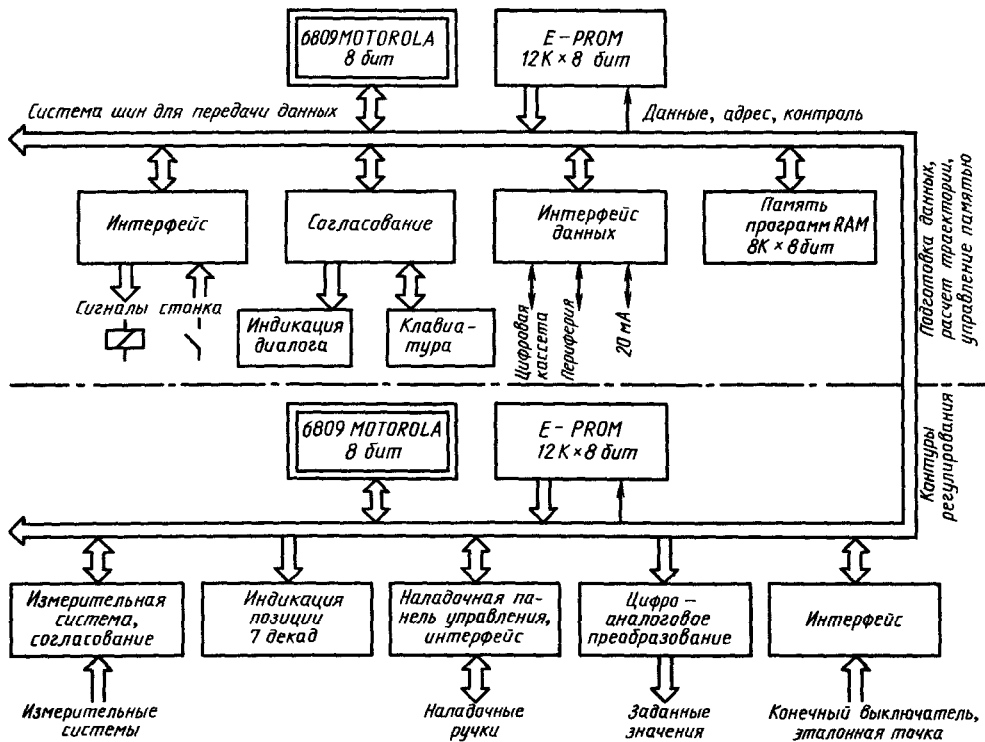


Рис. 15.10. Структурная схема УЧПУ типа Alpha фирмы Bosch (Германия)

Упрощенная структурная схема УЧПУ данного типа показана на рис. 15.10. Применение двух микропроцессоров (тип 6809 Motorola) благодаря внутреннему распределению функций обеспечивает высокую скорость обработки данных: УЧПУ позволяет проводить программирование в режиме диалога. Обеспечивается прямое программирование частот вращения шпинделя, скорости подачи, достигается постоянная скорость резания.

УЧПУ мод. Micro 5Z имеет управление по трем-четырем осям, а мод. Micro 8 по трем-шести осям. Объем памяти первого УЧПУ 40К байт, а второго — 124К байт. Из памяти УЧПУ мод. Micro 8 можно вызывать 100 разных программ.

УЧПУ мод. CC100T предназначено для управления токарными станками (управление по двум — четырем осям). Панель управления — с десятидюймовым дисплеем, память — вместимостью 128К байт. УЧПУ может запоминать 99 программ, 39 циклов, 24 коррекции на инструмент, 7 смещений нуля. Встроенный ПК имеет 128 входов и 80 выходов, 8 таймеров и 8 счетчиков. Имеются разветвленный контроль и диагностирование УЧПУ, механизмов станка и инструментов.

УЧПУ мод. CC200T обеспечивает управление по двум — семи осям. Оно имеет двенадцатидюймовый монохромный или четырнадцатидюймовый цветной дисплей. Встроенный ПК имеет 384 входа и 328 выходов, 32 таймера и 8 счетчиков.

УЧПУ мод. CC300 имеет управление по восьми осям и применяется для управления станками, гибкими производственными модулями и системами. Объем памяти для УП 64К байт и может увеличиваться до 320К байт.

УЧПУ мод. System 10TF, System 0, System 0T фирмы Fanuc характеризуются широкими функциональными возможностями (до 18 управляемых осей). Наличие цветного дисплея обеспечивает графическое изображение при составлении и обработке программ, существенно упрощается программирование, а свободный доступ к программному обеспечению способствует более полному использованию технологических возможностей станка.

Фирмы Fanuc и General Electric создали совместно УЧПУ мод. System 15 на базе двух 32-разрядных микропроцессоров (тип 68020 Motorola). Достоинствами данного устройства являются большая вычислительная мощность, обеспечение высоких скоростей перемещений ра-

15.5. Характеристики некоторых программируемых УЧПУ (на 1990 г.)

| Характеристики | СССР | | |
|---|--------------------|-------------------------------------|--------------------|
| | 2У32-61 | 2С85-61 | НЦ-80-31 |
| МикроЭВМ | НЦ-03Т | «Электроника-60»—2 шт. | НЦ-80—3 шт. |
| Разрядность микроЭВМ | 16 | 16 | 16 |
| Память для системного ПО: | | | |
| тип | ОЗУ ^{III} | ПЗУ | ПЗУ |
| вместимость, К байт | 128 | 80 | 60 |
| Память для УП: | | | |
| тип | ОЗУ ^I | ОЗУ ^I +ОЗУ ^{II} | ОЗУ ^{III} |
| вместимость, К байт | 64 | 96+16 | 48 |
| Число управляемых осей общее (одновременно управляемых) | 3(3) | 8(5) | 8(8) |
| Число двухпозиционных входов (выходов) | 192(192) | 192(192) | 512(256) |
| Максимальная скорость рабочая (позиционирования), м/мин | 6(15) | 5(9,6) | 15(15) |
| Габаритные размеры, см | 185×70×70 | 188×70×70 | 135×48×70 |

| Характеристики | Германия | | Италия | Япония |
|---|---------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| | Siemens Sprint 8 ME | Bosch Micro 8 | Vector-80 | Fanuc 7M |
| МикроЭВМ | — | — | — | — |
| Разрядность микроЭВМ | 32 | 32 | 32 | 32 |
| Память для системного ПО: | | | | |
| тип | ППЗУ | ППЗУ | ППЗУ | ППЗУ |
| вместимость, К байт | 32 | 32 | 32 | 24 |
| Память для УП: | | | | |
| тип | ЗУ на ЦМД | ЗУ на МЛ | ОЗУ ^{III} | ОЗУ ^{III} |
| вместимость, К байт | 16 | 100 | 320 | 16 |
| Число управляемых осей общее (одновременно управляемых) | 9(4) | 6(3) | 8(5) | 6(2) |
| Число двухпозиционных входов (выходов) | 256(256) | 512(512) | — | 512(512) |
| Максимальная скорость рабочая (позиционирования), м/мин | 2,5(15) | 2,5(10) | 5(10) | 2,5(10) |
| Габаритные размеры, см | 50×40×30 | 60×80×80 | 170×80×80 | 140×80×60 |

Примечание. В зависимости от возможности энергонезависимого хранения информации ОЗУ разделены на три группы: ОЗУ^I — без сохранения информации при отключении питания; ОЗУ^{II}, ОЗУ^{III} — с возможностью сохранения информации в течение соответственного 72 и 1000 ч (ЦМД — цилиндрические магнитные домены, МЛ — магнитная лента).

бочих органов (до 100 м/мин при дискретности ИП 0,001 мм и до 24 м/мин при дискретности ИП 0,0001 мм), возможность программирования на языках высокого уровня (Pascal, Ladder и др.), возможность графического отображения процесса обработки на цветном дисплее, наличие резервной зоны памяти объемом до 256К байт для удовлетворения дополнительных запросов потребителя.

Также на базе двух 32-разрядных микропроцессоров разработано УЧПУ мод. Mazatrol

М-32 фирмы Jamazaki. Оно обеспечивает быстрое действие до 1,2 млн. операций/с, цифровое управление электродвигателями переменного тока в приводах главного движения и приводах подач, объем памяти 4М байт. Возможны выполнение посредством программного обеспечения функций «искусственного интеллекта», а также стыковка с центральной ЭВМ [через аппаратные средства, совместимые с Manufacturing Automation Protocol (MAP)].

Совместно разработанное фирмами Allen

Bradley и OSAI УЧПУ мод. 8600 построено по модульному принципу, что позволяет оптимально подбирать требуемые для каждого случая функции, упрощает диагностирование. Возможна синхронная обработка пяти УП, каждая из которых может управлять по 16 осям, включая позиционирование шпинделя. Программирование осуществляется на языке высокого уровня (Basic, Pascal и др.), объем памяти (на твердом диске) достигает 10М байт. Возможны связь с операционными системами, добавление специальных меню и циклов к программному обеспечению, пакетов программ САПР и АСУТП, обеспечение с помощью протоколов MAP связи с ЭВМ верхнего уровня, генерации информационных сводок и др.

Характеристики некоторых отечественных и зарубежных УЧПУ приведены в табл. 15.5.

Системы ЧПУ станками выполняют с управлением приводами подач без обратной связи (разомкнутыми) и с обратной связью (замкнутыми) (см. гл. 12).

Замкнутые системы ЧПУ имеют обратную связь по положению управляемого рабочего органа станка, основой которой является ИП, служащий средством измерений, предназначенным для преобразования линейных или круговых (угловых) перемещений в электрический сигнал. Этот сигнал далее преобразуется в сигнал, содержащий измерительную информацию о величине и направлении перемещения в форме, соответствующей действующим стандартам на системы ЧПУ и устройства цифровой индикации.

В соответствии с ГОСТ 26242—84 по виду входной физической величины ИП подразделяются на ИП линейных перемещений и ИП угловых (круговых) перемещений. По физическому принципу эквивалентного преобразования различают следующие ИП: волновые, емкостные, индукционные и индуктивные, локационные, потенциометрические, фотоэлектрические и оптоэлектронные, электромагнитные.

Информативными параметрами входных сигналов ИП являются следующие: положение подвижного элемента ИП, задаваемого исполнительным механизмом станка по отношению к неподвижному элементу ИП; комбинации функционально связанных между собой электрических сигналов, тождественных положению исполнительного механизма станка.

Установлено девять классов точности ИП. В соответствии с ГОСТ 26242—84 предел Δ_d допустимого значения погрешности ИП при температуре 293 К (20 °С) и при отклонении ее в зависимости от класса точности ИП не должен превышать значений, указанных в табл. 15.6.

Предельную погрешность ИП принимают как наибольшее отклонение от действительного значения между двумя любыми точками (максимальная зона погрешностей) во всем интервале перемещений. При этом должны быть исключены дискретность и погрешность устройства, с которыми ИП проверяются или работают. В предельные погрешности ИП, указанные в табл. 15.6, входят все разновидности систематических погрешностей, свойственные ИП конкретного типа, и их случайные составляющие.

На практике наибольшее применение получили следующие разновидности линейных и круговых ИП: сельсины, индуктосины, фотоэлектрические ИП со штриховыми мерами и др. В последнее время в связи с уменьшением дискретности систем ЧПУ до 0,001—0,0001 мм в качестве ИП начали применять лазерные интерферометры. В табл. 15.7 приведены технические характеристики некоторых типов ИП. Подробнее конструкции ИП описаны в работах [2, 19].

Уровень современных систем ЧПУ в значительной степени определяется их программным обеспечением. Его объем может составлять от 8—20К байт для простых систем ЧПУ до 0,5—1,5М байт для сложных многокоординатных систем ЧПУ [14].

ПО строится по блочно-модульному принципу с максимально независимыми модулями и обеспечением их универсальности с точки зрения применимости к различным видам станков.

15.6. Пределы допускаемого значения погрешности перемещения Δ_d

| Класс точности | Предел допустимого значения погрешности перемещений Δ_d | | Допустимое отклонение температуры от 293 К |
|----------------|--|----------------|--|
| | угловых, " | линейных, мкм | |
| 1 | 1,0 | 0,5 + 1,2L | ± 0,2 |
| 2 | 2,0 | 1,0 + 2,5L | ± 0,2 |
| 3 | 5,0 | 2,0 + 4,5L | ± 0,5 |
| 4 | 15,0 | 5,0 + 8,0L | ± 1,0 |
| 5 | 30,0 | 10,0 + 15,0L | ± 2,0 |
| 6 | 60,0 | 20,0 + 30,0L | ± 2,0 |
| 7 | 150 | 40,0 + 50,0L | ± 5,0 |
| 8 | 300 | 80,0 + 100,0L | ± 5,0 |
| 9 | 600 | 150,0 + 200,0L | ± 5,0 |

Примечания: 1. L — длина преобразуемого перемещения, м.

2. Класс точности ИП выбирают, исходя из технических параметров оборудования и требований заказчика.

15.7. Технические характеристики ИП некоторых типов

| Тип ИП | Дискретность в комплекте с УЧПУ | Максимальное контролируемое перемещение, м | Максимальная скорость (частота вращения) контролируемого перемещения | Шаг меры | Габаритные размеры, мм |
|---|---------------------------------|--|--|----------|---------------------------------------|
| Круговой импульсный фотоэлектрический типа ВЕ-178 | 1/100 — — 1/2500 об. | Не ограничивается | 24 м/мин | 1 об. | ∅ 57 × 93 |
| Линейный индуктосин типа ДЛП | 0,001 мм | 3,5 | 20 м/мин | 2 мм | Головки 100×73×9,8 меры 250×58×9,5 |
| Круговой индуктосин типа ПКИ | 0,36' | Не ограничивается | 30 мин ⁻¹ | 1/180 об | Статора ∅ 178×8, ротора ∅ 148×8 |
| Резольвер типа ПМБ-1 | 0,01 мм | То же | 3000 мин ⁻¹ | 1 об. | ∅ 88×66 |
| Бесконтактный сельсин типа БС-155 | 3,6' | » | 2500 мин ⁻¹ | 1 об. | ∅ 48×73 |
| Линейный растровый | 0,005 мм | 3,04 | 48 м/мин | 0,02 мм | — |
| Круговой растровый | 1/360 — — 1/3600 об. | Не ограничивается | До 1200 мин ⁻¹ | — | — |

ПО в общем виде состоит из двух частей. Первая часть — системное (базовое) ПО, которое является общим для различных типов станков. Эта часть разрабатывается заранее путем выделения основных задач управления различными станками и разработки законченных (стандартных) программных модулей для их решения. В его состав входят, например, программные модули интерпретатора УП, управления электроавтоматикой станка и другие модули. Поэтому разработка этой части ПО для конкретного станка с ЧПУ сводится к выбору и использованию уже имеющихся стандартных программных модулей.

Вторая часть ПО определяется задачами управления конкретным станком с ЧПУ и является его нестандартной частью. Она включает в себя технологическое ПО, ориентированное на определенную группу станков, и функциональное ПО, относящееся к конкретному станку. Эта часть ПО является очень важной, так как при ее разработке реализуются конкретные задачи получения заданной производительности станка и качества изготовления деталей.

ГОСТ 21021—85 регламентирует для системного, технологического и функционального ПО технические характеристики. Номенклатура и значения данных характеристик указывают в технических условиях на УЧПУ конкретного типа.

Подробнее вопросы содержания и разработки ПО рассмотрены во втором томе данного справочника, а также в работах [10, 14].

УЧПУ относятся к обслуживаемым и восстанавливаемым изделиям с циклическим режимом работы и проведением регламентационных ра-

бот. Значения количественных показателей надежности УЧПУ устанавливает ГОСТ 21021—85, а критерии отказов и способы их устранения — технические условия на УЧПУ конкретного типа.

Отказом УЧПУ считается нарушение его работоспособного состояния в течение непрерывной работы, не устраняемое перезапуском (повторным включением) УЧПУ. Под отказом УЧПУ не следует понимать незапланированный останов отработки УП, вызванный внешними факторами.

При отказах УЧПУ должно быть обеспечено срабатывание средств защиты с последующим автоматическим (полуавтоматическим) возобновлением работы.

УЧПУ должны подвергаться испытаниям на надежность с периодичностью и в объеме, установленном в нормативно-технической документации на УЧПУ конкретного типа не реже одного раза в три года.

ГОСТ 21021—85 устанавливает следующие значения показателей надежности УЧПУ:

наработка на отказ $T_o \geq 10000$ ч при работе в составе ГПС, на уникальных и прецизионных станках, $T_o \geq 5000$ ч при работе в автономных станках с ЧПУ;

установленная безотказная наработка T_y , которая указывается в технических условиях на конкретное УЧПУ, исходя из периодичности регламентационных работ;

коэффициент технического использования $K_{т.и} \geq 0,96$;

среднее время восстановления $T_v \leq 30$ мин;

средний срок службы $T_{сл} \geq 14$ лет;

установленный срок службы $T_p \geq$ блет.

15.3. Подготовка и расчет управляющих программ для систем автоматического управления станками

Изготовление детали представляется как перенос информации, содержащейся в чертеже детали, на заготовку. При этом информация многократно преобразуется, пополняется и уточняется. В результате на определенном этапе формируется информация, детально описывающая работу металлорежущего станка при выполнении отдельных операций технологического процесса. Эта информация и является УП.

До функционирования системы автоматического управления имеется совокупность сведений о детали, заготовке, режущих инструментах, технологическом оборудовании и условиях обработки, содержащихся в чертежах, технических условиях, нормалах, паспортах, которая в сумме представляет собой общую начальную информацию (рис. 15.11).

Из общей начальной информации выделяется необходимая начальная информация, на основе которой разрабатывают в составляют УП, вводимую с помощью программносителя в систему управления. Часть начальной информации переносят в операционную технологическую карту и используют для выбора и настройки технологического оборудования, оснастки, режущих инструментов.

При расчете, составлении и проектировании УП и программносителей (программирование) выполняется комплекс работ, которые разделяются на три этапа: 1) технологическая подготовка УП; 2) расчет необходимой цифровой информации и заполнение соответствующих таблиц; 3) проектирование и изготовление программносителей (кулачков и копиров), составление схемы расстановки упоров, кодирование и запись информации на перфоленте, магнитной ленте и др.

Для систем управления с РВ, копировальных систем управления и частично для систем ЦПУ основным документом, на основе которого проектируют необходимые программносители, а

после их изготовления осуществляется наладка автомата или полуавтомата на изготовление заданной детали, является карта наладки.

На первом этапе выполняют весь комплекс работ по технологической подготовке УП, включающий в себя выбор автомата или полуавтомата, выбор заготовки, разработку технологических переходов обработки заготовки, подбор и расстановку на рабочих органах станка необходимых режущих инструментов, расчет и выбор режимов обработки, подбор державок и вспомогательной оснастки. Все полученные данные заносят в карту наладки.

На втором этапе на основе разработанных технологических переходов процесса обработки заготовки выполняют комплекс работ, связанных с расчетом цифровой информации, необходимой для определения получаемого цикла работы, цикловой производительности, для последующего проектирования кулачков, копиров, составления схемы расстановки упоров, а также используемой непосредственно при наладке автомата или полуавтомата. Все полученные данные заносят в таблицу карты наладки. В конце этого этапа строят циклограмму работы автомата или полуавтомата.

На третьем этапе на основе рассчитанной информации, занесенной в таблицу карты наладки, проектируют и вычерчивают рабочие чертежи всех кулачков или копира, изготавливают их, а также составляют схему расстановки упоров, воздействующих на конечные электрические выключатели или гидравлические золотники системы управления автомата или полуавтомата.

Подробное описание процесса подготовки и расчета УП, проектирования и изготовления программносителей для указанных выше систем автоматического управления, а также вопросы наладки автоматов и полуавтоматов с этими системами управления изложены в работах [5, 11, 17, 21].

В станках с ЧПУ значительно возросли сложность технологических задач и трудоемкость составления и расчета числовой УП в связи с необходимостью точного определения траектории движения инструмента в системе коор-

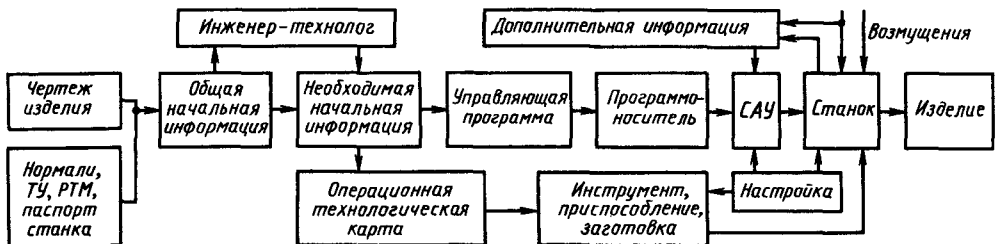
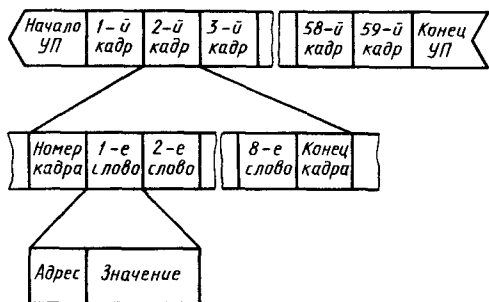


Рис. 15.11. Структурная схема передачи и преобразования информации при управлении станком



G 01 — линейная интерполяция
 X 126.4 } — числовые значения
 Y .5 }
 F 170 — подача
 S 1200 — частота вращения шпинделя
 T 14 } — смена инструмента с установкой
 M 06 } в шпиндель инструмента №14

Рис. 15.12. Порядок записи УП на перфоленту

динат станка, а также увязки исходной точки обработки с положением заготовки и др.

В ГОСТ 20523—80 даны понятия нулевой, исходной и фиксированной точек станка. Нулевой

точкой станка с ЧПУ является точка, принятая за начало системы координат станка. Исходная точка — это точка, определенная относительно нулевой точки станка и используемая для начала работы по УП. Ее выбирают на станке, исходя из условия минимальных значений вспомогательных ходов, обеспечения удобства и безопасности смены инструмента, а также удобства закрепления заготовки на станке. Фиксированная точка станка — это точка, определенная относительно нулевой точки станка и используемая для определения положения рабочего органа станка.

В ГОСТ 20523—80 приведены также понятия точки начала обработки, нулевой точки детали и плавающего нуля.

Точка начала обработки — это точка, определяющая начало обработки конкретной заготовки. Точку на детали, относительно которой заданы ее размеры, называют нулевой точкой детали. Плавающий нуль — это свойство системы ЧПУ (УЧПУ) помещать начало отсчета перемещения рабочего органа в любое положение относительно нулевой точки станка.

Структуру УП, ее формат, а также правила кодирования информации УП, записывае-

15.8. Значения управляющих символов и знаков

| Символ | Наименование | Значение |
|--------|-----------------------|---|
| ГТ | Табуляция | Символ, управляющий перемещением действующей позиции печати в следующую, заранее определенную знаковую позицию на той же строке. Предназначен для управления устройствами печати при распечатке УП, УЧПУ не воспринимается |
| ПС | Конец кадра | Символ, обозначающий конец кадра УП |
| % | Начало программы | Знак, обозначающий начало УП (используется также для остановки носителя данных при обратной перемотке) |
| (| Круглая скобка левая | Знак, обозначающий, что следующая за ним информация не должна обрабатываться на станке |
|) | Круглая скобка правая | Знак, обозначающий, что следующая за ним информация должна обрабатываться на станке |
| + | Плюс | Математический знак |
| — | Минус | Математический знак |
| . | Точка | Десятичный знак |
| / | Пропуск | Знак, обозначающий, что следующая за ним информация до первого символа «Конец кадра» может обрабатываться или не обрабатываться на станке (в зависимости от положения органа управления на пульте управления УЧПУ). Когда этот знак стоит перед символами «Номер кадра» и «Главный кадр», распространяется на целый кадр УП |
| : | Главный кадр | Знак, обозначающий главный кадр УП |

Примечания: 1. В таблицу не включены управляющие символы ВК, ПР, ЗБ, ПУС, не воспринимаемые УЧПУ.

2. При печатании машинописного бланка УП (распечатка программы) символы «Табуляция» и «Конец кадра» не печатаются.

мой на носители данных (перфоленту, магнитную ленту, магнитный диск) или вводимой с дистанционного источника информации (например, ЭВМ высшего ранга), и требования к технической документации на УЧПУ устанавливает ГОСТ 20999—83 В соответствии с этим ГОСТом УП записывается на носитель данных в виде последовательности кадров (рис 15 12) Под *кадром УП* понимают составляющую часть УП, вводимую и обрабатываемую как единое целое и содержащую не менее одной команды Кадр УП, содержащий все данные, необходимые для возобновления обработки заготовки после ее перерыва, называют главным кадром Он обозначается специальным символом (табл 15 8)

Каждый кадр состоит из слов, расположенных в определенном порядке Под *словом* понимают составляющую часть кадра, содержащую данные о параметре процесса обработки заготовки и (или) другие данные по выполнению управления Слово в начале кадра, определяющее последовательность кадров в УП, называют *номером кадра* Номер кадра задается адресом *N* и целым десятичным числом В главном кадре вместо адреса *N* записывают символ « »

Часть слова УП, определяющая назначение следующих за ним данных, содержащихся в этом слове, называют *адресом* Значения символов адресов установлены ГОСТ 20999—83 и приведены ниже

| | |
|----------|---|
| A, B и C | Углы поворота соответственно вокруг осей <i>X, Y, Z</i> |
| D | Вторая функция инструмента |
| E | Вторая функция подачи |
| F | Первая функция подачи |
| G | Подготовительная функция |
| H | Не определен |
| I, J, K | Параметры интерполяции или шаги резьбы соответственно параллельно осям <i>X, Y, Z</i> |
| L | Не определен |
| M | Вспомогательная функция |
| N | Номер кадра |
| O | Не определен |
| P, Q | Третичные длины перемещений, параллельных соответственно осям <i>X, Y</i> |
| R | Перемещение на быстром ходу по оси <i>Z</i> или третичная длина перемещения, параллельного оси <i>Z</i> |
| S | Функция главного движения |
| T | Первая функция инструмента |
| U, V, W | Вторичные длины перемещений, параллельных соответственно осям <i>X, Y, Z</i> |
| X, Y, Z | Первичные длины перемещений, параллельных соответственно осям <i>X, Y, Z</i> |

Если символы A, B, C, D, E, P, Q, R, U, V, W не используются в значениях, указанных выше,

они становятся неопределенными и могут быть использованы для специальных значений

Каждая УП должна начинаться символом «Начало программы», а заканчиваться символом «Конец программы» (см рис 15 12) Каждый кадр УП должен содержать слово «Номер кадра», информационные слова или слово и символ «Конец кадра» (см табл 15 8)

Информационные слова в кадре рекомендуются записывать в следующей последовательности слово (или слова) «Подготовительная функция»,

слова «Размерные перемещения» в следующей последовательности символов *X, Y, Z, U, V, W, P, Q, R, A, B* и *C*,

слова «Параметр интерполяции или шаг резьбы» *I, J* и *K*,

слово (или слова) «Функция подачи» Если это слово относится только к определенной оси координат, то оно должно следовать непосредственно за словом «Размерное перемещение» При отношении к двум и более осям оно должно следовать за последним словом «Размерное перемещение», к которому оно относится,

слово «Функция главного движения»

слово (или слова) «Функция инструмента»,

слово (или слова) «Вспомогательная функция»

Слово «Подготовительная функция» определяет режим работы УЧПУ Эти слова задаются адресом *G* с двузначным десятичным числом

Все размерные перемещения следует задавать в абсолютных значениях или приращениях Способ управления нужно выбирать одним из следующих слов «Подготовительная функция» *G90*— «Абсолютный размер», *G91*— «Размер в приращениях»

Все линейные перемещения должны быть выражены в миллиметрах и их десятичных долях, а угловые размеры— в радианах или градусах

Интерполяцию осуществляют на определенной части заданной траектории, которая называется участком интерполяции и может быть записана в одном или нескольких кадрах УП Для задания параметров интерполяции следует применять адреса *I, J, K*, используя их для определения геометрических характеристик кривых (например, центра дуги окружности, радиусов, углов и т п)

Линейная, круговая и параболическая интерполяции задаются соответственно подготовительными функциями *G01, G02* и *G06* При этом прямолинейный участок интерполяции и дуга окружности, лежащая в одной из трех координатных плоскостей, программируется соответственно в одном кадре УП А параболический участок интерполяции, лежащий в любой плос-

кости пространства, задается в одном или нескольких кадрах УП

Скорости подачи и главного движения кодируют числами, число разрядов которых должно быть указано в формате конкретного УЧПУ

Выбор типа подачи осуществляется одной из следующих подготовительных функций G93— «Подача в функции обратной величины», G94— «Подача в минуту», G95— «Подача на оборот» При этом рекомендуется, чтобы основным методом кодирования подачи был метод прямого обозначения, при котором должны применяться следующие единицы измерения миллиметры в минуту, миллиметр на оборот и радиан в секунду (градусы в минуту)

Для быстрого перемещения рекомендуется использовать подготовительную функцию G00

Вид функционирования главного движения (там, где это необходимо) следует выбирать одной из следующих подготовительных функций G96— «Постоянная скорость резания», G97— «Обороты в минуту» При кодировании также рекомендуется метод прямого обозначения, при котором число обозначает скорость шпинделя в радианах в секунду (оборотах в минуту) Если число обозначает скорость резания, единицей измерения является метр в минуту

Слово «Функция инструмента» используют для выбора инструмента Допускается использовать это слово для коррекции (или компенсации) инструмента

Слово «Вспомогательная функция» определяет команду исполнительному органу станка с ЧПУ Эти функции задаются словами с адресом M и двухзначным десятичным кодовым числом

УП конкретного УЧПУ характеризуется форматом, который следует записывать, соблюдая следующие правила

символы «Начало программы», «Главный кадр» и «Пропуск кадра» обозначают в соответствии с табл 15 8,

явную десятичную запятую обозначают символом «DS»,

символ «Табуляция», если он используется, обозначают точкой (),

символ «Конец кадра» обозначают звездочкой (*),

слова записывают в последовательности, указанной ранее,

за адресом каждого слова «Размерное перемещение» следуют две цифры, первая из которых показывает число разрядов перед подразумеваемой десятичной запятой, отделяющей целую часть числа от дробной, вторая — число разрядов после запятой Если можно опустить нули, стоящие перед первой и после последней значащих цифр в словах «Размерные перемещения», то за адресом слова «Размерное перемещение» должны следовать три цифры Если опускаются нули стоящие перед первой

значащей цифрой, то нулем должна быть первая цифра Если опускаются нули, стоящие после значащей цифры, то нулем должна быть последняя цифра Если абсолютные размеры всегда положительны, то между адресом и следующим за ним числом не ставят никакого знака, а если они либо положительные, либо отрицательные, то между адресом и следующим за ним числом ставится знак «Плюс»

За адресом безразмерных слов следует записывать одну цифру, показывающую число цифр в слове Если можно опустить нули, стоящие перед первой значащей цифрой, то за адресом безразмерных слов должны следовать две цифры, первая из которых нуль

Пример записи формата
% /DS N05 G02X+058 Y+053 Z+
+056 F031 S06 T08 M02*

В примере приведена запись УП для УЧПУ, воспринимающего явную десятичную запятую, с символами начала программы, главного кадра и пропуска кадра Ведущие нули во всех словах разрешается опускать

N05— трехзначный номер кадра,
G02— двухзначная подготовительная функция,

X+058— перемещение по оси X со знаком «Плюс» или «Минус», пять цифр слева от десятичной запятой и три цифры справа,

Y+053— то же для оси Y,

Z+056— то же для оси Z,

F031— скорость подачи, три цифры слева от десятичной запятой и одна цифра справа,

S06— четырехзначная функция главного движения,

T08— четырехзначная функция инструмента,

M02— двухзначная вспомогательная функция

*— символ «Конец кадра»

После кодирования информации УП в виде последовательности кадров в соответствии с изложенными выше правилами осуществляется ее запись на программноносителе, в качестве которого чаще всего применяют восьмидорожковую бумажную (или из другого материала) перфораторную ленту шириной 25,4 мм (1 дюйм) В современных УЧПУ УП может вводиться непосредственно в память с помощью буквенно-цифровых и индексных клавиш Форма, размеры и расположение перфорационных отверстий кодовых дорожек на ленте регламентирует ГОСТ 10860—83 На рис 15 13 показаны основные элементы перфоленты

Для представления информации на перфоленте используют двоичный 7-битный код по ГОСТ 13032—77, соответствующий международному коду ИСО В табл 15 9 приведено расположение отверстий на перфоленте, образующих указанные кодовые комбинации записи цифр, а также букв и символов

При этом в каждой строке перфоленты первые семь дорожек (1—7) являются информационными и обозначаются как разряды двоичного кода σ_1 — σ_7 , а отверстия на восьмой дорожке (P) служат для контроля на четность общего числа отверстий в каждой строке. Это позволяет контролировать правильность записи и считывания информации с перфоленты.

Применяют следующие способы подготовки УП:

вручную (ручное программирование), выполняемое соответствующими специалистами (инженером-технологом, программистом и др.); машинное программирование, выполняемое системой автоматического программирования (САП), построенной на основе применения малых или больших ЭВМ;

диалоговое машинное программирование, когда подготовка УП производится непосредственно у станка с клавиатуры УЧПУ в режиме диалога с решением многих задач с помощью микро-ЭВМ УЧПУ.

Основные задачи, решаемые при расчете и подготовке УП, подразделяют на следующие этапы:

I этап — разделение операции на установовы и позиции; выбор метода крепления заготовки; подготовка операционной карты;

II этап — определение последовательности пе-

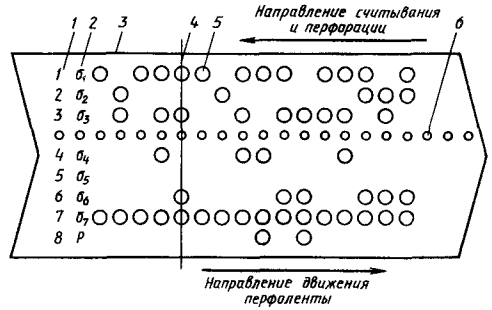


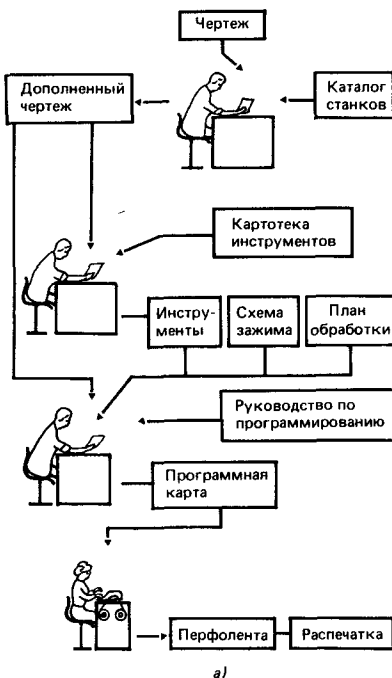
Рис. 15.13. Элементы перфоленты:

1— номер кодовой дорожки; 2— порядковый номер бита в кодовой комбинации; 3— кромка базовая; 4— строка; 5— кодовые отверстия; 6— транспортные (тактовые) отверстия

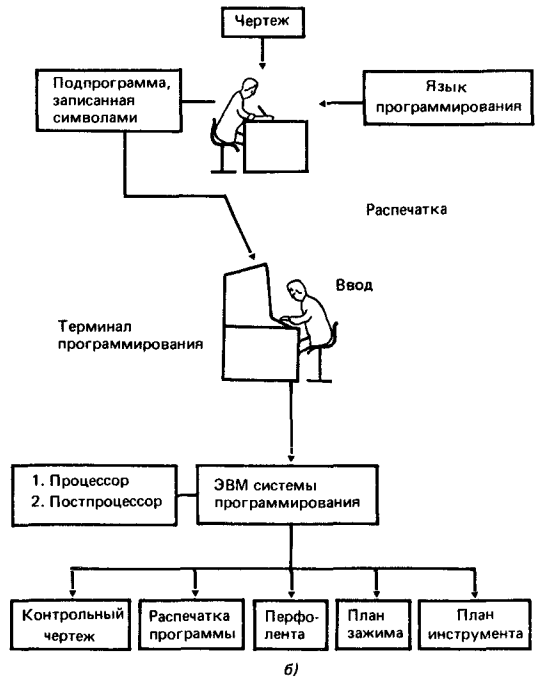
реходов; выбор инструмента; расчет режимов резания; подготовка карт наладки станка и инструмента;

III этап — определение настроечных размеров детали; пересчет размеров в координаты опорных точек; разделение проходов на ходы и шаги; расчет координат опорных точек траектории; преобразование систем координат;

IV этап — формирование элементарных перемещений; определение технологических команд; пересчет величин перемещений в дискреты;



а)



б)

Рис. 15.14. Последовательность подготовки УП:

а — вручную б — с применением САП

15.9. Кодовые комбинации записи символов, цифр и букв на перфоленте

| Кодовая комбинация | | | | | | | | | Символ | Название символа |
|--------------------|---|---|---|---|----|---|---|---|--------|-----------------------------|
| P | 7 | 6 | 5 | 4 | C* | 3 | 2 | 1 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | Пусто | Пропуск строки перфоленты |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | + | 0 | 0 | 0 | ВШ | Возврат на шаг |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | + | 0 | 0 | 1 | ГТ | Горизонтальная табуляция |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | + | 0 | 1 | 0 | ПС | Перевод строки. Конец кадра |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | + | 1 | 0 | 1 | ВК | Возврат каретки |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | + | 0 | 0 | 1 | КН | Конец носителя |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | Пробел | Сдвиг каретки на шаг |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | + | 1 | 0 | 1 | % | Процент. Начало программы |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | + | 0 | 0 | 0 | (| Круглая скобка левая |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | + | 0 | 0 | 1 |) | Круглая скобка правая |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | + | 0 | 1 | 1 | + | Плюс |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | + | 1 | 0 | 1 | - | Минус |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | + | 1 | 1 | 1 | / | Черта дроби. Пропуск кадра |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | 0 | Цифры |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | + | 0 | 0 | 1 | 1 | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | + | 0 | 1 | 0 | 2 | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | + | 0 | 1 | 1 | 3 | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | + | 1 | 0 | 0 | 4 | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | + | 1 | 0 | 1 | 5 | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | + | 1 | 1 | 0 | 6 | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | + | 1 | 1 | 1 | 7 | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | + | 0 | 0 | 0 | 8 | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | + | 0 | 0 | 1 | 9 | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | + | 0 | 1 | 0 | : | Двоеточие. Главный кадр |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 | 1 | A | Буквы. Символы адресов |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 1 | 0 | B | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 1 | 1 | C | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | + | 1 | 0 | 0 | D | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | + | 1 | 0 | 1 | E | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | + | 1 | 1 | 0 | F | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | + | 1 | 1 | 1 | G | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | + | 0 | 0 | 0 | H | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | + | 0 | 0 | 1 | I | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | + | 0 | 1 | 0 | J | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | + | 0 | 1 | 1 | K | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | + | 1 | 0 | 0 | L | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | + | 1 | 0 | 1 | M | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | + | 1 | 1 | 0 | N | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | + | 1 | 1 | 1 | O | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | R | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | + | 0 | 0 | 1 | Q | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | + | 0 | 1 | 0 | R | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | + | 0 | 1 | 1 | S | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | + | 1 | 0 | 0 | T | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | + | 1 | 0 | 1 | U | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | + | 1 | 1 | 0 | V | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | + | 1 | 1 | 1 | W | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | + | 0 | 0 | 0 | X | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | + | 0 | 0 | 1 | Y | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | + | 0 | 1 | 0 | Z | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | + | 1 | 1 | 1 | ЗБ | Забой |

*Синхронизирующая дорожка.

кодирование УП, запись УП на программноноситель, распечатка текста УП,

V этап — контроль программноносителя, контроль траектории инструмента, редактирование УП

При расчете и подготовке УП вручную практически все этапы, исключая часть задач на IV и V этапах, выполняют соответствующие специалисты (рис 15 14, а)

При подготовке УП с применением САП большинство задач решается автоматически ЭВМ (рис 15 14, б) А на самом высоком уровне автоматизации подготовка УП может входить в состав задач автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП)

Система автоматического программирования представляет собой программно-математическое обеспечение, выполняющее функции обработки информации в процессе технологической подготовки производства для станков с ЧПУ При вводе САП в действие комплекс соответствующих вычислительных программ, находящихся на машинных носителях информации ЭВМ (перфокартах, магнитных лентах, магнитных дисках), вводится в оперативную память ЭВМ Затем производится ввод исходных программ на языке программирования, расшифровка их содержания, выполнение необходимых вычислений и кодирование результатов расчетов

САП разделяют на универсальные и специализированные Универсальные САП рассчитаны на широкую группу станков Специализированные САП предназначены для автоматического программирования только для станков определенной модели, принадлежащих к одному типоразмеру и оснащенных одной и той же системой ЧПУ

Универсальные САП состоят из двух основных частей, связанных между собой промежуточным языком CILDATA, разработанным Международным комитетом стандартов ИСО процессора, выполняющего преобразование исходной программы обработки изделия на языке технологического программирования в промежуточную программу, общую для всех станков данной группы,

набора постпроцессоров, каждый из которых ориентирован на конкретный тип станка с ЧПУ и переводит промежуточную программу в управляющую, закодированную на соответствующем машинном языке

В России и за рубежом разработано значительное число САП, построенных на основе малых и больших ЭВМ Описание наиболее широко применяемых САП приведено в работах [3] и [4]

Диалоговый метод программирования может реализовываться на всех современных программируемых (микропроцессорных) УЧПУ Этот

метод рекомендуется применять при подготовке УП для изготовления простых деталей

При диалоговом методе программирования на экране дисплея УЧПУ высвечивается последовательность вопросов, на которые должен отвечать оператор путем нажатия соответствующих буквенных или цифровых клавиш При другом варианте эти вопросы могут задаваться в виде перечня, из которого надо выбрать желаемый вариант

Для контроля УП на ряде УЧПУ предусмотрено вычерчивание на дисплее контура детали и траектории движения режущего инструмента (например, в УЧПУ «Электроника НЦ 80 31»)

Более подробно характеристика указанных этапов подготовки УП с конкретными примерами их выполнения приведена в работах [3, 4]

15.4. Адаптивные системы управления

При обработке заготовок на станках с ЧПУ уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания обработки и насколько изменяются исходные параметры, принятые при расчете и составлении УП (припуск, твердость обрабатываемого материала, жесткость технологической системы и др.)

В действительности условия процесса обработки изменяются во времени случайным образом по следующим причинам

непрерывно изменяются режущие свойства инструментов, которые невозможно точно определить в данный момент времени,

неопределенны свойства всей технологической системы (упругие и температурные деформации, вибрации),

для каждой заготовки из обрабатываемой партии имеется разброс припусков, твердости, структуры металла и др

Адаптивные (самоприспосабливающиеся) системы управления обеспечивают автоматическое приспособление процесса обработки заготовки к изменяющимся условиям обработки по определенным критериям Это приспособление осуществляется на основе информации, получаемой системой управления непосредственно в процессе обработки заготовок

На основе получаемой информации о текущем состоянии обработки системы адаптивного управления, увеличивая или уменьшая толщину снимаемого с заготовки металла путем соответствующего изменения скорости резания и подачи, поддерживает постоянным предельное значение какого-либо заданного параметра обработки (например, силы резания) или в более общем (но и более сложном) случае обеспе

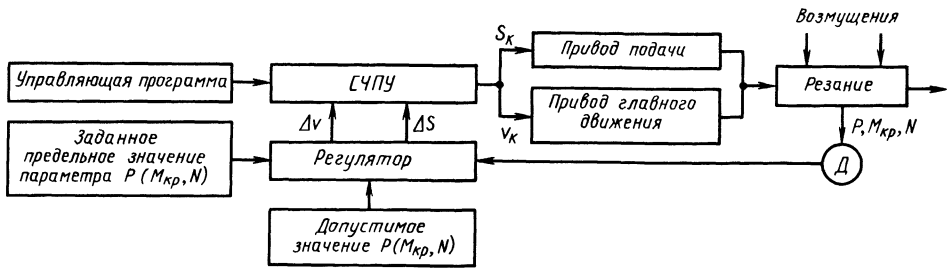


Рис. 15.15. Структурная схема адаптивной системы предельного управления

чивает получение оптимальных точности, производительности или себестоимости обработки.

Адаптивные системы управления делят на две группы — системы предельного и оптимального управления.

Адаптивные системы предельного управления обеспечивают постоянное значение заданных параметров процесса резания при действии различных возмущений (рис. 15.15).

Так, при переменных припуске и твердости

материала заготовки (возмущение) эта система управления стабилизирует заданное предельное значение силового параметра резания (например, силу резания P , крутящий момент на шпинделе $M_{кр}$ или мощность резания N), получая от датчика D сигнал, соответствующий действительному значению этого параметра. Стабилизация заданного значения силового параметра производится соответствующим увеличением или уменьшением подачи S (на величину ΔS), скорости резания v (на величину Δv) и получения в результате этого скорректированных значений S_k и v_k , подаваемых на приводы станка.

Наибольшее применение получили адаптивные системы предельного управления, в которых регулируемой величиной является только подача S . Такая система управления может автоматически стабилизировать упругое смещение инструмента при колебании припуска (рис. 15.16, а, б) и твердости заготовки (рис. 15.16, в) регулированием подачи S при обработке заготовки на длине l , учитывать увеличение силы резания при изнашивании режущего инструмента (рис. 15.16, г), выполнять перемещения инструмента на необрабатываемых участках заготовки, осуществлять его подвод и отвод на ускоренном ходу (рис. 15.16, д), проводить автоматическое распределение снимаемого с заготовки припуска (упрощается подготовка УП), выполнять контроль стойкости инструмента и при недопустимо большом его износе предотвращать его поломку.

Предельные значения параметров, которые задаются данной системе при управлении обработкой, определяют на основе предварительного исследования процесса обработки.

Адаптивные системы оптимального управления (рис. 15.17) при обработке заготовок осуществляют автоматический поиск и автоматически поддерживают такое сочетание скорости резания v и подачи S , которое обеспечивает экстремальное значение целевой функции H обработки (точность, производительность или себестоимость обработки) при наличии технических ограничений и действии возмущающих воздействий (колебаний припуска, твердости

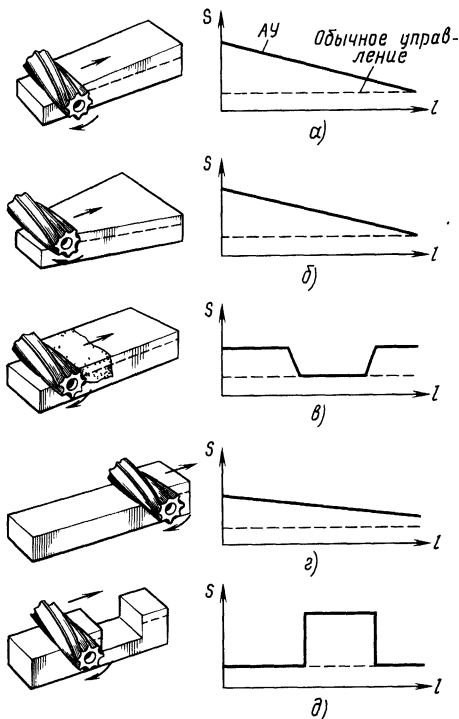


Рис. 15.16. Примеры обработки заготовок и графики изменения подачи S в зависимости от длины обрабатываемой поверхности l :

а — с переменной глубиной резания; б — с переменной шириной; в — с переменной твердостью заготовки; г — обработка с учетом износа инструмента; д — обработка заготовки с наличием необрабатываемого участка

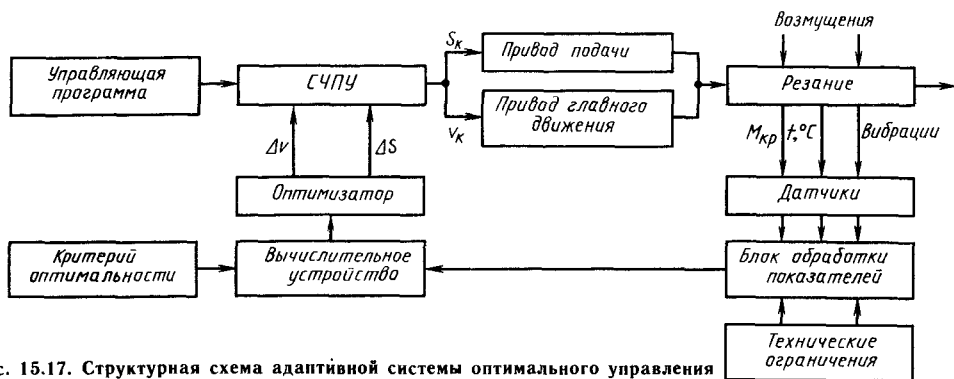


Рис. 15.17. Структурная схема адаптивной системы оптимального управления

материала заготовки, режущих свойств инструмента и др.). Техническими ограничениями являются максимальные и минимальные значения параметров, допустимые на данном станке: S_{\max} , S_{\min} , $n_{\text{шп max}}$, $n_{\text{шп min}}$ максимально допустимая глубина резания, уровень вибрации и др.

Основой для построения адаптивных систем управления является математическая модель управляемого процесса обработки, аналитически задающая систему технических ограничений области поиска оптимальных режимов резания и выражающая зависимость критерия оптимальности от параметров процесса обработки.

Измеряемыми параметрами, характеризующими процесс обработки, могут быть сила резания, вибрации, температура в зоне резания, крутящий момент на шпинделе, мощность приводного двигателя и др.

Наиболее информативным показателем процесса резания является изменение силы резания, которое обусловлено совместным влиянием изменения припуска на обработку, колебания твердости обрабатываемого материала, затупление режущего инструмента и др.

Адаптивные системы управления особенно эффективно применяют на фрезерных станках при обработке сложных заготовок концевыми фрезами небольшого диаметра, на токарных станках — при обработке заготовок сложными фасонными резцами с поперечным движением подачи, на электроэрозионных станках и др.

Перспективность развития и внедрения систем адаптивного управления в металлообработке обуславливается следующими основными факторами:

необходимостью автоматизации мелкосерийного производства, особенностью которого является большая номенклатура изготавливаемых деталей и, как следствие этого, — весьма широкий диапазон изменения обрабатываемых материалов, режимов резания, припусков на обработку, твердости материала заготовок и др.;

необходимостью обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов, по режимам резания которых нет проверенных данных;

необходимостью повышения точности изготовления деталей с компенсацией влияния на нее случайных факторов (колебание припуска, твердости и др.);

необходимостью выполнения ограничений режимов обработки, заданных УП, в том случае, когда превышаются допустимые погрешности обработки заготовки;

необходимостью выполнения сложных видов обработки с обеспечением ее требуемого качества, экономичным расходом режущего инструмента, предохранением инструмента от поломок (например, сверление отверстий диаметром до 3 мм в заготовках из жаропрочной стали);

упрощением процесса подготовки УП;

необходимостью объединения проектирования и обработки с оптимизацией их выполнения и др.

Однако широкое внедрение адаптивных систем управления в металлообработке ограничивается пока большой сложностью и высокой стоимостью этих систем, а также часто еще недостаточной эффективностью их применения, что обусловлено целым рядом причин:

недостаточными знаниями математических зависимостей для разработки моделей управляемых процессов резания, особенно при обработке новых материалов;

отсутствием во многих случаях необходимых измерительных средств (датчиков требуемых размеров, точности, надежности, быстродействия, помехоустойчивости и др.);

неприспособленностью конструкции многих металлорежущих станков и их отдельных механизмов к наиболее рациональному размещению датчиков на станке, недостаточностью быстродействия отдельных механизмов станка и др.

Подробное изложение вопросов проектирования и работы адаптивных систем управления, в том числе для конкретных металлорежущих

станков, описание способов и датчиков для измерения необходимых параметров процесса обработки приведено в работах [1, 12].

15.5. Выбор и проектирование систем ЧПУ

Выбор и проектирование систем ЧПУ должны осуществляться с учетом специфики выполняемого процесса обработки на станке, конкретных производственных условий, а также достижения проектируемым станком с ЧПУ наилучших показателей по качеству изготавливаемых деталей, производительности и себестоимости их изготовления.

Основные обобщенные этапы проектирования станков с ЧПУ следующие:

- разработка технологического процесса изготовления деталей как основы дальнейшего проектирования данного станка с ЧПУ;

- выбор оптимального варианта построения станка с ЧПУ, его принципиального и компоновочного решения;

- выбор, расчет и проектирование системы ЧПУ; расчет и проектирование целевых механизмов рабочих и вспомогательных ходов;

- уточнение ожидаемых технико-экономических показателей проектируемого станка с ЧПУ (производительности, точности, надежности в работе, себестоимости).

При проектировании системы ЧПУ необходимо так распределить выполняемые функции между аппаратной частью и программным обеспечением, чтобы получать оптимальное сочетание следующих требований:

- низкая стоимость и компактная конструкция;
- высокая гибкость и высокая скорость обработки данных;

- способность к согласованию и расширению, удобство в обслуживании и уходе;

- использование новейшей техники и максимально возможная надежность.

Проектирование самих систем управления состоит из основных шести этапов.

1-й этап — технико-экономическое обоснование, целью которого является формулирование с позиции заказчика предложения по разрабатываемой системе управления, содержащего основные функции и технические характеристики данной системы управления.

2-й этап — разработка технического задания (ТЗ) на проектируемую систему управления, в котором обосновывается возможность создания системы управления, удовлетворяющей исходным техническим требованиям. Указывают основание для разработки системы управления, ее назначение, область применения, условия эксплуатации, технические данные системы управления и др. Планируют все необходимые научно-исследовательские, опытно-конструктор-

ские, проектные и монтажно-наладочные работы. Проводят подготовку материалов, необходимых для проведения проектных работ.

На этой стадии выполняют в общем случае следующие работы:

- предварительное обследование объекта управления (станка или группы станков) с тем, чтобы обосновать целесообразность и возможность создания системы управления, удовлетворяющей исходным техническим требованиям;

- предпроектные научно-исследовательские работы, в ходе которых проводится исследование наиболее сложных задач управления станком и выбор способов их решения. При этом составляют структурную схему системы управления, математические модели, анализируют информационные потоки, формируют критерии управления и ограничения, определяют содержание функций, которые должны реализовать система управления, и др.;

- эскизную разработку системы управления, включающую в себя разработку функциональных и алгоритмических структур системы управления, синтез основных алгоритмов регулирования, управления и контроля; выбор технических средств, разработку общего программного обеспечения системы управления; выбор алгоритмических и программных модулей, пакетов и библиотек прикладных программ из соответствующих фондов и др. После выполнения эскизной разработки производят при необходимости корректировки технико-экономического обоснования.

3-й этап — разработка технического проекта, в ходе которой проводят общесистемный и структурный синтез системы управления, разработку ее специального программного обеспечения, разработку проектно-сметной документации, составление при необходимости заявок на разработку новых технических средств. Осуществляют расчет ожидаемого технико-экономического эффекта.

4-й этап — разработка рабочего проекта системы управления, когда разрабатывается рабочая документация на систему управления (схемы, чертежи, программные и текстовые документы).

5-й этап — изготовление и внедрение системы управления, которое включает сначала изготовление экспериментального (опытного) образца, комплексную отладку программного обеспечения, испытание и отработку технической документации и программного обеспечения, а затем уже серийное изготовление и внедрение системы управления в промышленную эксплуатацию.

6-й этап — анализ функционирования внедренной системы управления с целью получения объективных и систематизированных дан-

ных о качестве созданной системы управления и реальном эффекте от ее применения.

Подробная характеристика указанных этапов, их содержание и описание приведены в работах [10, 16, 20, 25].

Рассмотренный выше порядок проектирования систем управления характерен при разработке и изготовлении основной части системы управления — УЧПУ, производимой специализированными предприятиями и фирмами, или при разработке специальных систем управления для уникальных станков с ЧПУ.

При проектировании и изготовлении станков с ЧПУ на станкостроительных предприятиях и фирмах системы управления комплектуют (с последующей стыковкой и отладкой) на основе выбора из имеющейся разработанной и изготовленной специализированными предприятиями и фирмами номенклатуры составных элементов системы ЧПУ.

При этом может быть три варианта комплектации и создания систем управления.

При первом варианте предприятия и фирмы — изготовители систем управления (в частности, УЧПУ) осуществляют исходя из требований заказчика полную комплектную поставку систем ЧПУ применительно к конкретному выпускаемому станкам: УЧПУ, устройства программируемой логики и адаптивного управления, регулируемые электроприводы подач и главного движения, ИП, монтажные и кабельные устройства и соединения, электрошкафы с повышенной степенью защиты и вентиляцией. При этом по желанию заказчика возможна комплектация системы ЧПУ как элементами, производимыми данной фирмой, так и элементами, производимыми другими фирмами.

Это наиболее прогрессивный способ проектирования и изготовления систем ЧПУ, так как при этом легче обеспечить согласование УЧПУ с остальными составными элементами системы управления. Кроме того, значительно сокращается время отладки и пуска системы ЧПУ и станка.

При втором варианте предприятия и фирмы — изготовители станков с ЧПУ сами осуществляют комплектацию необходимой системы управления из элементов, имеющихся на рынке. Это менее эффективный способ создания системы ЧПУ.

При третьем варианте станкостроительные предприятия и фирмы сами разрабатывают и изготавливают системы ЧПУ, включая разработку и изготовление собственного УЧПУ и других элементов. Применение этого варианта объясняется более полным учетом и согласованием всех возможностей и особенностей выпускаемых металлорежущих станков и их систем ЧПУ. В других случаях этот вариант применяется при выпуске станкостроительными предприятиями

и фирмами уникальных металлорежущих станков.

В случае комплектации системы ЧПУ из имеющихся элементов в техническом задании на станок с ЧПУ в первую очередь указываются требования к выбираемому УЧПУ.

Например, в техническом задании на токарный станок с ЧПУ к УЧПУ предъявляются следующие требования:

- число управляемых координат — две, три или четыре (в зависимости от исполнения станка);
- максимальная программируемая скорость — до 15 м/мин;

- линейная и круговая интерполяция;
- компенсация дрейфа приводов при нулевом сигнале управления;

- коррекция положения инструмента;
- коррекция зазора в приводе подач;

- коррекция погрешности шага винта;

- установка зон запрета резания;

- ввод программ с пульта ЧПУ или фотосчитывающего устройства;

- одновременное хранение в памяти не менее 999 управляющих программ;

- редактирование управляющих программ с выдачей отредактированных программ на перфоленту;

- технологические (стандартные) циклы (обработка канавок, чистовая и многопроходная обработка, нарезание цилиндрических, конических и торцовых резьб);

- параметрическое программирование подпрограмм и циклов;

- размещение корректоров, параметров УП и программ электроавтоматики в энергонезависимой памяти;

- подключение и работа с измерительной системой контроля обрабатываемой заготовки и износа инструмента;

- подключение к ЭВМ высшего ранга.

Разработка программного обеспечения для конкретного станка с ЧПУ сводится к выбору и использованию уже имеющихся стандартных программных блоков, а также разработке его нестандартной части (технологическое и функциональное ПО). Выбранные и настроенные программные модули объединяют в единую систему ПО с помощью его нестандартной части.

С конструктивной точки зрения для УЧПУ характерно следующее:

- раздельное размещение элементов, потребляющих большие мощности и выделяющих большое количество теплоты с маломощными элементами;

- организация внутреннего теплообмена и поддержание постоянной температуры внутри шкафа с помощью кондиционеров и дверных уплотнителей;

- применение больших монтажных плат, печат-

ного монтажа и печатных плоских кабелей для внутренних соединений,

миниатюризация, позволяющая встраивать УЧПУ непосредственно в механизмы станка или, что делают чаще, выполнять их в отдельном подвесном пульте управления и помещать в удобном месте на станке. При этом достигается значительная экономия производственных площадей,

модульная конструкция, обуславливающая удобство их технического обслуживания, упрощающая поиск неисправностей и ремонт путем замены соответствующих модулей,

оснащение дисплейной техникой отображения информации управления станком, диагностики неисправностей в буквенно-цифровой форме, что улучшает наглядность управления и «общение» оператора с системой управления

Разработка и широкое применение систем ЧПУ оказало значительное влияние на компоновку и конструкцию станков, оснащенных этими системами управления

В станках с ЧПУ стало возможным получать сложные движения его рабочих органов благодаря не кинематическим связям, а управлению независимыми координатными перемещениями этих рабочих органов по УП. Длинные, разветвленные кинематические цепи уступили место элементарно простым с автономными приводами по каждой из координат перемещения. Качественно новым в станках с ЧПУ является возможность увеличения числа одновременно управляемых координат, в результате чего появились принципиально новые компоновки станков и широкие технологические возможности при автоматическом управлении (выбор и смена режущих инструментов, загрузка-разгрузка станка, измерение обрабатываемых заготовок, контроль износа и поломки режущих инструментов, их подналадка или смена, проведение технического диагностирования и др.)

Более полно и эффективно стали использовать модульный принцип построения станков с ЧПУ. Были разработаны новые конструкции ряда механизмов станков с ЧПУ, повышающих их точность, жесткость, виброустойчивость, равномерность перемещений при малых потерях на трение и др. (модернизированные и новые типы направляющих, новые типы подшипников для шпинделей и ходовых винтов привода подачи, шариковые винтовые пары, безазорные зубчатые передачи и др.) Ряд деталей и узлов станков с ЧПУ изготавливают из новых материалов, повышающих их эксплуатационные характеристики (жесткость, износостойкость, виброустойчивость, термостойкость)

Подробное описание особенностей конструкции станков с ЧПУ, а также их отдельных механизмов приведено во втором томе данного справочника, а также в работах [6, 19, 22]

Список литературы

- 1 **Базров Б. М.** Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков М Машиностроение, 1978 216 с
- 2 **Гусев И. Т., Елисеев В. Г., Маслов А. А.** Устройства числового программного управления Учеб пособие для техн вузов М Высшая школа, 1986 296 с
- 3 **Дерябин А. Л.** Программирование технологических процессов для станков с ЧПУ Учеб пособие для техникумов М Машиностроение, 1984 224 с
- 4 **Евгеньев Г. Б.** Основы программирования обработки на станках с ЧПУ М Машиностроение, 1983 304 с
- 5 **Камышный Н. И., Стародубов В. С.** Конструкции и наладка токарных автоматов и полуавтоматов Учебник для СПТУ 4-е изд., перераб и доп М Высшая школа, 1988 256 с
- 6 **Кузнецов М. М., Усов Б. А., Стародубов В. С.** Проектирование автоматизированного производственного оборудования Учеб пособие для вузов М Машиностроение, 1987 288 с
- 7 **Лещенко В. А.** Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением М Машиностроение, 1975 288 с
- 8 **МикроЭВМ: В 8 кн** Практ пособие/Под ред Л Н Преснухина Кн 4 Управляющие системы «Электроника ИЦ» М Высш шк., 1988 192 с
- 9 **Мишель Ж., Лоржо К., Эспьо Б.** Программируемые контроллеры/Пер с франц А П Сизова М Машиностроение, 1986 176 с
- 10 **Многоцелевые системы ЧПУ гибкой механообработкой/В Н Алексеев, В Г Воржев, Г П Гырдымов и др** Под общ ред В Г Колосова Л Машиностроение, 1984 224 с
- 11 **Наладка одношпиндельных токарных автоматов** Справочное пособие/А Я Пожитков, Е С Сафро, И Д Волжанский и др Л Машиностроение, 1978 192 с
- 12 **Палк К. И.** Системы управления механической обработкой на станках Л Машиностроение, 1984 215 с
- 13 **Программное управление станками и промышленными роботами** Учебник для СПТУ/В Л Косовский, Ю Г Козырев, А Н Ковшов и др М Высшая школа, 1986 287 с
- 14 **Ратмиров В. А.** Управление станками гибких производственных систем М Машиностроение, 1987 272 с
- 15 **Рыбаков С. В., Жигалев Н. Н., Мазо И. И.** Характеристики комплектных многокоординатных устройств ЧПУ//Станки и инструмент 1986 № 7 С 18—19
- 16 **Сосонкин В. Л.** Микропроцессорные системы числового программного управления станками М Машиностроение, 1985 288 с

- 17 **Справочник** по наладке токарных и токарно-револьверных автоматов/А А Оганян, Э М Родинский, Л Б Гай и др М Машиностроение, 1983 383 с
- 18 **Срибнер Л. А.** Цикловое программное управление оборудованием М Машиностроение, 1980 152 с
- 19 **Станки** с числовым программным управлением (специализированные) Под ред В А Лещенко М Машиностроение, 1979 592 с
- 20 **Тищенко Н. М.** Введение в проектирование систем управления 2 е изд, перераб и доп М Энергоатомиздат, 1986 248 с
- 21 **Токарные** многошпиндельные автоматы/ В И Чергикало, О И Гуров, Б П Давидович и др М Машиностроение, 1978 309 с
- 22 **Точность** и надежность станков с числовым программным управлением/ А С Проников, В С Стародубов, М С Уколов и др Под ред А С Проникова М Машиностроение, 1982 256 с
- 23 **Шаумян Г. А.** Автоматы и автоматические линии М Машгиз, 1961 552 с
- 24 **Шраго Л. К., Срибнер Л. А.** Функциональные возможности и тенденции развития устройств цифровой индикации и управления металлорежущими станками//Станки и инструмент 1985 № 7, С 8—13
- 25 **Электромеханические** системы управления тяжелыми металлорежущими станками/ С В Демидов, С А Авдушев, А М Дубников и др Под общ ред С В Демидова Л Машиностроение, 1986 236 с
- 26 **Hans В.** Kief NC/CNC Handbuch 87 NC—Handbuch — Verlag 1987 568 s

Художественное проектирование и эргономика станков

16.1. Общие требования технической эстетики

Техническая эстетика предъявляет комплекс социально экономических, функционально конструктивных, эргономических и эстетических требований, выполнение которых наряду с другими требованиями должно обеспечивать создание технически совершенного, экономически оправданного, удобного в эксплуатации и эстетически выразительного оборудования (РТМ 150 37 101 097—80 Общие требования технической эстетики к проектируемому и изготавливаемому оборудованию)

Социально-экономические требования определяют общественно необходимую номенклатуру, исходя из условий наиболее полного обеспечения промышленности этим оборудованием при оптимальном соотношении его видов Это также требования, способствующие облегчению условий труда, развитию эстетического отношения к процессу труда и его результатам, эстетическому воспитанию и гармоническому развитию личности

Эргономические требования определяют оптимальные условия труда человека оператора и согласование его возможностей с параметрами оборудования Это означает, что оборудование следует проектировать с учетом антропометрических характеристик, биомеханических, психофизиологических и психических свойств человека-оператора К рабочему месту человека оператора предъявляются следующие требования

оно должно обеспечить простую и естественную позу человека-оператора при выполнении им рабочих функций,

оно должно иметь достаточное рабочее пространство, позволяющее человеку оператору осуществлять все необходимые движения и манипуляции при управлении работой оборудования, должно проектироваться с учетом антропометрических данных человека,

его следует проектировать с учетом удобства обзора всех функционально важных узлов и элементов оборудования,

оно должно обеспечить условия для опера-

тивного обслуживания оборудования и его профилактики,

оно должно иметь оптимальную и равномерную освещенность (особенно на лицевых панелях) и исключать затемненность,

оно должно располагаться относительно других рабочих мест в соответствии с ГОСТ 21958—76,

оно должно быть оснащено пультами управления, спроектированными в соответствии с ГОСТ 23000—78

Эстетические требования — требования, определяющие художественный уровень изделия, оцениваемый по признакам композиционного единства, конструктивной целесообразности, гармоничности, законченности и соразмерности (масштабности) его формы в целом и форм отдельных его частей, общего цветового решения, а также соответствия прогрессивным общественным тенденциям в художественной организации окружающей человека среды

Функционально конструктивные требования заключаются в соответствии формы оборудования его функциональному назначению и конструктивной целесообразности, в необходимости применения прогрессивного технологического процесса и рациональном использовании материалов при изготовлении оборудования

16.2. Эргономические требования, предъявляемые к проектируемым станкам

Проблема взаимодействия человека и современной техники является одной из основных проблем современного машиностроения, практики проектирования и эксплуатации машин Она имеет ряд аспектов, основные из которых связаны с анализом соответствия машин антропометрическим, биомеханическим, психофизиологическим и психическим свойствам человека оператора, а также его естественной потребности в общении с эстетически совершенными предметами

Некоторые из этих аспектов рассматриваются в научной дисциплине — *эргономике*

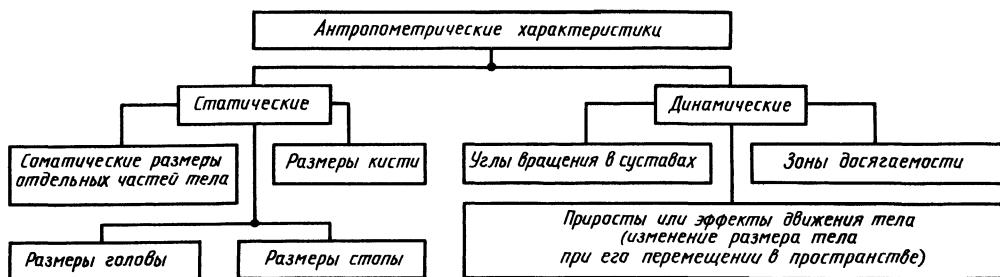


Рис. 16.1. Классификация антропометрических характеристик

Учет антропометрических характеристик человека при проектировании станков. Антропометрические характеристики (АХ), определяющие размеры тела человека и его отдельных частей, являются случайными величинами, подчиненными нормальному закону распределения.

Антропометрические характеристики могут быть статические и динамические (рис. 16.1).

Статические АХ — это размеры тела человека, соответствующие статическому положению последнего, сохраняющего при измерениях одну и ту же позу. На рис. 16.2 указаны эти размеры (поз. 1 — 24), в табл. 16.1 даны их средние значения M_{cp} и среднеквадратические отклонения σ для базового контингента, а также области применения при проектировании.

Значения АХ для требуемого контингента людей пересчитывают по зависимостям, изложенным в методике расчета АХ плоских манекенов.

Динамические АХ — это углы вращения в суставах, данные по зонам досягаемости, приросты (эффекты движения) в виде максимального увеличения или уменьшения одного и того же размера при перемещении части тела в пространстве (например, изменение длины руки при различных ее положениях).

В табл. 16.2 приведены динамические АХ при движении головы, стопы, кисти руки человека.

На рис. 16.3 показаны зоны досягаемости рук человека, а в табл. 16.3 размеры этих зон для человека, имеющего базовые антропометрические показатели, т. е. средние значения размеров (M_{cp}), приведенные в табл. 16.2.

Антропометрическое проектирование станков. Существующие антропометрические методы проектирования станков в системе человек — машина направлены на учет антропометрических признаков через схематическое изображение человека-оператора [3]. Пространственно-антропометрическая совместимость (ПАС) оператора с элементами рабочего места (оборудования) в системах «человек — машина» (СЧМ) достигается при проектировании пространств и поверхностей, где размещаются тело

оператора, органы управления (ОУ), а также средства отображения информации (СОИ) на основе моторных полей и полей зрения с установлением регулировочных параметров.

Решение задачи ПАС известными антропометрическими методами проектирования включает четыре этапа (рис. 16.4):

разработку антропометрической модели человека-оператора на основе антропометрических данных;

определение границ моторных полей рук, ног и полей зрения для нормативных поз;

формирование оптимальных рабочих зон для группы пользователей (нормативные и промежуточные рабочие позы);

разработку компоновочной схемы, т. е. формирование тех поверхностей, где размещаются оператор, ОУ, СОИ с установлением регулировочных параметров.

Все антропометрические методы проектирования по форме учета антропометрических пара-

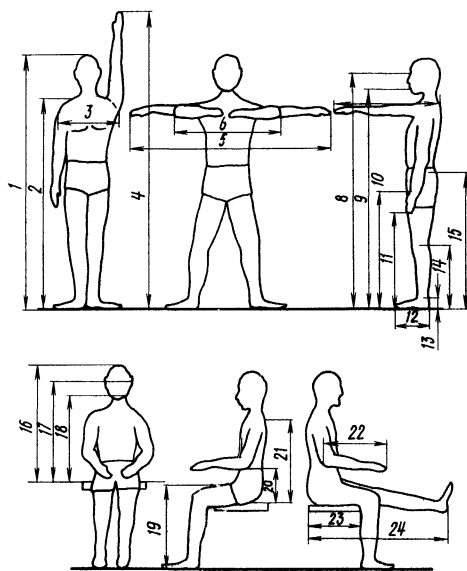


Рис. 16.2. Основные размеры тела человека

16.1. Статические антропометрические характеристики

| № поз. на рис. 16.2 | Характеристика | Основные размеры, см | | | | Область применения |
|---------------------------|---|----------------------|--------------|----------|--------------|--|
| | | мужчины | | женщины | | |
| | | $M_{ср}$ | σ_{T} | $M_{ср}$ | σ_{T} | |
| В положении стоя | | | | | | |
| 1 | Высота над полом вершущей точки (рост) | 172,3 | 6,6 | 159,5 | 5,2 | Для определения высоты оборудования при работе стоя и высоты рабочего помещения |
| 2 | Высота плеча | 142,8 | 6,2 | 131,8 | 5,0 | Для определения высоты рабочей поверхности и высоты расположения органов управления |
| 3 | Ширина плеч | 45,7 | 2,1 | 40,8 | 2,4 | Для определения размеров рабочего места |
| 4 | Длина тела с вытянутой вверх рукой | 220,3 | 9,56 | 201,8 | 6,95 | Для определения зоны досягаемости по вертикали при размещении органов управления |
| 5 | Размах руки | 179,0 | 8,2 | 163,2 | 6,5 | Для определения зон досягаемости по фронту |
| 6 | Размах рук, согнутых в локтях | 94,2 | 4,6 | 86,6 | 3,7 | То же |
| 7 | Передняя досягаемость руки | 84,2 | 4,5 | 77,1 | 3,6 | Для определения зон досягаемости по глубине |
| 8 | Высота глаз над полом | 159,7 | 6,3 | 147,8 | 5,1 | Для определения высоты рабочей поверхности и размещения средств индикации, зон обзора |
| 9 | Высота ротовой точки над полом | 153,0 | 6,1 | 141,6 | 5,0 | Для определения высоты установки микрофона |
| 10 | Высота над полом шиловидной точки | 82,1 | 3,7 | 76,6 | 3,5 | Для определения зон захвата |
| 11 | Высота над полом пальцевой III точки | 63,5 | 3,5 | 59,5 | 3,1 | Для определения зон досягаемости по вертикали при размещении органов управления |
| 12 | Длина стопы | 26,7 | 1,8 | 24,0 | 1,3 | Для определения размеров ножных органов управления |
| 13 | Высота над полом нижней берцовой точки | 6,2 | 1,2 | 5,3 | 1,2 | То же |
| 14 | Высота над полом верхней берцовой точки | 45,0 | 2,9 | 40,7 | 2,5 | Для определения высоты расположения органов управления и высоты рабочей поверхности |
| 15 | Длина ноги | 93,3 | 4,8 | 85,6 | 2,2 | То же |
| В положении сидя | | | | | | |
| 16 | Высота над сиденьем вершущей точки | 90,5 | 2,8 | 85,6 | 2,7 | Для оценки высоты оборудования, размеров зон расположения органов управления и индикации |
| 17 | Высота глаз над сиденьем | 77,4 | 2,6 | 73,4 | 2,6 | Для оценки размещения органов управления и индикации |
| 18 | Высота ротовой точки над сиденьем | 70,8 | 2,6 | 67,0 | 2,6 | Для определения высоты установки микрофона |
| 19 | Высота коленей над полом | 56,5 | 2,7 | 52,0 | 2,1 | Для определения высоты сиденья |
| 20 | Высота локтя над сиденьем | 22,8 | 2,5 | 22,2 | 2,4 | Для размещения подлокотников и определения высоты рабочего места |
| 21 | Высота плеча над сиденьем | 60,0 | 2,9 | 56,6 | 2,5 | Для размещения органов управления, определение высоты рабочей поверхности |
| 22 | Длина предплечья с кистью | 48,1 | 2,5 | 43,9 | 1,7 | Для определения зоны досягаемости по глубине, размеров рабочего места |
| 23 | Расстояние от спинки сиденья до подколенного угла | 51,0 | 2,7 | 48,1 | 2,8 | Для определения размеров сиденья |
| 24 | Длина вытянутой ноги | 107,9 | 5,4 | 103,0 | 3,1 | Для размещения органов ножного управления |

16.2. Угол поворота различных частей тела

| Часть тела | Характер движения | Угол поворо-та, ° | |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|
| | | $M_{ср i}$ | $\sigma_{т i}$ |
| Рука, сжимающая цилиндр | Разгибание | 85 | 18,2 |
| | Сгибание | 53 | 17,3 |
| | Отведение (движение в сторону) | 40 | 11,2 |
| | Приведение (движение внутрь) | 35 | 10,3 |
| | Отведение из исходного положения | 179 | 18,8 |
| | Приведение из исходного положения | 73 | 14,8 |
| Голова | Назад | 60 | 15,5 |
| | Вперед | 44 | 13,6 |
| | Вправо | 40 | 10,9 |
| | Влево | 42 | 10,9 |
| | Вправо | 73 | 10,0 |
| Стопа | Разгибание | 27 | 7,6 |
| | Сгибание | 39 | 7,9 |
| | Отведение (движение в сторону) | 35 | 10,3 |
| | Приведение (движение внутрь) | 33 | 8,5 |

16.3. Размеры зон досягаемости рук человека

| № поз. на рис. 16.3 | Размеры зон досягаемости, мм, в плоскости | | | |
|---------------------|---|-------------|----------------|-------------|
| | вертикальной | | горизонтальной | |
| | для муж-чин | для жен-щин | для муж-чин | для жен-щин |
| 1 | 1550 | 1400 | 1550 | 1370 |
| 2 | 1350 | 1100 | 1350 | 1100 |
| 3 | 800 | 730 | 720 | 660 |
| 4 | 500 | 430 | 240 | 200 |
| 5 | 700 | 630 | 240 | 200 |
| 6 | 1400 | 1260 | 335 | 300 |
| 7 | 770 | 680 | 550 | 480 |
| 8 | 800 | 720 | — | — |

16.4. Соотношение значений % охвата людей данного контингента, перцентиль*, коэффициента t_γ и интервала АХ

| % охвата людей данного контингента | Перцентиль*, % | t_γ | Интервал АХ |
|------------------------------------|----------------|------------|---------------------------------|
| 99,7 | 0,15—99,85 | 3,0 | $M_{ср i} \pm 3,0\sigma_{т i}$ |
| 98 | 1,0—99,0 | 2,5 | $M_{ср i} \pm 2,5\sigma_{т i}$ |
| 95 | 2,5—97,5 | 2,0 | $M_{ср i} \pm 2,0\sigma_{т i}$ |
| 90 | 5,0—95,0 | 1,65 | $M_{ср i} \pm 1,65\sigma_{т i}$ |
| 75 | 12,5—87,5 | 1,15 | $M_{ср i} \pm 1,15\sigma_{т i}$ |
| 68 | 16,0—84,0 | 1,0 | $M_{ср i} \pm 1,0\sigma_{т i}$ |
| 50 | 25,0—75,0 | 0,67 | $M_{ср i} \pm 0,67\sigma_{т i}$ |
| 25 | 37,5—62,5 | 0,32 | $M_{ср i} \pm 0,32\sigma_{т i}$ |

*Перцентиль — сотая доля измеряемой совокупности, выраженная в процентах, которой соответствует определенное значение антропометрической характеристики.

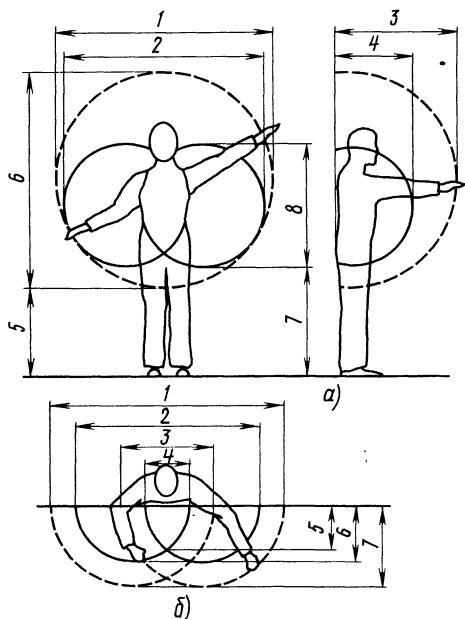


Рис. 16.3. Зоны досягаемости оператора в положениях стоя (а) и сидя (б); сплошная линия — оптимальные, штриховая — максимальные зоны досягаемости

метров можно условно разделить на три группы: самофотографические, расчетные и экспериментальные (рис. 16.5). Каждая из этих групп имеет свои особенности при решении задачи ПАС [3].

Последовательность осуществления метода плоских манекенов при решении задачи ПАС. Исходными данными для построения плоских манекенов являются средний рост ($M_{ср.р}$), среднеквадратическое отклонение роста ($\sigma_{т.р}$), а также % охвата людей, которые могут быть пользователями данного станка.

Значения среднего роста людей и их среднеквадратические отклонения в различных регионах не только различны, но и подвержены изменению во времени. Поэтому данные по этим параметрам должны быть выявлены к моменту проектирования станка и указаны в техническом задании. Процент охвата людей, которые являются потенциальными операторами проектируемого станка, выявляется также в тех-

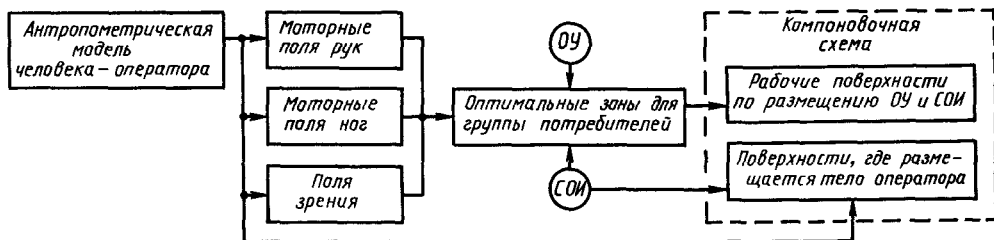


Рис. 16.4. Этапы решения задачи ПАС в разработке рабочего места (оборудования) СЧМ

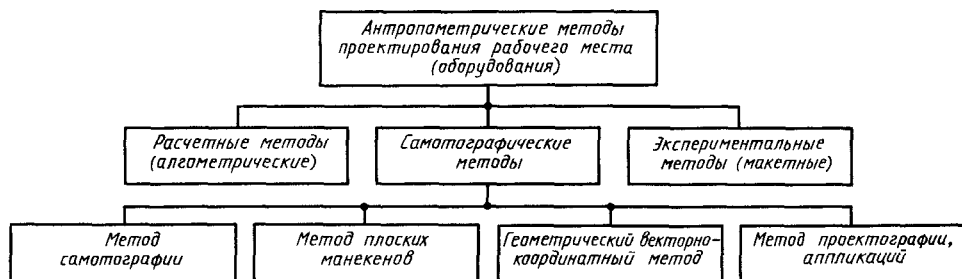


Рис. 16.5. Классификация антропометрических методов проектирования

ническом задании и согласуется с заказчиком. Следует помнить, что при меньшем значении процента охвата людей при проектировании станка и сам станок будет дешевле, чем при большем значении данного параметра, но сужение круга людей, для которых проектируется станок, не должно приводить к дефициту операторов на производстве.

Расчет размеров манекена, его изготовление и использование в решении задач ПАС осуществляются в приведенной ниже последовательности [5]:

1. Определяют максимальное и минимальное

значение роста людей заданной группы по формулам

$$M_{\max p} = M_{\text{ср } p} + t_{\gamma} \sigma_{\text{т } p}; \quad (16.1)$$

$$M_{\min p} = M_{\text{ср } p} - t_{\gamma} \sigma_{\text{т } p},$$

где t_{γ} берется из табл. 16.4 в зависимости от % охвата.

2. Определяют коэффициенты верхнего K_v и нижнего K_n отклонения по формулам

$$K_v = (M_{\max p} - M_{\text{ср } p}^0) / \sigma_{\text{т } p}^0; \quad (16.2)$$

$$K_n = (M_{\text{ср } p}^0 - M_{\min p}^0) / \sigma_{\text{т } p}^0,$$

где $M_{\text{ср } p}^0$, $\sigma_{\text{т } p}^0$ — соответственно средний рост и его среднеквадратическое отклонение для контингента, взятого за базовый в нашей стране с АХ, приведенными в табл. 16.1.

3. Определяют максимальные и минимальные значения элементов, указанных на чертежах манекенов (рис. 16.6) для базового контингента, по формулам

$$M_{\max i} = M_{\text{ср } i}^0 + K_v \sigma_{\text{т } i}^0; \quad (16.3)$$

$$M_{\min i} = M_{\text{ср } i}^0 - K_n \sigma_{\text{т } i}^0,$$

где $M_{\text{ср } i}^0$ и $\sigma_{\text{т } i}^0$ — соответственно среднее значение и среднеквадратическое отклонение размеров элементов базового манекена (значения $M_{\text{ср } i}^0$ и $\sigma_{\text{т } i}^0$ приведены в табл. 16.5).

5. Выполняют коррекцию антропометрических параметров в соответствии с поправкой на одежду и обувь (табл. 16.6).

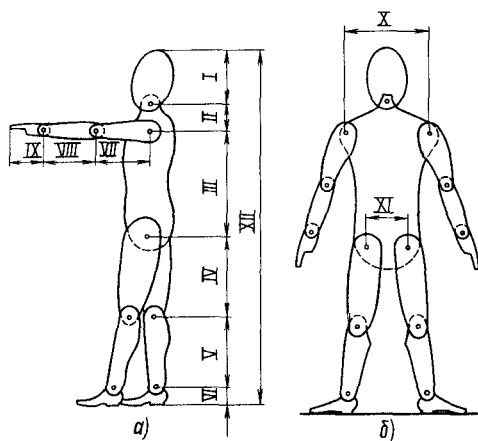


Рис. 16.6. Чертежи плоских манекенов

5. Изготавливают элементы манекенов. Выбирают удобный для работы масштаб (например, 1:10), рисуют на плотной бумаге или картоне элементы манекенов, определяют места расположения шарниров.

Должны быть изготовлены детали для четырех манекенов:

с максимальным размером роста (рис. 16.6, а);

с минимальным размером роста (рис. 16.6, а);

с максимальным размером роста (рис. 16.6 б);

с минимальным размером роста (рис. 16.6, б).

6. Собирают манекены путем скрепления элементов в местах шарниров.

7. На чертеже общего вида станка, выполненном в двух проекциях с необходимым числом сечений, строят эргономические схемы, определяют границы моторных полей* рук, ног и полей зрения для нормативных поз, формируют оптимальные рабочие зоны для группы пользователей. Последнее обеспечивается совместным анализом эргономических схем, построенных как для большего, так и для меньшего манекенов.

При использовании метода плоских манекенов необходимо учитывать маскирующие антропометрические признаки. К ним относятся:

высота фундамента оборудования над уровнем поля, которая может достигать 100—250 мм; уменьшение (увеличение) роста оператора на 40—50 мм вследствие расслабления (легкого поднятия) тела;

легкий наклон корпуса без напряжения на 2—10° вперед и в сторону при работе сидя и стоя (при таком наклоне расстояние до органов управления уменьшится на 100—120 мм);

небольшой шаг в сторону или перенос центра тяжести с одной ступни на другую, что позволяет уменьшить расстояние до боковых элементов управления на 150—250 мм;

расстояние между оператором и передней плоскостью станины, которое обычно составляет 150—250 мм;

высота деревянных решеток, подкладываемых под ноги, которая может составлять 50—80 мм.

**Моторное поле* рабочего места — рабочее пространство оператора, ограниченное дугами, описываемыми максимально вытянутыми руками при движении их в плечевом суставе. Зона легкой досягаемости моторного поля ограничена дугами, описываемыми расслабленными руками оператора при движении их в плечевом суставе. Оптимальная зона моторного поля ограничена описываемыми дугами предплечьев рук оператора при движении их в локтевых суставах.

16.5. Параметры элементов базового манекена

| № поз. на рис. 16.6 | Среднее значение размера $M_{ср.г}$, см | Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{г.г}$ |
|---------------------|--|--|
| I | 19,2 | 0,25 |
| II | 17,0 | 0,2 |
| III | 45,0 | 1,4 |
| IV | 42,0 | 1,8 |
| V | 40,6 | 1,7 |
| VI | 8,5 | 1,2 |
| VII | 27,7 | 1,2 |
| VIII | 24,9 | 1,7 |
| IX | 18,8 | 0,8 |
| X | 35,0 | 2,0 |
| XI | 16,5 | 1,5 |
| XII | 172,3 | 6,6 |

16.6. Поправки на размеры одежды для некоторых размеров тела

| Признак | Поправка на размер одежды, мм | |
|---|-------------------------------|---------------------|
| | легкой | тяжелой |
| Высота плеч в положении стоя | 30 | 49,5 и более |
| Рост в положении сидя (без головного убора) | — | 5,0—7,5 |
| Высота глаз в положении сидя | — | 5,0—7,5 |
| Высота плеч в положении сидя | 5,0 | 30,0—32,5 |
| Высота колена в положении сидя (одежда + обувь) | 25,0 | 37,5 и более |
| Длина руки (вместе с мышцами спины) | 7,5 | 12,5 (с перчатками) |
| Ширина плеч | 7,5 | 37,5 |
| Длина предплечья с кистью | 5,0 | 20—25 |
| Ширина грудной клетки | 7,5 | 15,0 |
| Длина бедра | 5,0 | 17,5 |
| Ширина бедер | 12,5 | 37,5 и более |
| Ширина коленей | 12,5 | 50,0 |
| Длина стопы (уличная обувь) | 30,0 | 30,0 |
| Высота каблуков | 25—30 | 25—30 |

Требования к средствам отображения информации. Средства отображения информации (СОИ) предназначены для предъявления человеку-оператору данных, характеризующих состояние или параметры объекта управления, ход рабочего процесса.

СОИ металлорежущих станков — это в основном визуальные индикаторы (изобразительные шкальные и цифровые приборы, многокатодные лампы, электронно-лучевые трубки и сигнальные лампы).

СОИ должны удовлетворять следующим инженерно-психологическим требованиям:

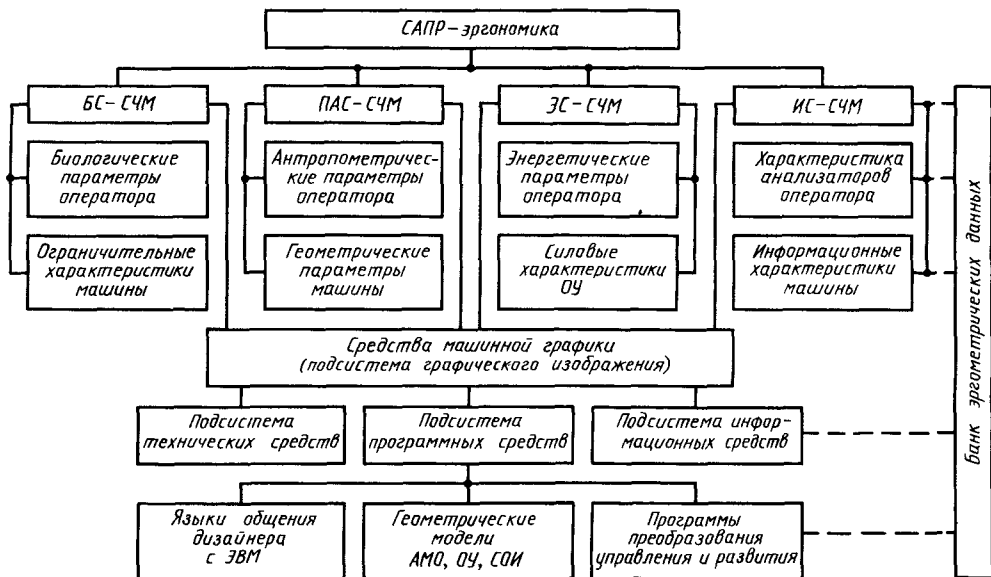


Рис. 16.7. Структура САПР — эргономика

должны обеспечить оператора необходимой и достаточной информацией для оценки ситуации и возможности принятия решения;

по количеству информации должны обеспечивать информационный баланс в системе, так чтобы не было перегрузки, а поток информации должен быть меньше пропускной способности оператора;

форма информации должна быть такой, чтобы она соответствовала психофизиологическим возможностям оператора по восприятию и быть такой, чтобы не требовалось дополнительного перекодирования,

сигналы должны быть лаконичными, так как быстрота и точность приема, переработки информации оператором приблизительно пропорциональны числу элементов, которые оператор должен держать под наблюдением;

должны давать оператору дополнительную информацию (по запросу), а также обеспечивать надежное восприятие аварийных сигналов.

При выборе и конструировании стрелочных и шкальных индикаторов следует пользоваться ГОСТ 22908—78, индикаторов на основе электронно-лучевых трубок — ГОСТ 23144—78.

Машинная графика в эргономическом проектировании. Повышение качества и сокращение сроков эргономического проектирования в настоящее время связываются с созданием и использованием систем автоматизированного проектирования (САПР).

Для решения различных эргономических задач, учитывающих человеческий фактор как

качественный показатель продукции и рассматривающий психологические, физиологические, антропометрические и гигиенические характеристики человека, ведут разработки по созданию проблемно-ориентированной системы автоматизированного проектирования САПР [2, 3, 4].

На рис. 16.7 приведена структура САПР-эргономика, которая включает следующие подсистемы:

БС — СЧМ — подсистема биологической совместности в системах человек — машина (СЧМ), которая обеспечивает решение задач по созданию оптимальных соотношений между физиологическим состоянием и работоспособностью оператора, с одной стороны, и факторами окружающей среды и машины — с другой, т. е. с учетом психофизиологических возможностей оператора устанавливаются номинальные и предельные параметры микроклимата (температура, влажность, давление, радиация и т. п.) вокруг оператора и параметры машин (вибрация, освещение, акустическая среда);

ПАС — СЧМ — подсистема пространственно-антропометрической совместности человека-оператора с машиной в СЧМ, которая обеспечивает решение задач по созданию объемно-пространственных структур объектов гражданского и промышленного строительства, производственного оборудования, рабочих мест с учетом антропометрических характеристик человека;

ЭС — СЧМ — подсистема энергетической совместимости человека-оператора с машиной в СЧМ, которая обеспечивает решение задач по проектированию конструкций и органов управления в соответствии с энергетическими возможностями человека (прилагаемая сила, скорость, точность движения, затрачиваемая мощность и т. д.),

ИС — СЧМ — подсистема информационной совместимости человека-оператора с машиной в СЧМ, которая обеспечивает решение задач по проектированию СОИ на основе психологических характеристик (зрительных, слуховых и других анализаторов)

Средства машинной графики в общей САПР представляют подсистему графического отображения, которая, в свою очередь, содержит подсистемы технических программных и информационных средств (см рис 16 7)

Рассматриваемый графоаналитический метод, основанный на применении средств машинной графики, позволяет на первом этапе решения задачи ПАС учесть многообразие и вариантность антропометрических признаков путем формирования антропометрической модели оператора (АМО) Для формирования трехмерного образа АМО достаточно задать четыре параметра (пол, национальность, перцентиль, возраст), в результате чего в модели будут учтены 44 антропометрических характеристики с точностью до 1 см Геометрическая модель человека-оператора выводится на дисплей или через графопроектор в виде шарнирной или аппроксимированной модели

Для решения следующих этапов задачи ПАС геометрическая модель человека-оператора используется в качестве инструмента моделирования сенсомоторных зон по размещению органов управления ОУ и СОИ

Требования к органам управления станком.

Органы управления предназначены для передачи управляющих воздействий от оператора к станку и обеспечивают человеку-оператору выполнение требуемого действия с заданной точностью и в пределах допускаемого времени С их помощью осуществляется ввод информации, ее вывод на средства отображения информации, приведение в действие исполнительных органов станков

К ОУ станка относятся клавишные и кнопочные выключатели и переключатели, тумблеры, поворотные выключатели и переключатели, рычаги управления, маховики управления и штурвалы, педали

ОУ выбирают в зависимости от структуры и особенностей деятельности оператора при нормальной работе систем и при их отказе, антропометрических и психофизиологических

характеристик человека, управляющих действий оператора, рабочего положения тела человека, динамических характеристик рабочих движений, места расположения органа управления (на панели пульта, непосредственно на станке), а также от информации, которая вводится в станок

Общие эргонометрические требования к органам управления приведены в ГОСТ 22614—77

Базовые значения антропометрических показателей оборудования, связанных с органами управления, приведены ниже

Характеристики пульта, мм общая высота пульта в рабочем положении сидя — 1650, в положении стоя — не более 1800, высота столешницы пульта в рабочем положении сидя — 530—760, в положении стоя — около 1100, ширина пульта (обслуживаемого только в рабочем положении «сидя») — 380—660, расстояние от уровня сиденья кресла оператора до нижнего края столешницы пульта (обслуживаемого только в рабочих положениях сидя и сидя или стоя) — 150—250, высота размещения ОУ в рабочем положении стоя — 1000—1600, в положении сидя — 530—1040, высота размещения СОИ в рабочем положении стоя — 1100—1800, в положении сидя — 850—1650 мм

Достигаемость ОУ по горизонтали — полукруг радиусом 600 мм

Расстояние между ОУ, мм для кнопок — не менее 15, для тумблеров — не менее 19 при размещении во фронтальную линию и не менее 25 при размещении в глубину пульта, для поворотных переключателей — не менее 20 при действиях одной рукой и не менее 70 при действиях двумя руками, для рычагов — не менее 50 при действиях одной рукой и не менее 100 при действиях двумя руками, для маховиков и штурвалов — не менее 50 при действиях одной рукой и не менее 100 при действиях двумя руками, для педалей — не менее 200 при действиях одной ногой и не менее 450 при действиях двумя ногами

Размеры ОУ, мм, диаметр кнопок под указательный палец 10—15, под большой палец — 30, под ладонь — 50, ширина клавиш — 10—20, для поворотных переключателей типа I (с приводным элементом в виде указателя) длина указателя — 20—90, ширина — 2—15, высота указателя — 10—40, для поворотных переключателей типа II (с приводным элементом в виде круглой ручки для захвата пальцами) диаметр — 50—120, высота — 38—55, для поворотных переключателей типа III (с приводным элементом в виде круглой ручки для захвата двумя-тремя пальцами) диаметр — 6—50, высота — 12—25, для тумблеров широкого применения длина приводного элемента — 10—25, минимальный диаметр — 3—8, для тумблеров

специального назначения длина приводного элемента — 25—50, минимальный диаметр — 8—15, для рычагов управления с округлой рукояткой диаметр рукоятки — 30—40, высота — 40—50, для рычагов управления с удлиненной рукояткой диаметр — 20—28, высота рукоятки — 50—100, для маховиков управления и штурвалов при работе двумя руками диаметр обода маховика или расстояние между рукоятками штурвала — 350—400, для маховика при работе одной рукой диаметр обода — 75—80, длина рукоятки на маховике — 50—120, диаметр рукоятки — 18—30, для редко используемых педалей ширина — 90, длина — не менее 75, для часто используемых педалей ширина — 90, для — 280—300

Базовые значения биомеханических показателей оборудования, связанных с органами управления, следующие: Сила перемещения, Н для кнопок под указательный палец — 1—8, под большой палец — 8—25, под ладонь — 10—50, для клавишных переключателей типа I (с осью поворота в конце клавиши) — 2,5—4,0, типа II (с осью поворота в середине клавиши) — 4—16, для поворотных переключателей типа I — 2,0—20, типа II — 1,6—16, типа III — 1—2, для выключателей и переключателей типа «тумблер» широкого применения — 2—3,5, специального назначения — 3,3—5,0, для рычагов управления при работе пальцами — 5—30, кистью — 5—40, кистью с предплечьем — 15—60, всей рукой — 20—150, двумя руками — 45—200, для маховиков управления и штурвалов при работе кистью — до 10, кистью с предплечьем — 5—60, всей рукой — 10—150, двумя руками — 60—200, для ножных педалей при движении стопы — до 100, всей ноги — до 500

Расстояние, на которое перемещаются ОУ кнопки под указательный палец — 2—6 мм, под большой палец — 3—8 мм, под ладонь — 5—10 мм, клавишные переключатели типа I — 3—6 мм, типа II — 4—10 мм, для поворотных переключателей типа I оптимальный угол поворота от среднего положения — 45°, допустимый угол — 60°, для поворотных переключателей типов II и III оптимальный угол поворота при точной регулировке — 60—80° от среднего положения, допустимый угол — 120°, для рычагов управления минимальный допустимый ход — 50 мм, оптимальный ход для коротких рычагов (длиной до 200 мм) — 150—200 мм, длиной свыше 200 мм — 300—350 мм, для штурвалов при работе без перехвата рук угол поворота не более 60° в обе стороны от среднего положения, при работе с перехватом рук — не более 120°, для ножных педалей оптимальный ход при движении стопы — 15—60 мм, при движении всей ногой — до 180 мм

Направление перемещения и положение ОУ при реализации человеком-оператором управ

ляющих воздействий «Пуск», «Включено», «Увеличение», «Плюс», «Подъем», «Открытие», «Вперед», «Вправо», «Вверх» для кнопки — нажатое положение, для тумблеров — перемещение снизу вверх, слева направо, от себя, для рычагов — перемещение снизу вверх, слева направо, от себя, для поворотных переключателей — перемещение по часовой стрелке, для маховиков и штурвалов (кроме управляющих клапанов) — перемещение по часовой стрелке, для маховиков и штурвалов, управляющих клапанами, — перемещение против часовой стрелки, для ножных педалей — нажатое состояние

Направление перемещения и положение ОУ при реализации управляющих воздействий «Стоп», «Отключено», «Уменьшено», «Минус», «Спуск», «Закрывание», «Назад», «Влево», «Вниз» для кнопок — отпущенное положение, для клавиш — отпущенное положение, для тумблеров — перемещение сверху вниз, справа налево, на себя, для рычагов — перемещение сверху вниз, справа налево, на себя, для поворотных переключателей — перемещение против часовой стрелки, для маховиков и штурвалов (кроме управляющих клапанами) — перемещение против часовой стрелки, для маховиков и штурвалов, управляющих клапанами, — перемещение по часовой стрелке, для ножных педалей — отжатое положение

Частота использования ОУ, мин⁻¹ для кнопки под указательный палец — не более 10, под большой палец — не более 5, под ладонь — не более 3, для клавиш типа I — не более 10, типа II — не более 1, для тумблеров широкого применения — не более 10, специального назначения — не более 1, для поворотных переключателей типа I (силой перемещения 13, 18, 22 Н) и типа II (силой перемещения 5, 3, 10, 16,6 Н) — соответственно не более 5, не более 2, не более 1, для рычагов управления, маховиков и штурвалов в зависимости от силы — 5—960 раз в течение 8 ч (смена)

16.3. Эстетические требования, предъявляемые к проектируемым станкам

Форма спроектированного станка должна обладать целым рядом специфических свойств, характерных для высокоорганизованной композиции. Такая форма всегда целостна, ее элементы должны быть уравновешены, едины по характеру, пропорциональны, масштабны. И только в этом случае форма несет определенную образную информацию.

Значимость того или иного свойства композиции неодинакова для различных изделий, но перечисленные выше свойства обязательны

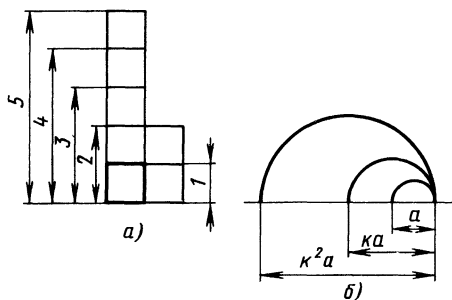


Рис. 16.8. Модульная (а) и геометрическая (б) пропорции

для всех. Гармония нарушится, если форма утратит хотя бы одно из них. Что касается таких пар противоположных свойств, как динамичность и статичность, симметричность и асимметричность, то в тех частных случаях, когда в форме одного изделия сочетаются эти противоположные свойства, одно из них должно доминировать. Так, для станка с определенными динамичными элементами формы это свойство композиции совсем не главное, а сопутствующее. Здесь динамичность элемента формы станка отражает не его сущность, а лишь характерную особенность данной конструкции.

Основными средствами композиции, используемыми для создания гармоничной целост-

ности формы станка, т. е. формы, которая возникает в результате соподчинения всех частей целого, являются масштаб, метрический повтор, ритмический порядок, пропорции, отношение, тождество, нюанс, контраст.

Пропорции выражают количественную взаимосвязь частей и целого, выступающую в виде различных математических отношений и проявляющуюся в закономерном строении форм. Пропорции бывают арифметические (модульные), где взаимосвязь частей и целого выражена повторением единого заданного размера (модуля), и геометрические, основанные на геометрическом подобии элементов формы.

Построение модульной и геометрической пропорции показано на рис. 16.8.

Примером использования пропорционирования как доминирующего средства композиции является токарный автомат фирмы Togpos (Швейцария) (рис. 16.9).

Для обеспечения соразмерности конструктивных элементов следует использовать систему предпочтительных пропорций.

Система предпочтительных пропорций является прямым развитием и продолжением международной системы предпочтительных чисел (СТ СЭВ 544—77). Она основана на том, что какие бы размеры конструкций ни получились в результате расчетов, в проекте они должны быть откорректированы (уменьшены или, что более вероятно, увеличены) так, чтобы совпа-

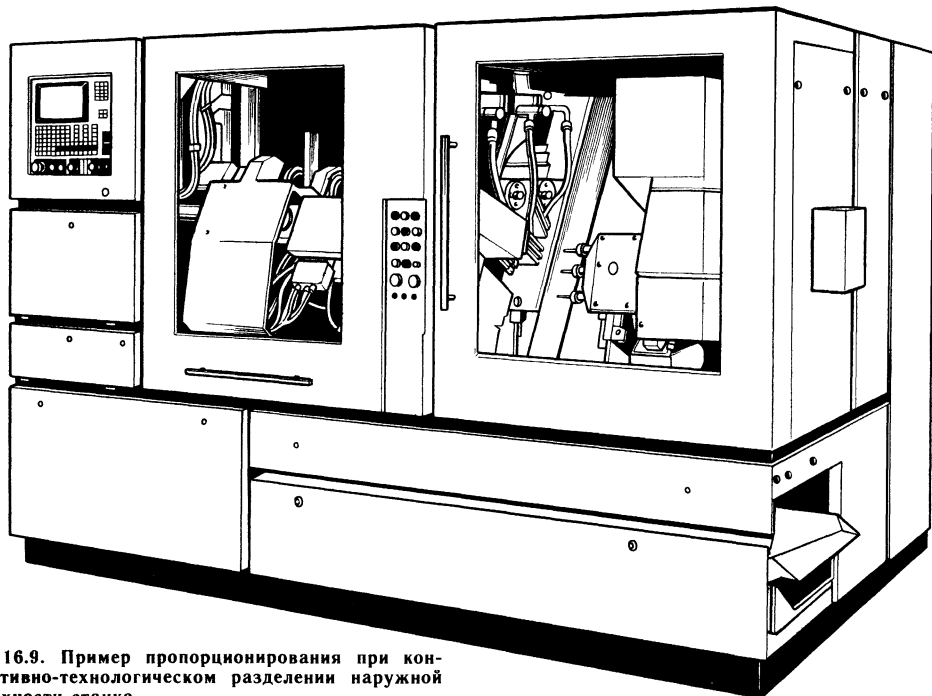


Рис. 16.9. Пример пропорционирования при конструктивно-технологическом разделении наружной поверхности станка

16.7. Система предпочтительных пропорций

| Ряды системы | | | | | Пропорции | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----------|--------|--------|--------|-------|
| П5 | П10 | П20 | П40 | П80 | | | | | |
| + | + | + | + | + | 1/1 | 8/5 | 5/2 | 4/1 | 19/3 |
| | | | | + | 35/34* | 13/8 | 13/5 | 41/10* | 13/2 |
| | | | | + | 18/17 | 5/3 | 8/3 | 17/4 | 20/3 |
| | | | | + | 12/11 | 7/4 | 11/4 | 13/3 | 34/5* |
| | | + | + | + | 9/8 | 9/5 | 14/5 | 9/2 | 7/1 |
| | | | | + | 15/13 | 11/6 | 29/10* | 14/3 | 22/3* |
| | | | | + | 13/11 | 15/8 | 3/1 | 19/4 | 15/2 |
| | | | | + | 11/9 | 25/13* | 31/10* | 24/5* | 31/4* |
| | + | + | + | + | 5/4 | 2/1 | 19/6 | 5/1 | 8/1 |
| | | | | + | 9/7 | 35/17* | 13/4 | 26/5* | 33/4* |
| | | | | + | 4/3 | 15/7 | 10/3 | 16/3 | 17/2 |
| | | | | + | 11/8 | 11/5 | 17/5 | 11/2 | 35/4* |
| | | + | + | + | 7/5 | 9/4 | 7/2 | 17/3 | 9/1 |
| | | | | + | 10/7 | 7/3 | 11/3 | 29/5* | 37/4* |
| | | | | + | 3/2 | 19/8 | 15/4 | 6/1 | 19/2 |
| | | | | + | 11/7 | 17/7 | 27/7* | 31/5* | 39/4* |

*Члены ряда использовать не рекомендуется

дали с членами одного из рядов предпочтительных чисел

В системе пять основных рядов геометрических прогрессий $R_5, R_{10}, R_{20}, R_{40}, R_{80}$, имеющих соответственно 5, 10, 20, 40, 80 членов и знаменатели прогрессий

Для каждого из членов рядов подобраны соответствующие отношения из ряда натуральных чисел от 1 до 50, образующие систему предпочтительных пропорций с соответствующими рядами П5, П10, П20, П40 и П80 (табл 16 7)

Порядок использования системы предпочтительных пропорций следующий

на основании технико-экономических расчетов и компоновочных прикидок устанавливают габаритные пропорции конструкции, откорректированные по таблице предпочтительных пропорций (по возможности выбирают ряд П5, П10),

по таблице предпочтительных пропорций подбирают семейство отношений, кратных этой пропорции, например, если габаритные пропорции составляют на главном виде 3:1, то выписывают отношения 3:1, 3:2, 4:3, 5:3, 8:3 и т д, причем семейство подбирают так, чтобы его охватывал также возможно меньший по численности ряд членов предпочтительных пропорций (П5 лучше, чем П10, П10 лучше чем П20, и т д),

в соответствии с принятым семейством предпочтительных пропорций прорабатывают все элементы, которые определяют внешний вид станка

Ввиду того что знаменатель самого редкого ряда П5, равный $\sqrt[5]{10} \approx 1,6$, с ошибкой

меньшей, чем 0,8 %, может быть принят за известное отношение «золотого» сечения $\Phi = 1,618$ с соответствующим приближенным значением 8:5, то «золотое» сечение может считаться частным случаем системы предпочтительных пропорций по любому из рядов этой системы

При композиционном построении формы станка необходимо в первую очередь устанавливать группу размеров, определяющую конструктивно-технологические и эксплуатационные характеристики станка, например

размеры, связанные с антропометрическими данными оператора,

размеры основных функциональных узлов, размеры применяемых стандартных и унифицированных деталей, узлов и блоков,

присоединительные размеры,

размеры, определяющие стилевые признаки оборудования

Пропорции в композиции станков и других промышленных изделий выступают в неразрывном единстве с другим важнейшим средством гармонизации формы промышленных изделий — масштабностью

Масштабность формы станка и его частей проявляется в соразмерности или относительном соответствии тем элементам, размеры и размещение которых определяются антропометрическими данными человека оператора (переключатели, маховики, смотровые окна и т д), которые являются «указателями масштаба»

Поиск масштабных соотношений в художественном конструировании осуществляется двумя способами

заданы основные габариты будущего изделия,

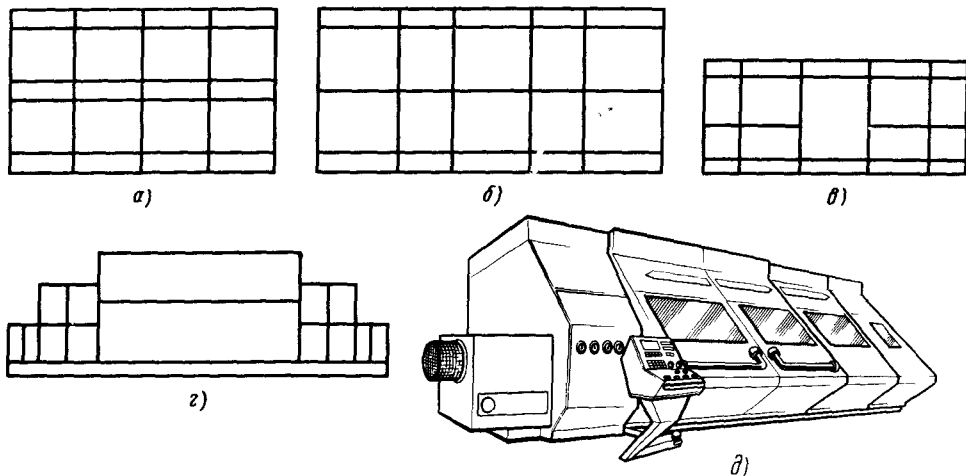


Рис. 16.10. Примеры метрических и ритмических рядов:

а — метрический ряд без интервалов; *б* — метрический ряд с интервалами; *в* — ритмический ряд равных по высоте элементов, повторяющихся на возрастающих и убывающих интервалах; *г* — ритмический ряд, образованный сочетанием метрических рядов элементов, возрастающих по высоте; *д* — пример использования метрического ряда в композиции станка

и тогда ищут на модели и чертежах масштабную характеристику, которая соответствовала бы заданной величине изделия;

заданы элементы формы, характер членений, и тогда в соответствии с ними подбирают оптимальные размеры изделия.

Метрическим рядом (порядком) называют расположение одинаковых форм на равных интервалах. Ритмический ряд образуется при закономерном убывании или возрастании элементов формы или интервалов.

Метрический и ритмический ряды создают впечатление организованности и порядка.

Метрический и ритмический ряды воспринимаются в том случае, если число элементов ряда не менее 3—4. Если элементов более 10—15, во избежание впечатления монотонности и однообразия рекомендуется группировать их в группы по 7 ± 2 элемента, выделять некоторые элементы цветом, вводить увеличенные по размерам или отличающиеся по форме элементы. Примеры метрических и ритмических рядов приведены на рис. 16.10.

Хорошо выраженная метрическая или ритмическая структура при расположении, например, на пультах управления органов управления и средств индикации, значительно увеличивает скорость реакции и время нахождения требуемого элемента.

Тождество, нюанс и контраст используют как специфические средства композиции, существенно усиливающие выразительность формы станков и других промышленных изделий.

Тождество — полная аналогия формы, размеров и других качеств элементов формы.

Нюанс — незначительное различие.

Контраст — значительное различие в форме, размере или другой характеристике двух, а иногда и более элементов изделия.

Различают следующие виды контрастов:

контраст массы (тяжелый элемент вблизи легкого);

контраст формы (острое ребро вблизи закругленного);

контраст размера (широкая и узкая поверхности, короткая и длинная полосы);

контраст яркости (светлая и темная поверхности);

контраст цвета (белые и черные полосы);

контраст направления (горизонтальные и вертикальные полосы, наклон слева направо и справа налево);

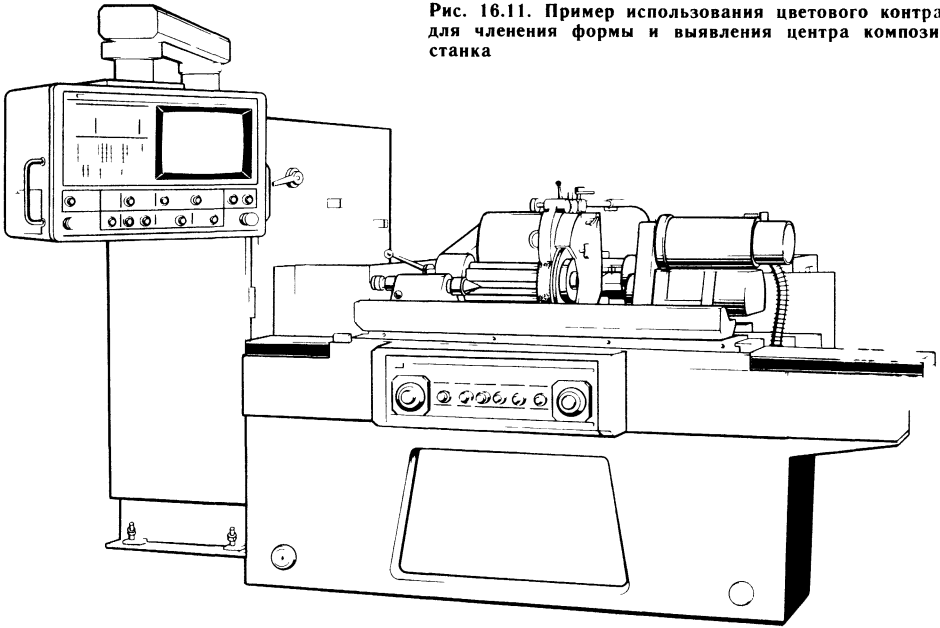
контраст материалов (коррозионно-стойкая сталь и бетон);

контраст фактуры самого материала (гладкая и шероховатая поверхности, блестящая и матовая поверхности).

Некоторые виды контраста могут быть использованы для членения формы при ее пропорционировании. Так, членение может производиться прямолинейной полосой, отличающейся от основной поверхности фактурой, цветом и т. д. В свою очередь, членение формы позволяет выявить композиционный центр создаваемой конструкции. Примером использования контраста цветов для указанных целей может служить станок, показанный на рис. 16.11.

Подчеркивание композиционного центра в промышленном изделии ведет к наиболее полному раскрытию сущности и функционального назначения конструкции. У станков ком-

Рис. 16.11. Пример использования цветового контраста для членения формы и выявления центра композиции станка



позиционным центром является рабочая зона, у контрольных устройств — лицевая панель. Остальные детали и элементы находятся в соподчинении с композиционным центром, усилив его значимость. Такой подход к композиции необходим, так как оригинальность конструкции, ее новизна и самобытность отражаются в основном в композиционном центре, который является и смысловым центром всего изделия.

У вертикально-фрезерных станков, показанных на рис. 16.12, основные контурные линии скоординированы между собой. Их общая композиция (отношение объемов, характер формы и пр.) достаточно индивидуальна. Характер формы станка, показанного на рис. 16.12, *а*, определяется сочетанием участков прямых контурных линий с небольшими участками лекальных, а у станка, показанного на рис. 16.12, *б*,

лекальные формообразующие преобладают. Однако в обоих случаях благодаря координации всех участков контуров ничто не нарушает восприятия формы как целостной, имеющей композиционный центр и соподчинение элементов композиции.

Симметрия — одно из наиболее ярких и наглядно проявляющихся свойств композиции. Симметрия означает принцип организации элементов композиции, при котором взаимное размещение таково, что присутствуют ось симметрии, центр симметрии и плоскость симметрии.

Примером абсолютных симметрий могут служить геометрические фигуры: равнобедренный треугольник (одна ось симметрии), прямоугольный треугольник (две оси симметрии), равносторонний треугольник (три оси симметрии), квадрат (четыре оси симметрии), куб (девять плоскостей симметрии) и т. д.

Форма станков, машин и другого оборудования, как правило, имеет отступления от симметрии, вызванные условиями их функционирования, а следовательно, и особенностями конструкции.

Дисимметрия человеческого тела накладывает отпечаток на компоновку станков. Например, органы управления располагают, как правило, на правой стороне, наиболее важные индикаторы, требующие постоянного внимания, по возможности в верхней левой части панели (см. рис. 16.9). Однако нет оснований причислять к асимметрии форму промышленного изделия, если в ней нет математической симметрии.

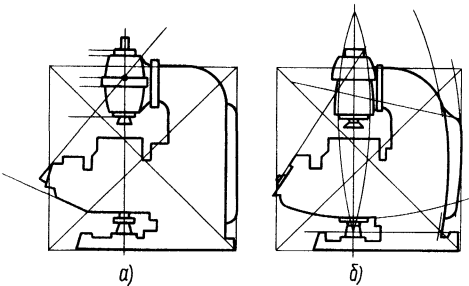


Рис. 16.12. Соподчиненность элементов композиции в формах вертикально-фрезерных станков

рии, а на глаз она воспринимается как симметричная (рис. 16.13).

В конструировании станков для выявления формы используют как симметрию, так и асимметрию. С законами симметрии и асимметрии неразрывно связаны два наиболее общих принципа построения формы — статичность и динамичность.

Статичная форма характеризуется уравновешенностью объемов, горизонтальным и вертикальным линейным построением, нейтральным ритмом элементов. Статичны по своей форме и большинство станков, хотя они и обладают внутренней динамикой.

Динамичная форма характеризуется диагональной направленностью доминирующих линий, изменяющимся ритмом расположения элементов, асимметрией.

Как правило, композиция промышленного изделия основывается на сочетании симметрии и асимметрии. Так, станина станка выполняется всегда с учетом закономерностей симметрии в статической композиции, подвижные части станка — в соответствии с закономерностями асимметрии в динамической композиции (рис. 16.14).

Обусловленное конструкцией и композиционными приемами сочетание различных геометрических элементов формы изделия определяет специфику объемно-пространственной структуры этого изделия.

Объемно-пространственная структура является одной из основных категорий композиции и отражает взаимодействие двух компонентов, участвующих в построении формы — объемов и пространств. Объемно-пространственная структура связана с другой основной категорией композиции — тектоникой.

Тектоникой называют зримое отражение в форме изделия работы его конструкции и организации материала. Понятие «тектоника» неразрывно связывает две важнейшие характеристики промышленного изделия — его конструктивную основу и форму во всех ее сложных проявлениях (пропорциях, метрическом ритме, контрасте и т. д.).

Под *конструктивной основой* понимают структуру несущей части конструкции, характер распределения главных сил, соотношение масс, организацию конструкционных материалов и т. п.

Форма должна четко отражать все эти особенности конструктивной основы (на рис. 16.15, а показана форма станка с конструктивной основой, изображенной на рис. 16.15, б).

Равновесие элементов композиции. Все элементы композиции станка должны быть расположены так, чтобы достигался эффект зрительного равновесия всех его частей. При этом следует учитывать особенности зрительного вос-

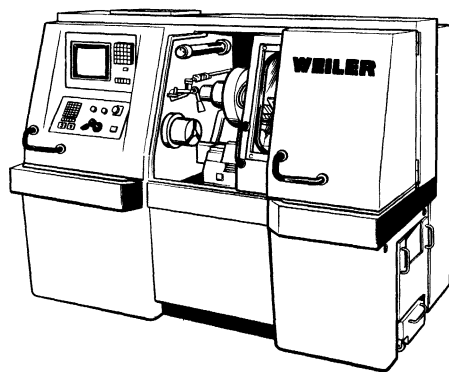


Рис. 16.13. Пример использования симметрии в композиции станка

приятия. Так, при равных объемах больший «зрительный вес» имеют элементы, в которых отношение размеров по трем координатам приближается к единице или равно ей (куб, шар), меньший — элементы, которые по соотношению размеров приближаются к линейным.

Зрительный вес каждого элемента возрастает с увеличением расстояния от центра композиции. Вертикальные формы воспринимаются тяжелее горизонтальных и наклонных. При равенстве объемов или площадей элементы, расположенные справа, кажутся тяжелее элементов, расположенных слева, элементы, расположенные выше, кажутся тяжелее элементов, расположенных внизу. Зрительный вес элемента композиции постепенно увеличивается в зависимости от его окраски в соответствии со следующим цветовым рядом: голубой — желтый — красный — оранжевый — зеленый — синий — фиолетовый. Большой вес элементам придают цвета, насыщенные и с большей степенью ароматизма.

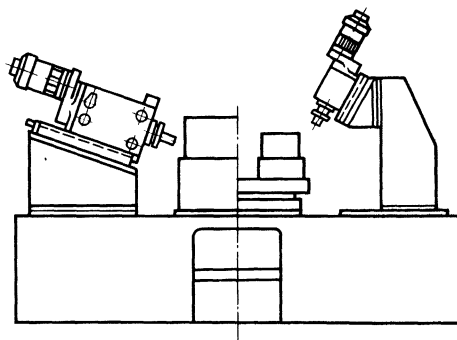


Рис. 16.14. Пример динамической композиции подвижных частей и статической композиции станин агрегатных станков

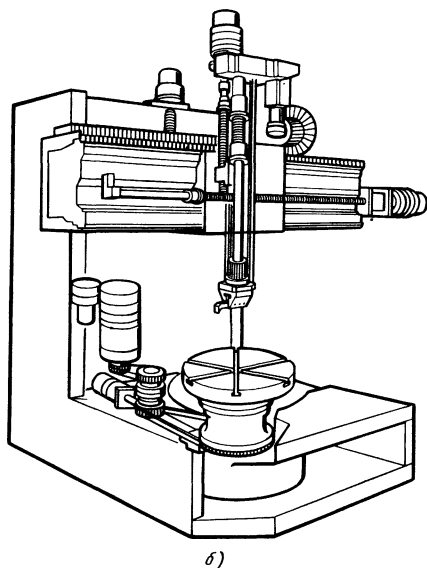
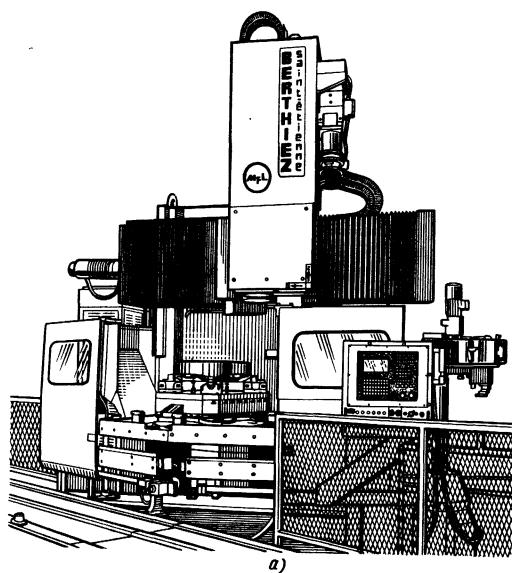


Рис. 16.15. Форма станка (а) и его конструктивная основа (б)

При несоблюдении принципа равновесия элементов композиции последняя кажется неустойчивой, случайной и вид ее раздражает наблюдателя. Композиционное равновесие достигается при художественно-конструкторской проработке станка на чертежах, макетах, эскизах.

На рис. 16.16 показаны примеры решения задачи равновесия элементов композиции станка.

Цвет в художественном конструировании станков. Цвет в художественном конструировании станков и других промышленных изделий используют как средство целостного объединения рабочего места оператора или дробления его элементов, стимуляции гигиены, улучшения освещенности, создания различных термических иллюзий, психологических воздействий, пластичности формы изделий и его тектоники, гармонизации интерьера, информации об опасности или безопасности, маскировки и т. п.

Рациональное решение этих вопросов позволяет создать определенный «цветовой климат», влияние которого на работу и эмоции человека очень велико.

Все цвета делятся на ахроматические (белый, серый, черный) и хроматические — спектральные.

Хроматические цвета характеризуются *цветовым тоном*. В основе цветового тона лежит длина волны светового потока. В практике световой поток имеет некоторый диапазон или набор длин волн.

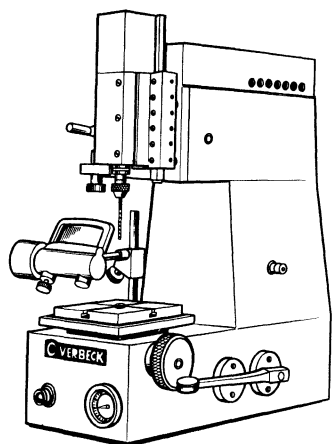
В табл. 16.8 приведены ориентировочные границы участков характерных цветов непрерывного спектра.

Второй важной характеристикой цвета является чистота цвета — *насыщенность (P)*, которая проявляется при смещении спектрального цвета с белым. Насыщенность измеряется

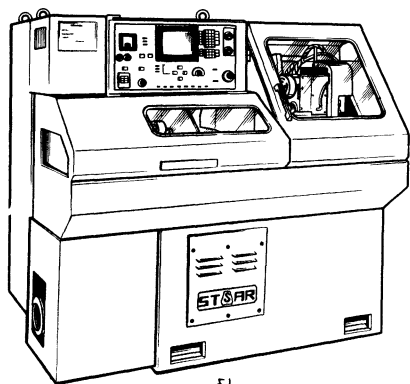
16.8. Границы участков характерных цветов непрерывного спектра

| Цвет | Длина волны λ , нм |
|----------------------|----------------------------|
| Красный | 770 — 620 |
| Красно-оранжевый | 620 — 600 |
| Оранжевый | 600 — 590 |
| Оранжево-желтый | 590 — 580 |
| Желтый | 580 — 570 |
| Желто-зеленый | 570 — 550 |
| Зеленый | 550 — 520 |
| Зелено-голубой | 520 — 500 |
| Голубой | 500 — 485 |
| Синий | 485 — 470 |
| Сине-фиолетовый | 470 — 440 |
| Фиолетовый | 440 — 380 |
| Фиолетово-пурпурный* | 380 — 520' |
| Пурпурный* | 520' — 560' |
| Пурпурно-красный* | 560' — 770 |

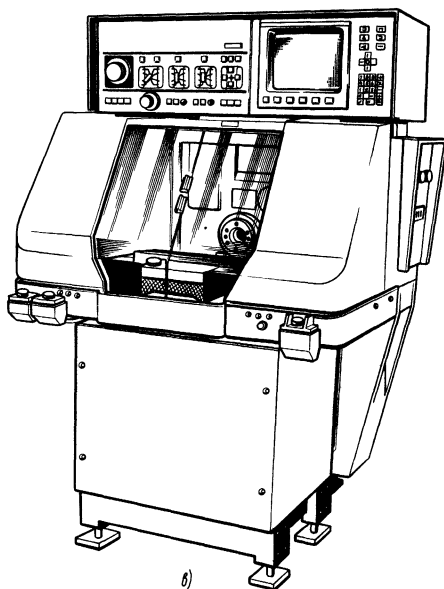
*Пурпурные цвета получаются от смешения красного ($\lambda = 700$ нм) и фиолетового ($\lambda = 400$ нм) цветов в разных пропорциях. Они обозначаются длиной волны дополнительного спектрального цвета.



a)



б)



в)

Рис. 16.16. Решение задачи равновесия элементов композиции станков:

а — равновесие по вертикали достигается уменьшением четко выраженной верхней части станка, б — равновесие элементов станка по фронту достигается их формой, размером, цветом; в — равновесие верха и низа полностью не достигнуто (верхняя часть станка выглядит несколько перегруженной)

в процентах или долях единицы, и ее значение соответствует проценту или доле присутствия спектрального цвета в смеси его с белым.

Цветовой тон и насыщенность определяют качественную характеристику — *цветность*.

Третьей характеристикой цвета (количественной) является *яркость* V . Яркость является мерой излучения светящейся поверхности или поверхности, светящейся отраженным светом. Яркость определяется отношением силы света I (кд) к площади видимой поверхности S (m^2) (проекции наблюдаемой поверхности на плоскость, перпендикулярную к направлению, в котором определяется яркость), т. е. $V = I/S$.

Яркостный контраст k_r определяет различимость двух сравниваемых пятен по светлоте и выражается отношением разности их яркостей к большей яркости, а при освещении сравниваемых цветовых пятен одним источником света — отношением разности коэффициентов отражения r_1 и r_2 этих пятен к большему коэффициенту отражения r , т. е. $k_r = (B_1 - B_2)/B_1 = (B_0 r_1 - B_0 r_2)/(B_0 r_1) = (r_1 - r_2)/r_1$.

Для выбора требуемого яркостного контраста

на рис. 16.17 приведена номограмма, в которой различают четыре зоны яркостного контраста:

1 — зона малых контрастов ($k_r = 0...0,25$) — используется при цветовом решении интерьера и окраски деталей внешнего вида станка, когда нет требований к их заметности;

2 — зона нормальных контрастов ($k_r = 0,25...0,45$) — используется при многоцветной окраске производственных интерьеров и машин, это спокойные, четко видимые контрасты;

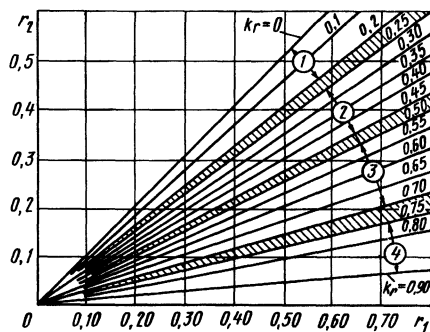


Рис. 16.17. Зоны яркостного контраста



Рис. 16.18. Цветовой круг:
Ср — серый

мальных цветов. Эта теория рекомендует применять гамму цветов желто-зеленого диапазона разной насыщенности. Принцип подбора палитры цветов в этом случае соответствует нюансной гармонии, которая основывается на сочетании соседних или близко лежащих на цветовом круге цветов (рис. 16.18) по схеме, показанной на рис. 16.19,а. Пример применения рассмотренного принципа окраски станков приведен на рис. 16.20 (см. форзац).

3 — зона повышенных контрастов ($k_r = 0,5 \dots 0,7$) — используется для подбора колеров элементов оборудования, требующих высокой надежности их выделения и распознавания, например органов управления;

4 — зона резких контрастов ($k_r \geq 0,75$) — используется преимущественно в приборах информации и аварийных органах управления.

Недостатком окраски станков согласно этой теории является монохронность (однотонность) цветов, которая при длительном воздействии приводит к адаптации зрения к этим цветам и лишает оператора к концу смены их благоприятного воздействия.

Для достижения эффектности, броскости, остроты впечатления применяют цветовую гармонию, основанную на применении контрастных сочетаний цветов (рис. 16.19,б), что соответствует теории динамического цвета. В соответствии с этой теорией колористика цветов интерьера и станков способна держать оператора в повышенном возбуждении с целью повышения производительности труда благодаря применению раздражающих и бодрящих цветов — пурпурного, красного, оранжевого, а также контрастных сочетаний цветов.

В цветовом круге (см. рис. 16.18) эти цвета расположены диаметрально противоположно. При таком сочетании цветов с наибольшим эффектом проявляется динамичность (рис. 16.21, см. форзац).

При выборе контрастной гармонии станков необходимо принимать во внимание не единич-

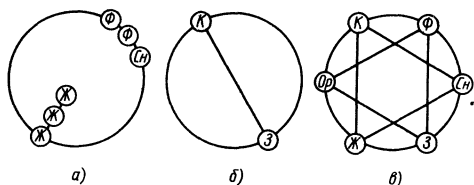


Рис. 16.19. Схемы цветовой гармонии:
а — нюансная гармония; б — контрастная гармония, в — гармония цветовая триада

Рекомендации по окраске станков и интерьера. Благоприятное воздействие на физиологию и психику работающего достигается использованием цветов, рекомендуемых теорией опти-

При выборе контрастной гармонии станков необходимо принимать во внимание не единич-

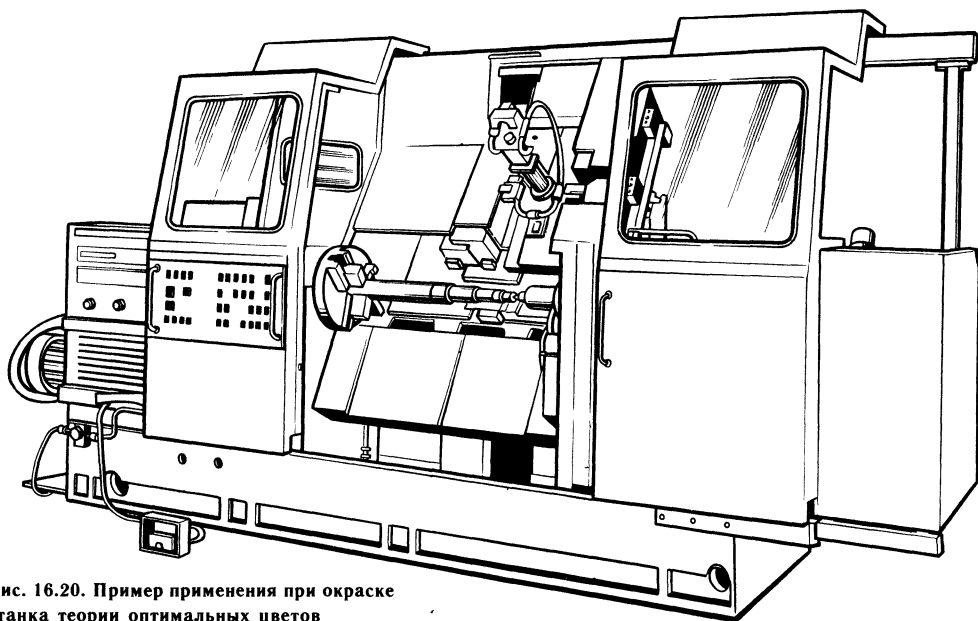


Рис. 16.20. Пример применения при окраске станка теории оптимальных цветов

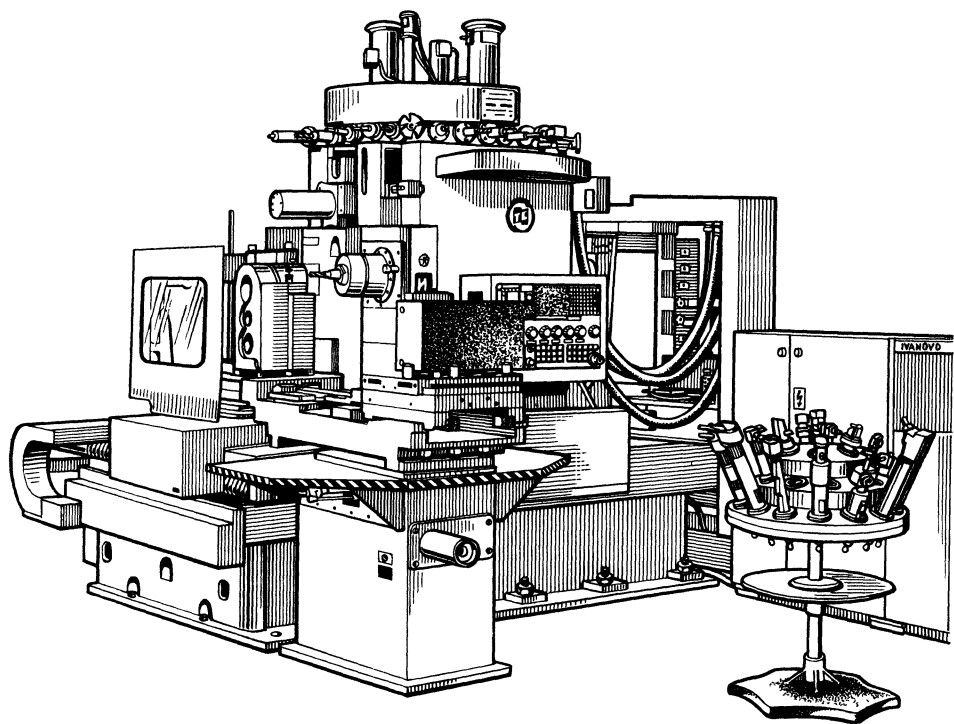


Рис. 16.21. Пример применения при окраске станка теории динамического цвета

ное изделие, а комплекс, среду цеха в целом или его отдельного участка. Кроме того, применение цветового контраста требует подходов, при которых сохранялась бы целостность формы.

Гармоничное контрастное цветовое противопоставление крупных объемов (или плоскостей) возможно с помощью либо «мостиков» тех же цветов — вкраплений одного цвета в другой, либо нюансных цветовых переходов. Без этого контрастная цветовая композиция, как правило, становится примитивной, огрубляет форму.

В последнее время выбор колористики цветов станков и интерьера основан на колористике природы, т. е. имеется разнообразие и гармоничное сочетание цветов. Этот принцип лежит в основе теории согласованных цветов. В определенной мере этой теории соответствует гармония «цветовой триады» (рис. 16.19, в), в которой основные цвета, принятые для создания цветовой композиции станков и интерьера, а также другого оборудования, представляют триаду цветов, равноотстоящих друг от друга на цветовом круге (см. рис. 16.18), например красный — синий — желтый или оранжевый — фиолетовый — зеленый.

В ряде случаев сочетания цветов могут быть получены благодаря усложнению схем цветовых гармоний путем разворачивания нюан-

сных схем в ряды (например, коричневый — оранжевый — светло-коричневый, бежевый — цвет слоновой кости — желтый), представления «цветовых триад» сочетаниями, воспринимаемыми в отношениях, близких по характеру к указанным основным триадам (например, коричневый — серо-голубой — желтый (рис. 16.22, см. форзац), а также противопоставлением на основе контраста не отдельных цветов, а целой группы цветов, сближенных на основе нюансной гармонии.

Решающими факторами в выборе цвета являются характер трудового процесса и требования к зрительному аппарату работающего. В зависимости от этих требований рекомендуется применять для окраски станков следующие цвета и их сочетания:

при работе с повышенными физическими нагрузками преимущественно «холодные» цвета — голубой, серо-голубой, зелено-голубой, серо-зеленый, а также цвета подобных оттенков малой насыщенности;

при работе, где требуется постоянная сосредоточенность и повышенная физическая нагрузка, а также при однообразных операциях — «холодные» цвета, контраст между которыми может быть повышен благодаря более высокой насыщенности;

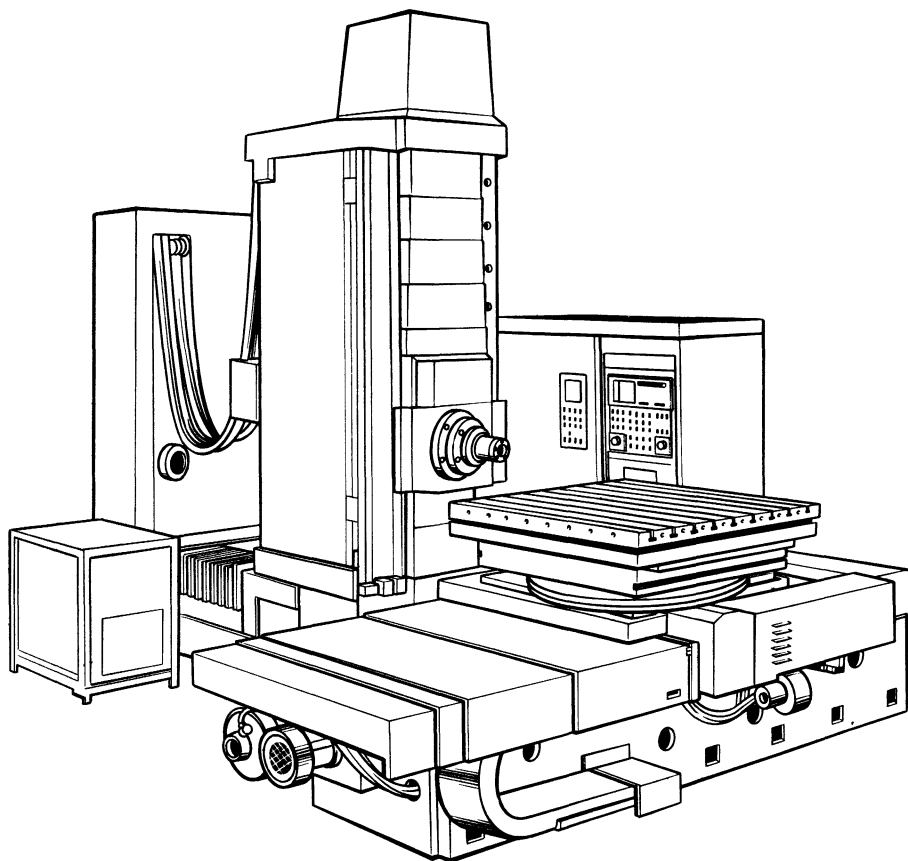


Рис. 16.22. Пример применения при окраске станков теории согласованных цветов

при работе, сопровождающейся периодическими повышенными физическими нагрузками, а также при работе, когда темп определяется самим работающим, — «теплые» цвета — красный, оранжевый, желтый, коричневый и их оттенки;

при работе, требующей постоянного внимания и сосредоточенности при нормальной физической нагрузке, — как «теплые», так и «холодные» цвета в малоcontrastных сочетаниях.

Оптимальные условия восприятия элементов рабочей зоны в основном зависят от цветового восприятия фона обрабатываемой детали, органов управления станков, рабочих органов и средств контроля за работой станка.

Фон обрабатываемых деталей должен иметь определенный цвет, зависящий от цвета деталей. Если материалы деталей разноцветны (например, на универсальных станках), то для создания фона целесообразно выбирать наиболее нейтральные цвета, например оттенки тепло-

го серого; сталь, алюминий, чугун имеют холодные, голубовато-серые оттенки, и в качестве фона для обработки их поверхности рекомендуется использовать бежевые цвета с желтоватым оттенком. Для латуни, меди лучше подбирать цвета фона в гамме холодного серого или голубовато-синего. Для создания цветового комфорта при работе на металлорежущих станках рекомендуется применять специальные экраны. При этом должен учитываться характер освещения изделия и экрана, уровни освещенности и т. д.

При выборе окраски элементов, определяющих пространственное решение формы станка, необходимо учитывать следующие композиционные особенности формы:

чем больше габаритные размеры, тем светлее должна быть окраска;

при наличии четкой и строгой конфигурации станки лучше окрашивать в малонасыщенные и светлые тона, при округлой и нечеткой конфигурации — в относительно более насыщенные цвета;

несущие части станка следует окрашивать в более темные цвета, чем остальные части конструкции,

большую высоту или длину можно зрительно уменьшить, располагая границы между различными цветами на сочленениях элементов формы,

подбором цветовых сочетаний по яркости и насыщенности можно зрительно улучшить пропорциональный строй и равновесие формы,

учитывая определенные зрительные иллюзии, можно зрительно приблизить к наблюдателю одни поверхности, использовав для их окраски теплые хроматические цвета (красный, оранжевый, желтый) или светлые ахроматические (белый, светло серый), и отдалить другие, использовав холодные хроматические цвета (зеленый, голубой, синий, фиолетовый) или цвета темные ахроматические (черный и близкие к нему)

Лицевая панель пульта управления должна отличаться цветом от ее элементов, а также от

элементов, определяющих объемно пространственное решение формы станка

Цвет лицевых панелей целесообразно устанавливать с коэффициентом отражения 0,3—0,5 и насыщенностью 0,1—0,4, для средств отображения информации и органов управления — с коэффициентом отражения 0,3—0,5 и насыщенностью 0,3—0,6, для остальных частей станка — с коэффициентом отражения 0,3—0,5 и насыщенностью 0,1—0,6

Органы управления (кнопки, рычаги, тумблеры) целесообразно выполнять из материалов, цвет которых символизирует их назначение. Цветовой контраст между панелью и наиболее ответственными органами управления должен быть наибольшим

При выборе цвета для средств отображения информации и органов управления необходимо учитывать функциональные значения цветов. Так, красный цвет является запрещающим (предупреждает о перегрузке, возможной аварии при неправильном действии, нарушении

16.9. Цветовое решение производственных помещений

| Признаки классификации производственных помещений | Цветовая гамма | Допускаемый цветовой контраст между основными поверхностями интерьера | Допускаемое количество цвета основных поверхностей интерьера |
|---|-------------------------------|---|--|
| По категории работ легкие работы работы средней тяжести тяжелые работы наблюдение за производственными процессами с периодическим пребыванием оператора в помещении | Любая Теплая Любая » | Любой Средний Малый Любой | Среднее Среднее Среднее Любое |
| По степени точности работы особо точные и высокой точности | » | Малый | » |
| работы точные и малой точности | » | Любой | » |
| работы грубые | » | » | » |
| По условиям освещения при естественном освещении а) севернее 45° северной широты при ориентации светопроемов на север и восток на юг и запад при фонарях | Теплая Любая » | Средний » Малый | Среднее » Малое |
| б) южнее 45° северной широты при любой ориентации светопроемов при фонарях и других устройствах верхнего света | » | Средний Малый | » » |
| без естественного освещения | Теплая | Средний | » |
| По санитарно гигиеническим условиям тепловыделение значительное тепловыделение незначительное | Холодная Любая | Средний Большой | Малое Среднее |
| По уровню шума до 65 дБ более 65 дБ | » » | Средний Малый | » Малое |

16.10. Значения коэффициента отражения основных цветов

| Цвет | Оттенок | | |
|------------|---------|---------|--------|
| | светлый | средний | темный |
| Желтый | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Бежевый | 0,65 | 0,45 | 0,25 |
| Коричневый | 0,5 | 0,25 | 0,08 |
| Красный | 0,35 | 0,2 | 0,1 |
| Зеленый | 0,6 | 0,3 | 0,12 |
| Синий | 0,5 | 0,2 | 0,05 |
| Серый | 0,6 | 0,35 | 0,2 |
| Голубой | 0,55 | 0,40 | 0,25 |
| Белый | 0,85 | 0,65 | — |
| Черный | — | 0,04 | — |

технологического процесса и т. п.; зеленый цвет является разрешающим (означает нормальный режим работы, включенное положение механизма, готовность к работе и т. п.); желтый цвет является сигналом «внимание» (означает включенное положение механизма, предупреждение о начале действия механизма и т. п.); белый цвет может заменить желтый в тех случаях, когда надо выделить какой-либо сигнал из группы других.

Для органов управления и устройств индикации цвета используют с учетом их назначения. Красный цвет используют для кнопок «Стоп», «Общий останов», «Включено», «Вперед», «Вверх», «Плюс»; для сигнальных ламп — «Мощность включена», «Неисправность», «Высокие обороты», «Конец операции», «Питание включено», «Накал», «Машина в работе».

Оранжевый цвет применяют в сигнальных лампах «Перегрузка», «Конец операции».

Желтый цвет используют для кнопок «Продолжение работы» (после останова), «Обратный ход» и сигнальных ламп «Подготовка», «Машина в работе», «Автоматическое управление», «Регулировка».

Зеленый цвет применяют для кнопок «Включено», «Старт», «Вниз», «Назад», «Ручное

управление», «Медленный останов» и сигнальных ламп «Старт», «Закрыто», «Нормальная работа», «Ручное управление».

Синий цвет используют для кнопок «Обратное вращение», «Первый цикл», «Второй цикл» и в сигнальных лампах «Нормальная работа», «Источник тока работает».

Коричневый цвет применяют для кнопок «Останов», «Стоп».

Белый цвет используют для кнопок «Задержка» (временный останов), «Включение вспомогательного мотора», «Прямой ход» и сигнальных ламп «Поступление мощности», «Наличие тока», «Работа по автоматической программе».

Черный цвет применяют для кнопок «Продолжение операции», «Вниз», «Старт», «Включено» и в переключателях «Вперед-назад», «Автоматическое управление — останов — ручное управление», «Открыто».

Рекомендации по окраске интерьера. Оптимальное цветовое решение интерьера способствует улучшению гигиенических условий труда, снижению зрительно-нервного утомления и повышению производительности труда, обеспечению безопасности производственного процесса, а также улучшению эстетического уровня производственных помещений.

При выборе цветового решения интерьера следует учитывать общий характер работ, степень их точности, климатические и географические особенности, санитарно-гигиенические условия (табл. 16.9).

При цветовом решении интерьера большая роль принадлежит обоснованному выбору коэффициентов отражения поверхностей. В табл. 16.10 даны коэффициенты отражения основных цветов, используемых для окраски оборудования и интерьера.

В табл. 16.11 приведены четыре варианта совместимых цветов в интерьере. Используя рекомендации, приведенные в табл. 16.9—16.11, нужно также учитывать, что чрезмерная пестрота, яркость и монотонность утомляют зрение человека; в небольших помещениях число

16.11. Варианты сочетаний цветов в интерьере

| Цвет основы | Потолок | Верх стены | Панель стены | Пол | Оборудование |
|-------------|---------------|----------------|---|--|--|
| Зеленый | Белый | Бледно-зеленый | Зеленый средней насыщенности | Зеленый средней насыщенности | Светло-коричневый или зеленовато-серый |
| Желтый | Бледно-желтый | Бледно-желтый | Рыжевато-коричневый | Коричневый средней насыщенности | Светло-коричневый |
| Розовый | Белый | Бледно-розовый | Розовый | Рыжевато-коричневый средней насыщенности | Рыжеватый или светло-коричневый |
| Синий | Белый | Бледно-синий | Серый средней насыщенности с голубым оттенком | Серый | Серо-голубой |

цветов должно быть минимальным — это увеличивает помещение, панели членят стены, поэтому их можно использовать только в высоких помещениях, вертикальное членение торцовых стен делает их выше, горизонтальное — ниже и шире, теплые, выступающие цвета снижают высоту, а холодные «отступающие» — увеличивают

Предупредительная окраска частей машин, внутрицехового транспорта и линий ограничения движений должна резко отличаться от цвета окраски неподвижных деталей интерьера цеха Предупредительными цветами являются желтый или светло-оранжевый — основной тон в сочетании с белыми или черными полосами

При проектировании интерьера следует принять меры по предотвращению прямой и отраженной блескости Прямая блескость появляется в результате наличия источника света непосредственно в поле зрения оператора, отраженная — в результате наличия внутри поля зрения отражающих свет источника ярких поверхностей

Список литературы

1 **Войненко В. М., Мунипов В. М.** Эргономические принципы конструирования Киев Техника, 1988 199 с

2 **Губинский А. С.** Методы автоматизированного размещения средств контроля и управления на пульте оператора//Автоматизация проектирования систем «человек — машина» М МАИ 1980 Вып № 511 С 41—47

3 **Кудрявцев А. М.** Машинная графика в эргономическом проектировании//Техническая эстетика 1987, № 4 С 10—13

4 **Кудрявцев А. М.** Моделирование элементов рабочего места средствами машинной графики//Художественное конструирование рабочих мест Л ЛДНТП, 1984 С 22—27

5 **Лабораторный** практикум по основам инженерной психологии/Б А Душков, Б А Смирнов, А А Кривова и др Учебное пособие для студентов вузов Под ред Б А Душкова М Высшая школа, 1983 240 с

6 **Смирнов Е. Л.** Справочное пособие по НОТ 3-е изд, доп и перераб М Экономика, 1986 399 с

7 **Сомов Ю. С.** Композиция в технике 3-е изд, перераб и доп М Машиностроение, 1987 288 с

8 **Справочник** по инженерной психологии/С В Борисов, В А Денисов, Б А Душков и др М Машиностроение, 1982 368 с

9 **Эргономика**/В Д Балин, Ю Т Коваленко, А А Крылов и др Учебник Под ред А А Крылова, Г В Суходольского Л Изд во Ленингр университета 1988 184 с

Глава 17

Испытания станков

17.1. Нормативное обеспечение и организация контрольных испытаний металлорежущих станков

Контрольные испытания (КИ) — это испытания, которые проводятся для контроля качества продукции.

При научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах (стадия НИОКР) для модификации и создания новых моделей станков проводят исследовательские, доводочные, предварительные и приемочные испытания, при их серийном изготовлении — квалификационные, приемо-сдаточные, периодические, и при эксплуатации — периодические, послеремонтные испытания.

КИ на стадии НИОКР позволяют выбрать оптимальные проектные, конструкторские и технологические решения, обеспечивающие необходимый (заданный) уровень качества станка.

НИОКР завершаются приемочными испытаниями опытного образца или опытной партии, или головного образца (для станков единичного производства).

По согласованию с заказчиком могут быть представлены на приемочные испытания экспериментальные образцы.

Для подтверждения готовности производства к серийному (массовому) выпуску станков данной модели изготовителем могут проводиться квалификационные испытания образцов установочной серии (первой промышленной партии). Квалификационные испытания проводят также при постановке на производство станков, ранее освоенных на другом предприятии или изготавливаемых по лицензии.

При положительных результатах квалификационных испытаний освоение производства считается законченным, а изготовленная продукция может представляться заказчику (потребителю) по утвержденной документации.

Необходимость проведения квалификационных испытаний устанавливает изготовитель.

На стадии производства станков испытания проводят при входном контроле для материалов и комплектующих, при операционном контроле для технологических операций, для отдельных деталей и сборочных единиц станка и при приемочном контроле (приемо-сдаточные испытания) для готовой продукции (для каждого станка или для выборки от партии станков).

Контроль стабильности технологии и качества изготавливаемых станков осуществляется с помощью периодических испытаний.

При изготовлении единичного образца станка проводят только приемо-сдаточные испытания, программа которых приближается к программе приемочных.

При изготовлении могут быть также проведены инспекционные испытания — для внеочередного контроля качества продукции органами надзора, потребителем, торгующей организацией.

Существенную роль при оценке качества металлорежущих станков играет сертификация, которая обуславливается экономическими интересами (привлечь, заинтересовать потребителя), требованиями конкуренции в условиях рынка или требованиями национального законодательства по защите потребителя (обязательная сертификация). При сертификации станков оценивают их технические характеристики, определяют безопасность работы на них, подтверждают нормы точности и надежности. Сертификационные испытания проводят обычно в составе квалификационных или периодических испытаний.

В станкоинструментальной промышленности и отраслях, имеющих крупномасштабное производство металлорежущих станков, функционируют научно-исследовательские и проектно-конструкторские организации и специальные испытательные центры, осуществляющие методическое руководство проведением КИ в целом, а также сами испытания: исследовательские, приемочные, квалификационные⁴, для сертификации.

Многие из этих организаций аккредитованы в рамках национальной системы сертификации,

а результаты проведенных в них испытаний признаются в качестве официальных документов. Перечень аккредитованных испытательных центров и сертифицированной продукции периодически публикует Госстандарт.

В станкостроении таким центром является Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков (ЭНИМС). Методическое единство испытаний обеспечивается использованием типовой номенклатуры характеристик и показателей качества станков, а также типовых программ и методик испытаний.

При КИ станков определяют их показатели качества, характеризующие их способность выполнять свое назначение (функциональные), надежность, стойкость к внешним воздействиям, безопасность эксплуатации для людей и окружающей среды; энергопотребление; материалоемкость; удобство технологического обслуживания (см. подразд. 2.4).

Основные ГОСТы, устанавливающие показатели качества станков и методы испытаний (контроля) для их определения, следующие: ГОСТ 7599—82 «Станки металлообрабатывающие. Общие технические условия (содержат требования к программе приемо-сдаточных и периодических испытаний)», ГОСТ 7035—75 «Станки металлорежущие и деревообрабатывающие. Общие условия испытаний станков на жесткость», ГОСТ 8—82Е «Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность», ГОСТ 22267—76 «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров», ГОСТ 27843—88 «Станки металлорежущие. Методы проверки точности позиционирования», ГОСТ 25443—82Е «Станки металлорежущие. Образцы изделия для проверки точности обработки. Общие технические требования», ГОСТ 25889.1.83. «Станки металлорежущие. Методы проверки круглости образца изделия», ГОСТ 25889.2—83 «Станки металлорежущие. Методы проверки параллельности двух плоских поверхностей образца изделия», ГОСТ 25889.3—83 «Станки металлорежущие. Методы проверки перпендикулярности двух плоских поверхностей образца изделия», ГОСТ 25889.4—86 «Станки металлорежущие. Метод проверки постоянства диаметров образца изделия», ГОСТ 26189—84 «Станки металлорежущие. Метод комплексной проверки параллельности и прямолинейности двух плоских поверхностей образца изделия», ГОСТ 26190—84Е «Станки металлорежущие. Методы проверки постоянства размеров цилиндрических образцов изделий в пределах одной партии», ГОСТ 26542-85 «Станки металлорежущие. Методы проверки торгового бienia поверхностей образца изделия», Государственные стандарты на нормы точности и

жесткости отдельных типов станков ГОСТ 12.2.009—80 «Станки металлорежущие. Общие требования безопасности», ГОСТ 12.2.107—85Е Шум. Станки металлорежущие. Допустимые шумовые характеристики».

Основные показатели качества, характеристики, требования, определяемые при различных КИ станков в соответствии с приведенными выше ГОСТ и «Типовыми методиками и программами испытаний металлорежущих станков» (ЭНИМС, Москва, 1986 г.), включают: нормы точности и жесткости, уровень вибрации, установленную безотказную наработку в сутки, неделю; параметры точности и шероховатости обработки (в партии) образцов-изделий; шумовые характеристики станка при работе без нагрузки и под нагрузкой; силы на маховиках и рукоятках; соответствие электро-, гидро- и пневмооборудования требованиям стандартов; требования безопасности, работоспособность на различных режимах согласно техническим условиям и эксплуатационной документации на конкретный станок, максимальную мощность привода главного движения станка (для станков классов точности Н и П); среднюю суточную производительность; предельные размеры устанавливаемой заготовки и обрабатываемых поверхностей; наибольшую массу устанавливаемой заготовки (с учетом массы закрепляющих элементов); устойчивость процесса резания; время смены инструмента и заготовки; время поворота стола, средства автоматизации и оснащенность станка дополнительными устройствами и приспособлениями, расширяющими технологические возможности, линейные и угловые температурные смещения в станке (для станков классов точности В, А, С); температуру поверхности шпиндельной бабки; наибольшие размеры инструмента, устанавливаемого на станке; наибольшую массу оправки (блока) в магазине; наибольшее перемещение рабочих органов станка с инструментом или заготовкой; число управляемых осей координат и одновременно управляемых осей координат; предельные частоты вращения стола (шпинделя); рабочие подачи и скорости быстрых (установочных) перемещений стола, ползуна, суппорта, салазок шпинделя и др.; мощность установленных на станке электродвигателей; габаритные размеры и массу станка; соответствие отделки и маркировки требованиям стандартов; действие систем смазывания и охлаждения, подачи СОЖ; действие органов управления; соответствие стандартам указателей на лимбах, рукоятках, кнопках и других органах управления; действие механизмов подачи инструмента или заготовки при рабочих подачах и при вспомогательном движении; температуру нагрева подшипников; удельный расход электроэнергии; точность и силы закреп-

ления заготовок; надежность работы защитных систем, блокировок и ограждений; время разгона и торможения привода; уровень вибраций на рабочем месте; защиту электрооборудования.

Методы испытаний для проверки этих характеристики и показателей установлены государственными стандартами, указанными выше, а также в технических условиях на станок. Методы испытаний при оценке безопасности станков определяются ГОСТ 12.2.009—80. На их основе для испытаний отдельных моделей станков разрабатывают конкретные рабочие программы и методики, которые могут составлять часть технических условий. В рабочих методиках для определения каждого показателя и каждой характеристики метод испытаний, в том числе и стандартный, подробно излагается применительно к данному станку, условиям его испытаний и имеющемуся испытательному оборудованию, а также средствам измерений. Рабочие методики целесообразно оценивать (аттестовывать) с точки зрения получаемой погрешности. Рекомендации по оценке точности (повторяемости и воспроизводимости результатов испытаний) приведены в стандарте ИСО 5725, в ГОСТ 25051.1—82.

Метрологическая экспертиза методик испытаний станков проводится НПО «Оргстанкинпром» или службами главного метролога предприятий. При положительном заключении по результатам метрологической экспертизы ЭНИМС выдает аттестат на программу и рабочую методику испытаний.

В общем случае рабочая методика испытаний должна содержать следующие сведения: требования к объекту испытаний; условия испытаний; число испытываемых станков и правила их отбора; последовательность и содержание экспериментов для определения искомой характеристики; номенклатуру средств испытаний и требования к ним; процедуру обработки данных испытаний и оценки точности полученных результатов; требования к обеспечению безопасности персонала и охраны окружающей среды.

Работы, связанные с испытаниями станков, делят на несколько основных этапов: подготовка, проведение, использование результатов, а также надзор за испытаниями.

Подготовка испытаний является ключевым этапом, определяющим успех и эффективность их проведения, качество получаемой информации. Важнейшая операция подготовки — разработка рабочей программы испытаний, которая является организационно-методическим документом, устанавливающим цель испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний.

Исходной операцией при разработке программы является выбор определяемых показателей (характеристик) продукции, состав которых обуславливает, с одной стороны, полноту и объективность оценки качества, с другой — объем, техническое содержание, сроки и стоимость испытаний. Состав определяемых показателей зависит от категории испытаний и устанавливается, как правило, исходя из стандартов и других нормативно-технических документов на продукцию и по требованиям заказчика.

При разработке программы выбирают условия испытаний, т. е. определяют виды, характер, режимы воздействий на объект, состояние окружающей среды, режимы функционирования объекта. От того, насколько близко и достоверно условия испытаний воспроизводят характерные условия эксплуатации или использования продукции, зависит достоверность полученных результатов. Если эти условия выбраны неправильно, то как бы точно и тщательно в дальнейшем не велись испытания, результаты будут неправильными. Исходя из состава определяемых характеристик и условий испытаний выбирают методы и средства испытаний, а также устанавливают критерии предельных состояний объекта по каждой из определяемых характеристик.

С учетом затрат и сроков испытаний, а также требований к точности и достоверности результатов разрабатывают в рамках программы план испытаний, который определяет число испытываемых объектов, последовательность и календарные сроки подготовки и проведение испытаний. При необходимости, в случае отсутствия общих требований, в программе устанавливается порядок испытаний. Необходимой и обязательной частью программы являются требования, обеспечивающие безопасность персонала и защиту окружающей среды.

Целесообразно также, чтобы программа испытаний конечной продукции — станка — была увязана с программами испытаний материалов и комплектуемых или, при необходимости, включала их. Требования к программе и методикам испытаний установлены ЕСКД 2.106—8.

Программы приемочных и приемо-сдаточных испытаний конкретных типов и моделей станков обычно устанавливаются в стандартах и (или) технических условиях.

Подготовка испытаний включает также изготовление (или отбор) и подготовку объектов испытаний, средств испытаний, разработку при необходимости рабочих методик испытаний, обучение и проверку квалификации персонала, проводящего испытания. Подготовка объектов связана с приведением их в рабочее состояние (расконсервация, подключение и т. п.),

установкой и подключением средств измерений, установкой на стенды и т. п. При исследовательских и доводочных испытаниях объектом может быть специальный опытный узел, агрегат или их модель, для изготовления которых выпускают рабочие чертежи.

Проектирование, изготовление, монтаж, наладка и проверка (аттестация) средств испытаний являются одними из самых трудоемких операций при подготовке испытаний. Целесообразно, чтобы проектирование и изготовление испытательных стендов проводились параллельно или даже с опережением проектирования самого изделия.

Подготовка средств испытаний завершается аттестацией испытательного оборудования (порядок по ГОСТ 24555—81) и поверкой средств измерений.

В общем случае подготовка к испытаниям включает обучение персонала, завершающееся его аттестацией. Если необходимо предоставить организации или подразделению права на проведение определенных испытаний, например для сертификации, то осуществляется ее аккредитация, которая включает проверку (аттестацию) как организационно-технической готовности, так и подготовленности персонала.

17.2. Основные виды испытаний станков

Основные виды испытаний станков предназначены для оценки их качества и надежности.

Испытания станков на геометрическую и кинематическую точность включают оценку точности работы отдельных механизмов и точности изготовления элементов станка (см. раздел 6.2).

На геометрическую точность испытание проводится, как правило, на неработающем станке, а после проведения всех проверок предусматривается контрольная обработка образца (типовой детали). Оценка геометрической и кинематической точности станков проводится по нормам ГОСТ для соответствующих типов станков. Допустимые значения отклонений зависят от класса точности станка. Общие требования к испытаниям станков на точность приведены в ГОСТ 8—82Е.

При испытании станков на геометрическую и кинематическую точность применяют универсальные и специальные измерительные приборы и инструменты.

Все шире применяют высокоточные приборы, обеспечивающие автоматизированную запись и обработку информации. К ним относятся лазерные интерферометры для оценки перемещений и точности позиционирования, автоколлиматоры с цифровой индикацией и с выводом информации на ЭВМ и др.

Для измерения кинематической точности станков применяют специальные приборы (кинематометры), которые позволяют оценить изменения передаточных отношений, возникающие в основном вследствие погрешностей зубчатых передач. Проверка точности кинематических цепей особенно важна для зуборезных станков. Применяют кинематометры, использующие магнитоэлектрический, оптический, фотоэлектрический и другие принципы действия. Они оценивают точность движения (вращения) контролируемого звена.

Испытания станков на статическую жесткость включают определение деформации основных узлов станка, в первую очередь тех, которые влияют на относительное положение инструмента и заготовки.

При исследовательских испытаниях на жесткость получают «кривую жесткости» — нагрузочно-разгрузочную характеристику упругих деформаций в координатах сила — деформация узла, которая является также диагностическим признаком состояния упругой системы станка. Жесткость станка связана с точностью обработки, с возможностью применения повышенных режимов обработки (см. подразд. 6.4).

При проведении исследовательских испытаний станков на жесткость наблюдается тенденция перехода от применения универсальных динамометров более совершенным приборам с автоматической регистрацией нагрузочно-разгрузочных характеристик и с высокоточными методами измерения деформаций. Перспективна голографическая интерферометрия как бесконтактный, достаточно универсальный и точный метод определения малых перемещений объекта.

Испытание станков на виброустойчивость связано с анализом и оценкой тех динамических процессов, которые возникают в станке при его работе, особенно в процессе резания.

Эти процессы оказывают непосредственное влияние на параметры точности и шероховатости обработанных поверхностей, а также могут привести к недопустимым явлениям (резонансу, возникновению интенсивных автоколебаний), исключающим возможность работы станка при определенных режимах обработки.

Наибольшее развитие получили испытания, связанные с получением амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ), которая позволяет оценить запас устойчивости станка и выявить влияние основных конструктивных и технологических факторов на динамические характеристики системы (см. гл. 8). Для снятия этих характеристик применяют специальные вибраторы (контактные и бесконтактные), которые обеспечивают силовое воздействие на упругую систему станка по синусоидальному закону в заданном диапазоне частот. Отклик системы на

данное воздействие — ее колебание с некоторой амплитудой и смещением по фазе по отношению к воздействующему сигналу — позволяет с помощью АФЧХ получить динамическую характеристику станка.

При проведении таких испытаний обычно используют бесконтактные электромагнитные вибраторы, прецизионные измерительные преобразователи и аппаратуру для измерения виброперемещений.

Наиболее удобно при испытании применять аппаратуру, обеспечивающую автоматизированную обработку результатов и получение АФЧХ на дисплее ЭВМ или на графопостроителе.

Особым видом испытаний, связанных с быстропротекающими процессами, является определение характеристик плавности медленных перемещений столов и суппортов прецизионных станков, когда изменение условий трения в направляющих может привести к релаксационным колебаниям и оказать влияние на точность позиционирования.

Определение тепловых деформаций станков особенно важно для прецизионных станков, когда изменение температурных полей станка играет доминирующую роль в обеспечении требуемой точности (см. гл. 7).

Для определения тепловых деформаций узлов станка часто используют те же приборы, что и при оценке геометрической точности и жесткости станков. Специфика здесь заключается в том, что деформация изменяется во времени, поэтому применяют самопишущие приборы, а при автоматизации эксперимента — цифровые печатающие устройства и дисплей, регистрирующие эти изменения. Кроме того, часто необходимо определять характеристики температурных полей и их изменение во времени. Датчиками в этом случае служат термодатчики и терморезисторы, установленные в зоне источников теплоты и на исследуемых корпусных деталях. Для оценки динамики тепловых полей применяют тепловизоры, регистрирующие инфракрасные излучения объекта. Обработка на ЭВМ результатов измерения тепловых полей позволяет построить изотермы и другие характеристики, которые являются диагностическим признаком для оценки теплового состояния системы.

По мере повышения требований к прецизионности станков роль тепловых деформаций в балансе точности станка возрастает.

Оценка эксплуатационных характеристик станка включает в первую очередь приведенные ниже испытания.

Определение фактической производительности станка. Измерение фактических значений скоростей подач и длительности вспомогательных движений станка,

проверка возможности передачи необходимых нагрузок позволяют сравнить полученные характеристики с их проектными (заданными) значениями. Основная задача этих испытаний — установить правильность функционирования станка и выполнения всех команд системы управления и определить возможность осуществлять заданные циклы с необходимыми кинематическими и силовыми характеристиками.

Определение коэффициента полезного действия (КПД) станка позволяет дать энергетическую характеристику станка. КПД привода станка η показывает, какая доля N_p всей мощности N расходуется на резание:

$$\eta = N_p / N = N_p / (N_p + N_T), \quad (17.1)$$

где N_T — потери мощности, главным образом на трение в механизмах.

Мощность (Вт), затрачиваемая на резание, связана с главным движением и движением подачи:

$$N_p = P_v v + P_s v_s, \quad (17.2)$$

где P_v , P_s — соответственно тангенциальная и осевая составляющие силы резания, Н; v , v_s — соответственно скорость резания и скорость подачи, м/с.

Мощность, идущая на движение подачи столов, суппортов, незначительна в общем энергетическом балансе станка, и основную роль играет привод главного движения.

Для расчета КПД измеряют мощность, расходуемую электродвигателем, и определяют мощность, идущую на резание, измеряя для этого силу резания или момент на шпинделе.

Обычно строят график зависимости КПД от полезной нагрузки (мощности резания N_p), который имеет максимум.

Проверка уровня шума позволяет не только оценить уровень звукового давления, отрицательно действующего на человеческий организм, но и использовать полученные данные в качестве диагностического сигнала об общем состоянии станка. Испытания проводят в соответствии с ГОСТ 12.2.107—85, который регламентирует методы измерения шума и допустимые значения его уровня с учетом частотного спектра для различных случаев.

Комплексные испытания станков. При испытании новых конструкций нередко возникают такие взаимодействия, влияющие на точность станка, которые не выявляются при изолированной оценке его геометрической точности, жесткости и других показателей, определяемых при стандартных испытаниях. Поэтому при исследовательских испытаниях новых моделей станков часто применяют специальные виды и методы испытаний для более полной оценки

качества станка Эти испытания, как правило, проводят по окончании исследовательских работ для определения характеристик станков, для изыскания новых методов измерения параметров, для проверки теоретических расчетов, примененных при проектировании станка

При комплексных испытаниях стремятся найти дополнительные характеристики качества станка, глубже исследовать взаимодействие всех элементов станка, более полно учесть условия его работы при использовании в производстве

Испытание станков на надежность производится для того, чтобы определить, сохранится ли достигнутое качество станка в течение заданного периода эксплуатации Это испытание должно быть проведено до начала эксплуатации серии станков, чтобы не допускать отказов, выявившихся лишь в процессе эксплуатации, и гарантировать эффективное использование станка в производстве

Определение показателей надежности станка является сложной задачей, так как необходимо учитывать следующее

во-первых, при испытании надо за сравнительно короткий промежуток времени оценить, как будет работать станок в течение длительного периода его эксплуатации,

во-вторых, для определения показателей надежности надо получить статистические данные, а при испытании опытных образцов можно использовать лишь один-два станка,

в-третьих, для станков характерен широкий диапазон режимов работы и условий эксплуатации

Наибольшее распространение в настоящее время получили кратковременные, ресурсные и эксплуатационные испытания станков на надежность

Кратковременные испытания — это такие испытания, при которых оценивается безотказность работы станка за смену, сутки, неделю или другой сравнительно непродолжительный промежуток времени Они выявляют малостойкие и дефектные элементы станка, но не могут характеризовать его параметрическую надежность Для отказавших деталей определяют наработку на отказ или параметр потока отказов (см гл 9)

Кратковременные испытания на надежность проводят также при работе сложных станочных систем, например автоматических линий когда в течение заданного периода времени возникают разнообразные, сравнительно легко устранимые отказы и дается статистическое описание потока отказов

При таких испытаниях фиксируют, как правило, лишь недопустимые и легко устранимые отказы, а параметрическая надежность объекта не оценивается Параметр потока отказов, который определяется при этих испытаниях,

является необходимым, но не достаточным для характеристики надежности сложных систем Главная задача при испытании на надежность технологических систем — определение изменения их выходных параметров, в первую очередь связанных с точностью обработки за весь период эксплуатации

Эксплуатационные испытания представляют собой систему наблюдений за работающими станками с применением статистических методов обработки информации о возникающих отказах

Статистические данные о потере работоспособности элементов и узлов станка, об отказах станка по показателям точности, полученные в процессе его эксплуатации и ремонта, позволяют с большой достоверностью определить показатели надежности для данной модели с учетом различных режимов работы и условий эксплуатации

Основной недостаток статистических методов заключается в том, что полные данные о надежности можно получить через длительный период времени тогда, когда станки уже устарели и нужна оценка надежности новых моделей станков Поэтому при проектировании новой модели станка данную информацию можно использовать лишь частично для узлов, которые не подверглись изменению по сравнению с прототипом, и для оценки «слабых» узлов прототипа

Ресурсные испытания предназначены для оценки ресурса станка по точности Если испытания проводить без форсирования режима работы станка, то их длительность будет весьма велика, а полученные результаты отразят лишь свойства данного станка при принятых условиях испытания Поэтому при проведении ресурсных испытаний быстрее получение информации достигается благодаря применению ускоренных или специальных методов испытания

Ускоренные испытания на надежность лишь в отдельных случаях позволяют получить показатели надежности за сравнительно короткий промежуток времени

Различают форсированные испытания, основанные на интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения, и сокращенные испытания без интенсификации этих процессов

Сокращение длительности испытаний за счет непрерывной работы объекта дает заметный эффект лишь для тех его механизмов, которые мало загружены в процессе нормальной эксплуатации Например, работа механизма загрузки станка-автомата занимает незначительную долю времени в цикле станка Поскольку современные станки работают в интенсивных условиях эксплуатации с высоким коэффициентом использования, применение такого метода ускорения

испытания для всего станка не дает заметного эффекта

Форсирование режимов испытания благодаря применению при испытании более высоких нагрузок и скоростей по сравнению с эксплуатационными интенсифицирует процессы повреждения и ускоряет наступление отказа, но искажает, как правило, физическую картину этих явлений

Метод ускоренных испытаний следует применять с учетом того, что работа механизмов при форсированных режимах может вызывать новые явления при протекании процессов старения и разрушения, не характерных для условий эксплуатации, и качественно изменить картину отказов. В этом случае пересчет показателей надежности на нормальные условия работы изделия может привести к грубым ошибкам

Существуют многочисленные примеры успешного проведения форсированных испытаний на надежность сравнительно простых изделий и механизмов с учетом одного преобладающего процесса разрушения, например изнашивания. Но проведение таких испытаний для станка в целом, особенно когда это связано с показателями точности его работы, не рекомендуется

Ускорить получение информации о потере станком точности можно также путем повышения точности измерений. Такие методы, как измерение износа с применением радиоактивных изотопов, измерение точности перемещения движущихся тел с помощью лазерной техники, применение высокочувствительных датчиков для определения деформации, позволяют более точно регистрировать изменения параметров, характеризующих начальное состояние изделия

Повышение точности измерения параметров станка дает наибольший эффект в том случае если дополнительно прогнозировать процесс дальнейшей потери станком работоспособности

Основные принципиальные недостатки применяемых в настоящее время стандартизованных методов испытания станков следующие

все виды испытаний проводятся обособленно,

нет установившегося понятия о выходных параметрах станка, определяющих его работоспособность,

при испытании станка не учитывается вероятностная природа всех явлений,

как правило, не применяются тестовые методы диагностирования, которые дают обширную информацию о состоянии станка,

не применяются методы прогнозирования для оценки возможных изменений параметров станка в предполагаемых условиях эксплуатации,

практически не используются возможности ЭВМ для управления процессом испытаний и

прогнозирования возможного изменения состояния станка

Эти недостатки устраняются при применении специальных методов испытания, к которым относится программный метод

17.3. Программный метод испытания станков

Повышение эффективности методов испытания и диагностирования металлорежущих станков для оценки их технического уровня, получение наиболее полной информации о состоянии машины по параметрам качества, прогнозирование надежности на стадии испытания опытного образца, сокращение времени проведения испытаний являются необходимыми условиями для быстрого освоения новых моделей станков. Этим условиям удовлетворяет программный метод испытания [6]

Программный метод испытания следует применять в основном для опытных образцов новых моделей станков, к точности и параметрической надежности которых предъявляются высокие требования

Одной из основных особенностей программного метода является управление ходом испытания по программе, заложенной в ЭВМ и отражающей весь диапазон условий эксплуатации станка

Основная цель программных испытаний — оценить реакцию станка на весь спектр внешних воздействий, отражающий эксплуатационные нагрузки, и выявить области состояний для регламентированных выходных параметров станка

В качестве выходных параметров станка выбирают показатели точности осуществления движений формообразующих узлов (см подразд 2.2)

По результатам испытания станка области состояний сравнивают с соответствующими областями работоспособности (область допустимых значений выходных параметров). В результате определяют показатели качества станка и, в первую очередь, запас надежности по каждому из параметров, а также вероятностные

Область работоспособности устанавливают исходя из требований к точности изготавливаемых изделий с учетом той доли погрешностей обработки, которую вносит станок (см подразд 2.1)

Условия эксплуатации и их стохастическую природу учитывают, проводя испытания при одновременном действии силовых и тепловых факторов с программным нагружением работающего станка с помощью специальных устройств. Условия испытаний должны отражать

спектр эксплуатационных воздействий. При этом выходные параметры могут определяться как в вероятностной трактовке (полная характеристика области состояний), так и при экстремальных условиях (оценка границы области состояний).

Испытание состоит из большого числа циклов, каждый из которых отражает одну из комбинаций возможных воздействий на станок.

Такое испытание требует применения программных нагрузочных устройств, имитирующих силовые и тепловые воздействия на станок.

Обработка на станке образца (типовой детали) выполняется лишь для подтверждения достоверности информации, полученной при программном нагружении станка, и для установления степени адекватности условий испытания реальным условиям работы станка.

Испытания сочетаются с прогнозированием надежности (см. подразд. 9.4). При этом исходными данными являются результаты проводимых испытаний и априорная информация о процессах, приводящих к изменению начальных характеристик станка.

Испытания проводят в специально оборудованных испытательно-диагностических центрах (комплексах), где обеспечиваются программное нагружение станка, измерение необходимых параметров и обработка информации на ЭВМ.

В процессе испытания ЭВМ выполняет следующие функции:

- обрабатывает и хранит результаты испытаний;

- обрабатывает априорную информацию об эксплуатационных нагрузках и условиях эксплуатации, об износостойкости материалов, применяемых для базовых элементов, о требованиях к точности обработки и другие данные, характерные для данной испытуемой модели станка;

- осуществляет программное управление режимами работы станка и специальными нагрузочными устройствами, включая имитацию внешних воздействий — изменение значений и направления сил, наложение спектра вибраций, управление тепловыми потоками и др.;
- осуществляет прогноз о возможном изменении выходных параметров станка и производит расчеты показателей качества и параметрической надежности станка.

На рис. 17.1 показана структура (а) испытательно-диагностического комплекса и пример ансамбля траекторий (б) ползуна шпиндельной бабки, полученный при программном испытании многоцелевого станка.

Испытание реализуется в режиме автоматизированного эксперимента и состоит из последовательных циклов, число которых должно быть

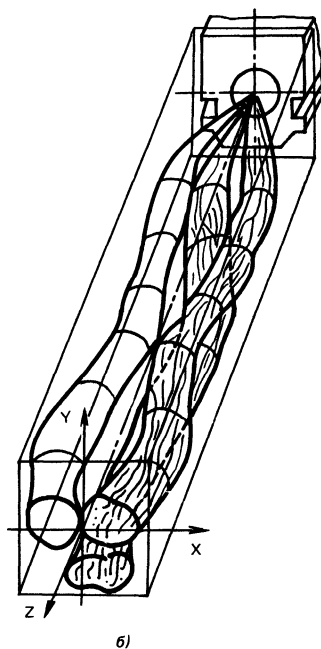
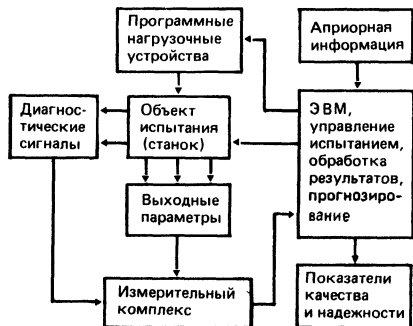


Рис. 17.1. Структурная схема испытательно-диагностического комплекса (а) и ансамбль траекторий ползуна шпиндельной бабки (б)

достаточным для статистической обработки результатов. Каждый цикл осуществляется при определенном сочетании факторов, влияющих на параметры траекторий, и полученные траектории каждой опорной точки являются реализациями некоторого случайного процесса, характеризующего движение рабочих органов станков при его эксплуатации.

Параметры каждой траектории определяют с помощью измерительного комплекса и их значения вводят в ЭВМ, где осуществляются необходимые расчеты. В измерительном комплексе имеется диагностическая аппаратура для оценки состояния отдельных элементов станка, их тепловых полей, виброакустических сигнала-

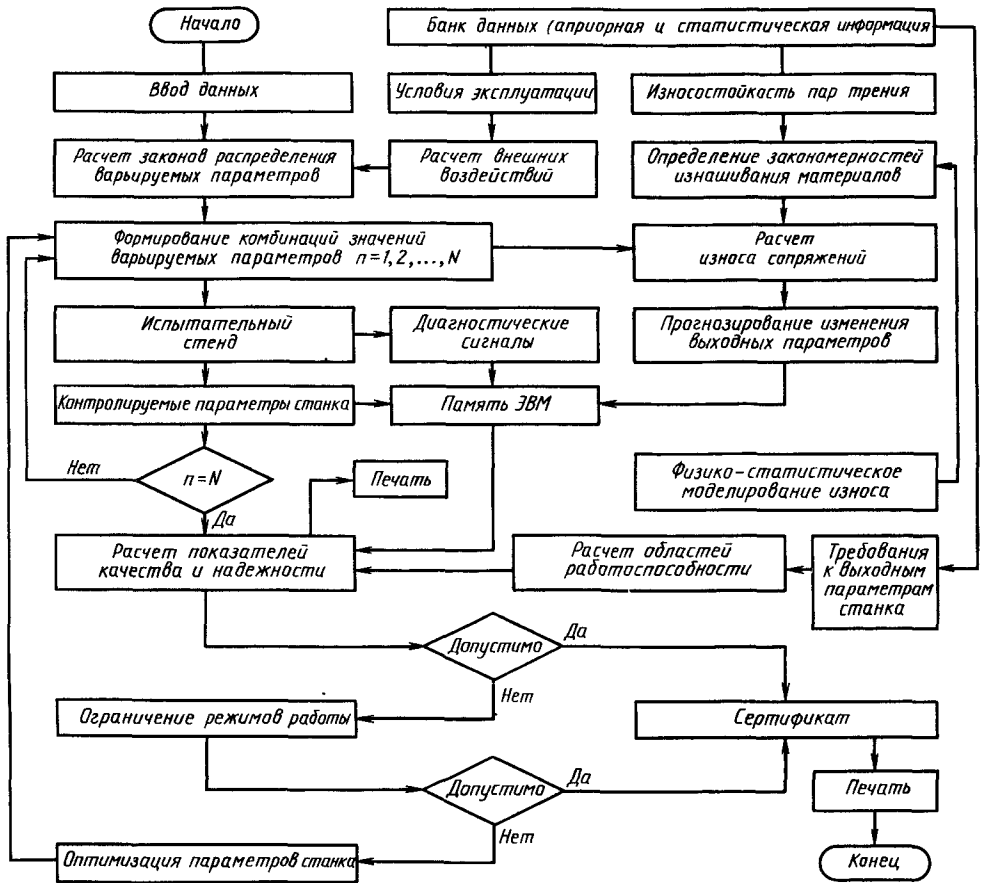


Рис. 17.2. Структурная схема алгоритма программного испытания станка

лов и других характеристик. Анализ диагностических сигналов с помощью ЭВМ позволяет судить о причинах отклонения параметров траекторий от их номинальных значений.

Программное испытание требует такой организации испытательно-вычислительного процесса, которая включает необходимый объем отдельных вычислений и циклов испытаний, их логическое построение, применение различных методов и моделей, использование целого ряда подпрограмм (как специальных, так и стандартных), организацию взаимодействия процессов испытания, обработки информации и вычисления.

На рис. 17.2 приведена структурная схема укрупненного алгоритма программного испытания станка и взаимодействия отдельных блоков. Вначале осуществляются процедуры, связанные с формированием численных значений тех входных параметров, которые будут варьироваться при испытании станка. Сюда относятся значения

и направления внешних сил (включая их динамические составляющие), скорости перемещения узлов станка, тепловое воздействие на станок и др. Различные сочетания входных параметров при каждом цикле испытания позволяют получить данные для расчета законов распределения выходных параметров станка.

Для формирования значений варьируемых параметров используют априорную статистическую информацию, имеющуюся в банке данных управляющей ЭВМ. Здесь должны содержаться следующие данные:

параметры технологических процессов (размеры и материал заготовок, режимы обработки, характеристики режущего инструмента и др.), а также частота их применения для данной модели станка, что необходимо для расчета входных параметров (сил, скоростей) и законов их распределения;

спектры силовых (вибрационных) и тепловых внешних воздействий на станок,

данные по износостойкости материалов тех пар трения, которые определяют точность станка (направляющие, винтовые пары, опоры шпинделей) и используются для прогнозирования его параметрической надежности, информация о требуемой точности обработки и погрешностях, вносимых компонентами технологической системы (инструментом, приспособлением и др.), а также требования стандартов и нормативов, которые используются для расчета областей работоспособности.

Одним из основных процессов управления испытанием является формирование сигналов управления на основе полученных законов распределения входных параметров. Поскольку испытание состоит из N циклов (обычно $N=100\dots150$), то необходимо формировать набор значений входных данных для каждого цикла.

Выбор значений входных варьируемых параметров Z осуществляют двумя методами (рис. 17.3). Первый метод (рис. 17.3,а) заключается в непосредственном применении принципов статического испытания (метод Монте-Карло), когда для каждого цикла испытаний выбираются (разыгрываются) фиксированные значения входных параметров Z с учетом их законов распределения $f(Z)$. Затем эти значения преобразуются в сигналы управления режимом работы станка и программными нагрузочными устройствами, создающими на станке имитацию обработки.

Измерение выходных параметров станка X (параметров траекторий его рабочих органов) позволяет оценить отклик системы на данное воздействие и после проведения всех N циклов испытания получить законы распределения выходных параметров $f(X)$, характеризующие точность станка. Эти законы являются полной характеристикой областей состояний и отражают все разнообразие возможных условий эксплуатации станка, поскольку они учитывают стохастическую природу входных воздействий.

Такой метод целесообразно применять при достаточно стабильных статистических характеристиках условий эксплуатации станков. Если эти условия изменялись или надо оценить параметрическую надежность станка при его работе в других сферах производства, надо проводить новый цикл испытаний.

Второй метод (рис. 17.3,б) выбора значений варьируемых параметров Z позволяет проводить полный цикл испытаний один раз и затем использовать полученные результаты для оценки выходных параметров X при различных статистических характеристиках входных параметров. Для этого значения входных параметров выбирают на основе применения методов планирования многофакторного эксперимента.

Отклик системы на воздействие варьируемых

параметров позволяет найти функциональную зависимость между входными и выходными параметрами: $X_i = \varphi(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$.

Часто такая зависимость может быть представлена в виде полиномиального уравнения. Рассматривая аргументы этого уравнения как случайные величины со своими законами распределения, можно получить закон распределения входного параметра, также применяя метод Монте-Карло. При данном методе закон $f(Z)$ получают расчетным путем на ЭВМ, и при изменении законов распределения входных параметров дополнительных испытаний не требуется.

Испытательный стенд (см. рис. 17.1 и 17.2) включает объект испытания (станок), программные нагрузочные устройства, измерительный комплекс для оценки параметра траекторий и комплекс для измерения диагностических сигналов.

Испытательный стенд является основным источником информации о выходных параметрах испытуемого образца станка. После каждого цикла испытаний в память машины вводят параметры данной реализации измеряемой траектории движения узла станка. После проведения всех N циклов испытаний получают массив данных по параметрам всего ансамбля траекторий, после статистической обработки ко-

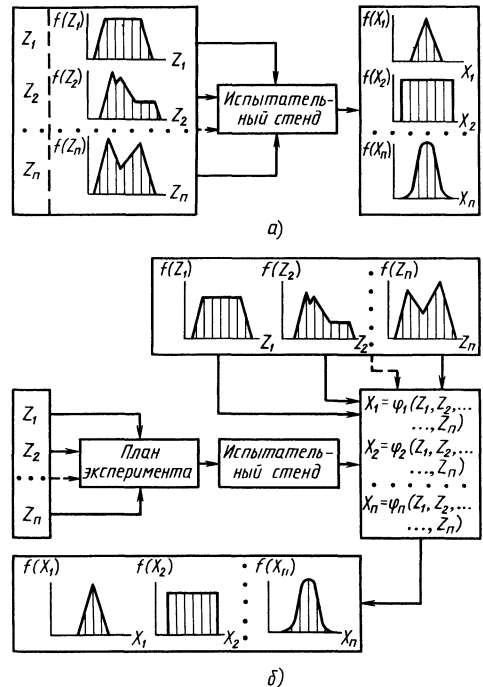


Рис. 17.3. Схемы формирования входных данных

торого определяют характеристики соответствующей области состояний.

В память машины вводятся также значения диагностических сигналов, в результате обработки и анализа которых получают информацию о влиянии основных факторов на параметры станка, служащую основой для оптимизации этих параметров.

Для прогнозирования параметрической надежности станка одновременно с каждым циклом испытания проводят расчеты возможного изменения параметров данной траектории при износе сопряжений станка (см. гл. 9). Необходимые для этого закономерности изнашивания материалов могут быть определены на основе физико-статистических испытаний данной пары материалов, которые учитывают вероятностную природу процессов изнашивания.

Для организации испытательно-вычислительного процесса при программном испытании разрабатывается соответствующее математическое обеспечение. Перечень прикладных программ, их назначение и взаимосвязь с общим алгоритмом испытания приведены в табл. 17.1.

В результате испытания и прогнозирования определяют следующие характеристики точности и параметрической надежности станка:

численные характеристики областей состояний;

запасы надежности по точности для каждого из выходных параметров K_n или вероятность безотказной работы (при $K_n < 1$);

ресурс по точности T_p при заданной вероятности безотказной работы станка $P(t)$.

17.1. Перечень прикладных программ для проведения программного испытания металлорежущих станков

| № | Подпрограмма | Входные данные | Результат | Примечание |
|---|--|--|--|---|
| 1. Формирование входных данных | | | | |
| 1.1 | Расчет рабочих нагрузок, скоростей перемещений и положения рабочих органов | Параметры изготавливаемых деталей, режимы их обработки | Рабочие нагрузки и перемещения в функции технологического процесса | Используются формулы теории резания |
| 1.2 | Расчет законов распределения сил, действующих на узлы станка, скоростей перемещений и положений узлов | Результаты реализации подпрограммы 1.1 | Законы распределения в числовой или аналитической форме | Выборка деталей должна быть представительной |
| 1.3 | Расчет законов распределения внешних воздействий — силовых (динамических) и тепловых | Спектры внешних воздействий | | |
| 1.4 | Формирование комбинаций значений варьируемых параметров по методу Монте-Карло (см. рис. 17.3, а) | Законы распределения варьируемых параметров | Значения комбинаций варьируемых параметров для всех циклов испытания | Число циклов испытания должно быть достаточным для статистической обработки (обычно $N = 100 \dots 150$) |
| 1.5 | Формирование комбинаций значений варьируемых параметров с применением методов планирования эксперимента (см. рис. 17.3, б) | Диапазон изменения и уровни варьируемых параметров | | |
| 1.6 | Управление испытанием (программными нагрузочными устройствами, режимами работы станка) | Значения варьируемых параметров | Получение выходных сигналов с испытательного стенда | Применяются подпрограммы 1.4 или 1.5 |
| 2. Обработка результатов испытаний и диагностических сигналов | | | | |
| 2.1 | Расчет регламентируемых параметров каждой траектории (включая графическое изображение траектории: промежуточное — на дисплее, окончательное — на графопостроителе) | Результаты измерения параметров траектории | Графическое изображение ансамбля траекторий. Численные значения параметров | Установленные параметры траекторий записываются в память ЭВМ (внешнее запоминающее устройство) |

| № | Подпрограмма | Входные данные | Результат | Примечание |
|-----|---|---|--|---|
| 2.2 | Статистическая обработка результатов N циклов испытаний (при использовании подпрограммы 1.4) | Данные по каждому из циклов (в памяти ЭВМ) | Законы распределения выходных параметров | Используются стандартные подпрограммы |
| 2.3 | Расчет функции отклика и законов распределения выходных параметров (при использовании подпрограммы 1.5) | Данные испытаний в памяти ЭВМ и подпрограмм 1.2 и 1.3 | | |
| 2.4 | Оценка миграций центра группирования траекторий. Прогнозирование миграций с учетом подпрограммы 1.3 | Спектр тепловых воздействий | Скорость и параметры траекторий миграций | — |
| 2.5 | Оценка тепловых полей станка | Результаты измерения тепловых полей | Параметры тепловых полей и динамики их изменения во времени | Оценивается влияние диагностических признаков (тепловых полей, деформаций, геометрии направляющих, вибраций) на выходные параметры станка |
| 2.6 | Оценка деформации (статических) элементов станка | Результаты измерения деформаций | Оценка жесткости системы | |
| 2.7 | Оценка геометрических параметров направляющих станка | Результаты измерений при сборке станка | Оценка влияния параметров направляющих на траектории движения формообразующих узлов станка | |
| 2.8 | Виброакустическая диагностика | Результаты измерений виброакустических сигналов | Оценка высокочастотных составляющих траекторий | |

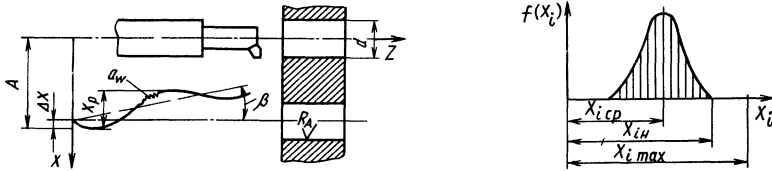
3. Прогнозирование потери точности из-за изнашивания

| | | | | |
|-----|--|--|---|---|
| 3.1 | Определение закономерностей изнашивания в функции режимов и эксплуатационных факторов | Результаты физико-статистического моделирования | Аналитическая зависимость скорости изнашивания от давления, скорости скольжения и других факторов | Используется информация о скоростях изнашивания пар трения из практики эксплуатации |
| 3.2 | Расчет износа сопряжений (например, направляющих) для данной комбинации входных параметров | Результаты реализации подпрограмм 1.4 (1.5) и 3.1 | Форма изношенной поверхности (направляющих) и ее изменение во времени | Используются формулы теории изнашивания машин и механизмов (с. п. 9.3) |
| 3.3 | Расчет значений и скорости изменения параметров траекторий при износе сопряжений | Результаты реализации подпрограмм 3.2 | Значение скорости изменения параметра для каждого цикла испытаний | |
| 3.4 | Статистическая обработка результатов прогнозирования | Результаты реализации подпрограммы 3.3 (из памяти ЭВМ) | Законы распределения скоростей изменения выходных параметров | Применяются стандартные подпрограммы |

| № | Подпрограмма | Входные данные | Результат | Примечание |
|---|---|---|--|--|
| 4 Расчет показателей качества и параметрической надежности | | | | |
| 4 1 | Оценка параметров областей состояний испытываемого станка | Результаты реализации подпрограммы 2 2 (или 2 3) и 2 4 | Размеры области состояния и ее вероятностные характеристики | Область состояний определяется для периода непрерывной работы станка |
| 4 2 | Расчет областей работоспособности для каждого из параметров | Требования к точности изготавливаемых изделий Данные о точности компонентов технологической системы | Размеры областей работоспособности при различных требованиях к точности обрабатываемых деталей | Учитываются требования нормативно-технической документации |
| 4 3 | Расчет запаса надежности для каждого из параметров | Результаты реализации подпрограмм 4 1 и 4 2 | Значения запаса надежности K_n для каждого из параметров | Если $K_n < 1$, то рассчитывается вероятность безотказной работы |
| 4 4 | Расчет показателей параметрической надежности | Результаты реализации подпрограмм 4 1, 4 2 и 3 4 | Ресурс по точности при заданной вероятности безотказной работы | Используется модель параметрического отказа |
| 4 5 | Оценка основных факторов, влияющих на качество и надежность станка | Диагностические сигналы и параметры траектории | Ранжирование основных факторов, влияющих на точность станка | Осуществляются диагностические процедуры |
| 5 Оптимизация параметров станка | | | | |
| 5 1 | Оптимизация параметров теплового поля станка | Результаты реализации подпрограмм 2 5 и 4 5 | Рекомендации по изменению теплового баланса станка | Осуществляется экспериментальная проверка результатов |
| 5 2 | Оптимизация технологических допусков на геометрические параметры станка | Результаты реализации подпрограмм 2 7 и 4 5 | Точность и качество поверхности основных сопряжений станка | Используют нормативы на точность обработки |
| 5 3 | Оптимизация по параметру жесткости | Результаты реализации подпрограмм 2 6, 2 8 и 4 5 | Технологические режимы обработки и ТУ для контактных поверхностей станка | Могут использоваться результаты дополнительных динамических испытаний станка |
| 5 4 | Оптимизация режимов обработки и области эксплуатации | Результаты реализации подпрограммы 1 2 | Рациональные режимы обработки для различных условий эксплуатации | Учитывают возможности станка |
| 5 5 | Оценка эффективности мероприятий по повышению износостойкости механизмов станка | Результаты реализации подпрограммы 3 4 и 3 3 | Оценка ресурса по точности при модернизации пар трения | Учитывают возможность применения новых материалов для пар трения |

Примечание Разделы 1, 2 и 4 относятся к автоматизированному эксперименту, разделы 3 и 5 — к моделированию процессов

17.2. Фрагмент сертификата по результатам программных испытаний



| Выходной параметр станка | Требуемая точность изделия, мм | Область работоспособности $X_{i \max}$, мкм | Область состояния по результатам испытаний (мкм) | | | Запас надежности $K_n = \frac{X_{i \max}}{X_{i \min}}$ | Примечание |
|---|--|--|--|--------------------|------------|--|---|
| | | | $X_{i \min}$ | $X_{i \text{ ср}}$ | σ_i | | |
| $X_1 = X_p$ — размах траекторий | Допуск на диаметр $\pm 0,1$ мм | $X_{1 \max} = 33$ (30 % допуска)* | 17 | 15 | 2 | 1,75 | Допустимо. Необходим прогноз ресурса |
| $X_2 = \text{tg}\beta$ — наклон траекторий | Конусность 0,05 мм на длине 100 мм | $X_{2 \max} = 25$ (50 % допуска) | 20 | 15 | 1 | 1,25 | |
| $X_3 = \Delta x$ — точность позиционирования | Расстояние между осями $\pm 0,1$ мм | $X_{3 \max} = 75$ (75 % допуска) | 111 | 70 | 7 | 0,9 | Необходимо повысить точность позиционирования |
| $X_4 = a_w$ — амплитуда высокочастотных колебаний | Параметр шероховатости $Ra = 0,32$ мкм | $X_{4 \max} = 0,30$ (90 % допуска) | 0,27 | 0,22 | 0,03 | 1,1 | Близко к предельному |

*Учитывается, что на точность диаметра влияет биение шпинделя.

Если полученные показатели качества и надежности станка соответствуют техническим требованиям, установленным нормативно-технической документацией или заказчиком, то испытания заканчивают. Если же необходимо улучшить характеристики станка, то осуществляют расчеты для оптимизации его параметров. При этом целевой функцией является требуемый уровень точности, а варьируемыми параметрами — те характеристики, которые выявлены при диагностировании станка, и те, которые входят в расчетные зависимости, применяемые при проектировании станка. Изменения могут быть внесены в размеры и конструкцию элементов станка, применяемые материалы, характеристики геометрической точности и жесткости элементов, тепловые поля станка, условия смазывания и охлаждения и др.

В первую очередь должны быть апробированы те изменения, которые можно реализовать на испытуемом образце станка, — например, улучшение теплоотвода из зоны шпиндельных подшипников, повышение геометрической точности и качества поверхности направляющих и т. п.

После этих изменений следует снова провести полный комплекс испытаний и определить новые показатели качества и надежности станка. В результате оценки качества и надежности станка может быть выдан сертификат (свидетельство) о его состоянии, в котором указывают, при каких условиях эксплуатации достигается заданная точность станка, а также в течение какого времени эксплуатации и с какой вероятностью эти показатели будут сохранять допустимые значения.

Кроме того, в сертификате следует указывать основные факторы, влияющие на точность станка и «слабые места» станка, состояние которых должно контролироваться в процессе эксплуатации станка более простыми диагностическими средствами.

В табл. 17.2 приведен пример фрагмента сертификата, полученного в результате оценки качества расточного станка методом программных испытаний для поступательного движения шпиндельной бабки.

Выходные параметры оценивают возможность станка по получению точности размера (X_1), конусообразности обработанного отверстия (X_2),

17.3. Фрагмент сертификата по результатам прогнозирования

| Выходной параметр | Область состояний по результатам испытаний | | Область работоспособности $X_{i\max}$ мкм | Запас надежности K_n | Результаты прогноза и расчета | | Расчет значения $P(t)$ | | Средний ресурс по параметру $T_{p\text{ ср}}$ лет |
|-------------------|--|-----------------------|---|------------------------|--------------------------------|--------------------|------------------------|------------|---|
| | $a_0 = X_{i\text{ ср}}$ | $\sigma_a = \sigma_i$ | | | $\gamma_{x\text{ ср}}$ мкм/год | σ_x мкм/год | $t=1$ год | $t=10$ лет | |
| X_1 | 15 | 2 | 33 | 1,75 | 0,45 | 0,8 | 0,9999 | 0,95 | 20 |
| X_2 | 15 | 1 | 25 | 1,25 | 0,70 | 0,22 | 0,9999 | 0,90 | 16 |
| X_3 | 50 | 4 | 75 | 1,20 | 2,00 | 0,23 | 0,9999 | 0,86 | 13 |

Примечание. Расчетные значения вероятности безотказной работы узла $P(t)=0,9997$ при $t=1$ год и $P(t)=0,730$ при $t=10$ лет. Ресурс по точности при $P(t)=0,95$ $T_p \approx 5$ лет и при $P(t)=0,5$ $T_p=12$ лет (средний ресурс).

точности расстояния A между обработанными отверстиями (X_3) и шероховатости поверхности (X_4). Максимально допустимые значения этих параметров $X_{i\max}$, определяющие область работоспособности, устанавливают исходя из требований к точности обработки с учетом доли в образовании погрешности других компонентов технологической системы (см. подразд. 2.1).

Область состояний $f(X_i)$ каждого параметра X_i характеризуется средним значением параметра $X_{i\text{ ср}}$, наибольшим значением $X_{i\text{ н}}$ и средним квадратическим отклонением σ_i . Для каждого параметра определяется запас надежности K_n .

Результаты оценки параметрической надежности для данного случая приведены в табл. 17.3.

Основной причиной потери работоспособности является износ направляющих. Механизм привода, не обеспечивающий точности позиционирования ($K_n < 1$), был модернизирован. Для улучшенного варианта механизма позиционирования (была применена более точная шарикоподшипниковая пара в системе привода) получен запас надежности $K_n = 1,2$.

В табл. 17.3 указаны значения математического ожидания $\gamma_{x\text{ ср}}$ и среднего квадратического отклонения σ_x скорости изменения выход-

ного параметра, полученные на основании испытания на изнашивание методом физико-статистического моделирования материала направляющих и расчета скорости изменения регламентированных параметров траектории при изнашивании направляющих.

Расчет вероятности безотказной работы станка $P(t)$ по каждому из параметров проведен по методам, изложенным в подразд. 9.4. при длительности работы станка $t=1$ год и $t=10$ лет (с учетом двухсменной работы станка и коэффициента загрузки 0,8).

На основании расчетов построена функция надежности — изменение вероятности безотказной работы узла станка $P(t)$ во времени (рис. 17.4), которая является полной характеристикой параметрической надежности.

Поскольку значения выходных параметров можно считать независимыми, вероятность безотказной работы системы $P(t)$ подсчитывают как произведение вероятностей для каждого из параметров.

Программный метод испытания новых моделей станков для оценки их качества и параметрической надежности, включающий оптимизацию конструктивно-технологических параметров станка, необходим при создании конкурентоспособных станков с высокими технико-экономическими показателями.

17.4. Диагностирование станков

Техническое диагностирование является средством повышения надежности, оценки качества изготовления и технического состояния станка, а также элементом программных испытаний.

Контроль готовности к работе механизмов и узлов современных металлорежущих станков, станков-автоматов, автоматических линий, гибких производственных систем (ГПС) осуществ-

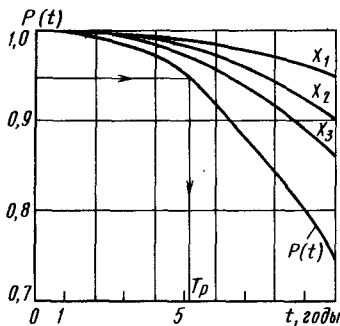


Рис. 17.4. Функция параметрической надежности для шпиндельной бабки расточного станка

вляется встроенными средствами технического диагностирования (циклоуказатели, манометры, маслоуказатели, амперметры, конечные выключатели, реле давления, индикаторы, датчики положения, информационно-измерительные системы, программы-тесты и т. д.), а аварии предотвращаются предохранительными устройствами. Встроенные средства технического диагностирования фиксируют информацию непрерывно, периодически или по мере необходимости. Получаемая диагностическая информация является необходимой, но далеко не достаточной для обеспечения надежной и эффективной работы оборудования.

Важнейшим средством повышения работоспособности и эффективности эксплуатации различных групп оборудования являются системы технического диагностирования (СТД).

Основные термины и определения технического диагностирования даны в ГОСТ 20911—75 и ГОСТ 20417—75.

СТД включает объект и средства диагностирования, устройства их сопряжения и, при необходимости, исполнителей, а также соответствующую техническую документацию.

Объектом диагностирования может являться узел станка, станок в целом, автоматическая линия, ГПС или их составные части.

Результатом диагностирования является заключение о техническом состоянии объекта с указанием, при необходимости, места, вида и причины дефекта.

Диагностирование может осуществляться во время функционирования объекта, на который поступают только рабочие воздействия — функциональное техническое диагностирование; диагностирование, при котором на объект подаются тестовые воздействия — тестовое техническое диагностирование.

Глубина поиска дефекта задается указанием составной части объекта диагностирования или ее участка, с точностью этой составной части определяется место дефекта.

Объект диагностирования (изделие в целом или его составная часть), ожидаемый результат диагностирования (определение технического состояния или поиск дефекта), характер диагностирования (функциональное или тестовое), а также требуемая глубина поиска дефекта (узел, деталь и т. д.) определяют структуру СТД и ее назначение (локальная для диагностирования составной части изделия или заготовки или общая для диагностирования изделия или заготовки).

Специфика металлорежущего оборудования обуславливает требования к СТД. В частности, СТД станков с ЧПУ имеет структуру, в основу построения которой положены следующие принципы [1]:

СТД по функциям, структуре и использу-

емым техническим средствам должна соответствовать уровню автоматизации производства, в котором эксплуатируются станки с ЧПУ;

СТД отдельного станка с ЧПУ, встроенного в автоматизированное производство (участок, цех и т. д.), должна включаться в автоматизированную систему управления производством (АСУП) и должна быть связана с другими системами информационными каналами;

СТД должна являться составной частью общей системы управления станком с ЧПУ и должна создаваться на единой с ней методологической и элементной базе с использованием существующих устройств систем управления и функционирования станка;

система ЧПУ (в том числе содержащая ЭВМ) должна иметь систему самодиагностирования на основе тест-программ;

СТД должна обеспечить эффективное диагностирование при наладке, эксплуатации, а также при подготовке и проведении планового ремонта станка.

На рис. 17.5 приведена структурная схема информационных связей СТД станка с ЧПУ в автоматизированном участке, в которую входят следующие блоки и связи:

1, II — информационный поток в систему соответственно учета хода производства и подготовки управления производством;

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — соответственно внешняя память, алгоритмы диагностирования, библиотека данных о состоянии правильного функционирования, библиотека тест-программ диагностирования, накопление текущей информации, специальные программы, рабочие массивы;

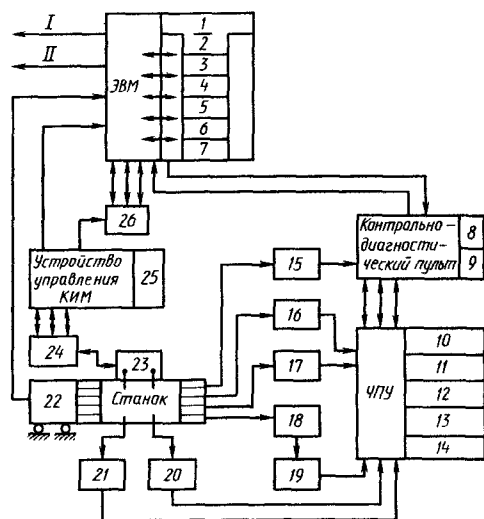


Рис. 17.5. Структурная схема СТД станка с ЧПУ



Рис. 17.6. Структура СТД

8,9 — соответственно индикация основных состояний станка, связь с ЭВМ (вызов тест-программ и телефонная связь со службой эксплуатации);

10, 11, 12, 13, 14 — соответственно вызов и преобразование сигналов от средств технического диагностирования, хранение алгоритмов и матобеспечения оперативного циклового диагностирования, передача диагностической информации в ЭВМ, прием от ЭВМ тест-программ и их отработка, выдача оперативной диагностической информации на контрольно-диагностический пульт;

15, 16, 17, 18 — соответственно средства готовности станка к работе, оперативного циклового диагностирования, оперативного узлового диагностирования, адаптивного управления;

19 — блок преобразования сигналов;

20, 21 — приборы соответственно активного и ручного контроля;

22 — аппаратура для специальных методов диагностирования;

23 — деталь;

24 — контрольно-измерительная машина (КИМ);

25 — обработка поступающей информации, определение критического значения размера детали, выдача диагностических признаков в ЭВМ;

26 — эксплуатационная служба.

СТД оборудования ГПС, используемого в механообрабатывающем производстве, включая гибкие производственные модули, а также автоматизированные средства транспортно-складской системы, должна обеспечивать следующее: требуемый уровень качества изготовления деталей, автоматизацию и централизацию контроля, заданную эффективность ГПС; полноту

и достоверность контроля; надежность средств диагностирования.

Содержание и характеристики СТД, определяющие ее структуру, регламентированы (рис. 17.6).

Для каждого объекта диагностирования имеется большое число *диагностических признаков* (параметров), используемых для определения его технического состояния. При осуществлении диагностирования изделия выбирают те признаки (параметры), контроль которых дает наиболее объективные сведения о состоянии машины, а затраты на создание данной СТД экономически целесообразны.

В современных СТД металлорежущих станков используют, как правило, не дискретные значения диагностического сигнала, а его функциональную зависимость. Сигнал в виде реализации некоторой закономерности заменяет показания целого ряда приборов, фиксирующих дискретные значения отдельных диагностических параметров.

При создании СТД станков и машин широко используют метод контрольных осциллограмм. При этом рабочие осциллограммы, снятые с проверяемого изделия или узла и регистрирующие изменения конкретного диагностического параметра, сравнивают с контрольной осциллограммой и устанавливают их отличительные признаки (симптомы). На основании этих симптомов по диагностическим картам определяют дефект.

Метод контрольных осциллограмм применяют при диагностировании поворотных делительных столов, силовых столов, гидроаппаратуры агрегатных станков, поворотных механизмов роботов и манипуляторов, отдельных механизмов станков.

| Причина неисправности | Частота преобладающей составляющей механических колебаний, Гц | Примечание |
|---|---|---|
| Колебания, возбуждаемые электромагнитным полем | $f_p = f_d z_p,$ $f_c = f_d z_c$ | Механические колебания должны исчезать при включении оборудования |
| Воздействие собственной частоты изгиба | $3f_b$ | — |
| Дефекты деталей муфт отклонение от соосности полу- муфт в одном направлении отклонение от соосности полу- муфт в двух направлениях дефект пальцевой муфты дефект зубчатой муфты Износ шлицевого соединения | $2n/60$ $4n/60$ $z_n n/60$ $z_m n/60$ $z_{шл} n/60$ | — — — — — |
| Ременная зубчатая передача переменная жесткость ремня, погрешности шага ремня, про- бег ремня | $f = lnk'/60 = lf_{pm}$ | $k' = f_{pm}/f_{шк} = 60f_{pm}/n$ |

*Модуляционные частоты

Обозначения n — частота вращения вала, мин^{-1} , $f_{отн} = n/60$ — относительная частота вращения внутреннего и наружного колец, D_r — диаметр тела качения, мм, D_d — диаметр центров качения, мм, β — угол контакта, z — число тел качения, f_4 — частота вращения сепаратора, Гц, E — модуль упругости материала тел качения, МПа, ρ — плотность материала тел качения, $\text{кг}/\text{м}^3$, k , l , m , q — номера гармоник, z_k — число зубьев зубчатого колеса, $z_{ш}$ — число зубьев шестерни, $f_{вк}$ — частота вращения колеса, Гц, $f_{вш}$ — частота вращения шестерни, Гц, $f_{зш}$ — зубцовая частота, Гц, p , m , $k=1, 2, 3$ — номера гармоник, $z_{ст}$ — число зубьев делительного колеса зуборезного станка, f_p , f_c — электромагнитные составляющие, обусловленные пазовыми частотами ротора и статора, Гц, f_d — частота вращения вала двигателя, Гц, z_p , z_c — число пазов ротора и статора, f_b — собственная частота поперечных колебаний вала, Гц, z_n — число пальцев, z_m — число зубьев муфты, $z_{шл}$ — число шлицев, f_{pm} — частота, обусловленная изменением жесткости ремня, Гц, $f_{шк}$ — частота вращения шкива, Гц, $l=1, 2, 3$, — номера гармоник

При диагностировании поворотных столов агрегатных станков в качестве диагностических параметров используют, в частности, давление насоса и угловую скорость планшайбы [4]

При создании СТД автоматических линий наиболее часто применяют метод временных интервалов, а в качестве диагностического параметра — длительность цикла

Для станков, предназначенных для финишной обработки с ЧПУ, применяется диагностирование по результатам обработки, так как информация, получаемая при измерении деталей после чистовых операций, несет в себе ряд диагностических признаков, функционально связанных с работоспособностью станка в целом или отдельных его узлов

Для узла станка, имеющего возвратно-поступательное перемещение, в качестве диагностического параметра принимают, например, износ, деформацию, степень коррозии трущихся поверхностей

При испытаниях шпиндельных узлов станков установлена корреляция между характеристиками его технического состояния и радиальной податливостью, температурной деформацией шпинделя и его опор, смещениями оси шпинделя и т.д.

Широкое применение получило **вибродиагностирование станков**.

Одним из распространенных способов выявления источников повышенной виброактивности является сопоставление частот дискретных составляющих спектра вибрации, действующих в рабочих узлах станка, с расчетными частотами возбуждений

Спектры вибраций измеряют на нескольких частотных режимах работы станка, сопоставляя расчетные частоты с реальным частотным спектром вибраций, и определяя резонансные зоны, вызванные функционированием определенного кинематического звена или узла. Для локализации источника повышенной виброактивности

ности в станках в ряде случаев удается использовать метод последовательного отключения. Метод дает надежную информацию, если при выключении одного узла не изменяются условия работы остальных.

Обнаружение в спектре вибросигнала составляющих с повышенным уровнем является основанием для поиска дефекта лишь при наличии установленной корреляционной связи между развитием дефекта и ростом амплитуды колебаний на частоте этого дефекта.

Известны локальные (для отдельных узлов станка), общие (для станка в целом) системы вибродиагностирования, использующие как бесконтактные средства измерения (индуктивные, емкостные и т. д.), так и контактные системы (пьезоэлектрические).

При диагностировании применяют методы, основанные на выделении и анализе дискретных составляющих колебаний на вынужденных частотах и частотах возбуждения, возникающих вследствие появления различных дефектов элементов конструкции.

На рис. 17.7 приведена структурная схема алгоритма вибродиагностирования станка по параметрам относительной круговой траектории.

В блоке 1 формируется диагностический банк данных на основе результатов исследований в области вибродиагностирования станков. Банк данных представляется в виде диагностической карты (см. табл. 17.4) неисправностей (блок 4), в которой приведены аналитические формулы расчета частот механических колебаний основных узлов станка и указаны причины (или источники), вызывающие колебания на этих частотах. Такая таблица, содержащая данные многочисленных испытаний, облегчает задачу локализации и идентификации источников колебаний.

Используя сборочные чертежи формообразующих узлов станка, по формулам, приведенным в диагностической карте, можно рассчитать значения большинства частот колебаний, которые могут появиться в процессе работы или испытания станка. Массив этих частот формирует блок 7.

Таких заранее спрогнозированных частот может быть больше, чем обнаруженных при экспериментах, так как не все возможные неисправности проявятся на конкретном станке или конкретном режиме испытания. С другой стороны, их может быть и меньше, так как дополнительно проявятся собственные и кратные собственным частоты, а также модуляционные частоты, которые трудно предсказать заранее, и, наконец, в конкретном оборудовании могут возникнуть колебания на непредсказуемых частотах.

Блок 2 формирует параметры круговой

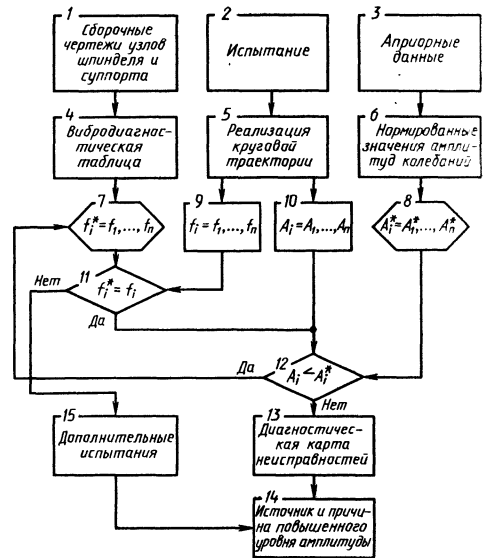


Рис. 17.7. Структурная схема алгоритма диагностирования «по результатам обработки»

траектории оси шпинделя для блока 5, получаемые в результате эксперимента (или серии заранее спланированных экспериментов: при вспомогательном ходе на разных частотах вращения шпинделя; при программном нагружении для разных статистических и динамических составляющих силы резания; при резании на разных технологических режимах и т. д.).

При испытаниях следует дополнительно определять собственные частоты колебаний шпиндельного и суппортного узлов в направлениях измерения. Для повышения достоверности их распознавания спектры колебаний измеряют минимум при двух различных частотах вращения шпинделя. Найденные собственные и кратные им частоты пополняют массив блока 7.

Если по диагностической карте неисправностей определяют только частоты возможных механических колебаний, то в процессе эксперимента формируются два массива — массив обнаруженных частот (блок 9) и массив амплитуд на обнаруженных частотах (блок 10).

Блок 3 формирует априорные данные, необходимые для нормирования значений амплитуды вибродиагностического сигнала.

Амплитуда на конкретной частоте нормируется, исходя, в первую очередь, из установленных требований к показателям качества обработанных на станке [7] изделий.

В блоке 6 осуществляется нормирование амплитуд колебаний.

Блок 8 формирует массив нормированных значений амплитуд колебаний для конкретных частотных диапазонов.

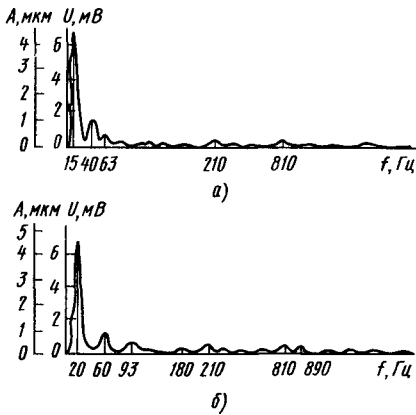


Рис. 17.8 Частотный спектр относительных колебаний шпиндельного узла при вспомогательном ходе: а — $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$, б — $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

В основу параметрического вибродиагностирования положено сравнение уровней колебаний на конкретных частотах, полученных в процессе испытаний с нормированными уровнями

Сравнение параметров выявленных колебаний осуществляется в логических блоках 11 и 12. Блок 11 выполняет сравнение колебаний по частоте. Если обнаруженная частота совпадает с предсказанной или близка к ней, то необходимо осуществить сравнение их амплитуд в блоке 12.

Если амплитуда превышает пороговое (нормированное) значение на конкретной частоте, проводится идентификация частот источников повышенного возбуждения с помощью диагностической карты неисправностей в блоке 13.

В блоке 14 устанавливаются источник и причина неисправностей (повышенного уровня амплитуды на конкретной частоте).

Если обнаруженная в процессе испытания частота колебаний не совпадает ни с одной из предсказанных, то следует вести диагностический поиск путем проведения дополнительных целенаправленных испытаний измерений спектров на нескольких частотных режимах, множественных испытаний на нескольких нагрузочных режимах, последовательного отключения отдельных механизмов, измерения динамических сил и мощности колебаний и т. д.

На рис. 17.8 приведен пример замеренных спектров относительных колебаний на вспомогательном ходу шпиндельного узла станка МС 12 250М1 при различных частотах вращения.

В результате диагностирования согласно представленному алгоритму близки к «опасным» уровням амплитуды колебаний на частотах, обусловленных изгибом вала шпинделя, на собственной частоте колебаний шпиндельного узла.

Для повышения глубины поиска неисправности, а также восполнения потерянной при спектральном анализе информации можно воспользоваться кепстральным анализом. Кепстр мощности (преобразование Фурье логарифма спектральной плотности) обладает высокой чувствительностью ко всяким (даже слабым) периодическим сигналам в спектре и может быть использован для их надежного обнаружения. В настоящее время отмечены лишь отдельные попытки применения кепстра при вибродиагностировании в основном коробок передач станков.

17.5. Конкурентоспособность станков

Оценка технического уровня, достигнутого при проектировании и создании новой модели станка, является последней стадией разработки этой сложной продукции.

Новый станок должен быть конкурентоспособным и найти возможно более широкий круг потребителей. Это связано как с достоинствами самого станка, так и с организацией сбыта, быстрым реагированием на нужды потенциальных потребителей.

Станок должен быть конкурентоспособным не вообще, а в рамках требований той или иной группы потребителей. Требования эти, отражающие «уровень потребителя», распределяются в довольно широком диапазоне. Изучая потребителя, нужно знать «распределение» требований потребителя по каждому из факторов конкурентоспособности: это и точность, и производительность, и уровень автоматизации, и насыщенность микропроцессорной техникой, и возможность встраивания в систему машин, и уровень сервиса.

В каждой из групп распределения конкурентоспособным может быть лишь станок, обладающий оптимальным техническим уровнем («невостребованный», избыточный технический уровень потребителю так же невыгоден, как и недостаточный). В мировой практике производства и потребления металлорежущих станков распределение технического уровня выпускаемого оборудования соответствует распределению потребностей в нем различных групп потребителей. При этом каждая фирма изготовитель работает на «своего» потребителя, конкурируя на сравнительно узком участке распределения потребностей, добываясь именно на этом участке высокие результаты. Поэтому целесообразно рассматривать конкурентоспособность, например токарного станка какой-либо модели вообще. Речь должна идти о конкурентоспособности в группах станков для мелких мастерских, ремонтных цехов, станков, встраиваемых в автоматические линии, гибкие производствен

ные системы, станков для черновой обработки отливок и поковок, станков для точной обработки и т. д.

На мировом рынке с одинаковым успехом продают (т. е. они являются конкурентоспособными) станки с ручным управлением и ГПМ, станки широкоуниверсальные и станки узкого технологического назначения, станки нормальной точности и станки прецизионные. Ориентировать весь выпуск станков на «высшие мировые достижения» по каждому из показателей технического уровня — значит заведомо выпускать в основной массе неконкурентоспособную продукцию, так как для большинства групп потребителей использование «высших достижений» нецелесообразно и неэкономично. Неэкономично, следовательно, и для экономики страны в целом.

Ниже рассмотрены основные факторы, определяющие конкурентоспособность станков.

1 *Нормативный технический уровень* — набор свойств изделия и его элементов, отраженный в нормативно-технической и рекламной документации (ТЗ, ТУ, каталогах, проспектах, рекламных листках и др.), служащий для ориентации потенциального потребителя. Изготовитель должен гарантировать, что «объявленные» значения параметров подтвердятся при контрольных испытаниях или в процессе эксплуатации станка.

При формировании показателей технического уровня нового станка следует правильно оценивать роль стандартизации. С одной стороны, необходимо учитывать требования стандартов, с другой, — следует обеспечивать конкурентоспособность по параметрам, выходящим за рамки возможностей стандартизации. Так, в передовых странах в стандарты закладываются как правило, только самые необходимые требования к функциональным характеристикам изделий, так как считается, что чрезмерная регламентация характеристик изделия может сдерживать технический прогресс.

Перспективными считаются стандарты, служащие средством взаимопонимания между народной торговлей и устранением технических барьеров в этой сфере. К ним относятся стандарты на термины, модульные системы, на методы сопряжения различных технических объектов и их элементов. Характерно применение стандартов «Типы, основные параметры, размеры», «Нормы точности и жесткости», «Общие нормы и требования», «Конструктивные элементы», «Стандарты по системам безопасного труда».

Стандарты «Системы показателей качества продукции» можно рассматривать как унификацию перечня информационных данных об изделиях.

Стандартизация важнейших характеристик

конечной сложной продукции требует стандартизации и комплектующих изделий (в том числе общемашиностроительного применения) материалов и веществ.

Основные изделия и материалы, входящие в состав станка, можно по мере их усложнения расположить в следующий ряд:

металлы, пластмассы, простейшие изделия из металлов и пластмасс (крепеж, арматура), резинотехнические изделия (уплотнения, ремни), резисторы, транзисторы и т. п., изделия общемашиностроительного применения — шариковые винтовые пары, зубчатые колеса, звездочки, цепи, гидро- и пневмоарматура, провода, кабели, штепсельные разъемы, выключатели и т. д.,

электро-, гидро- и пневмодвигатели, элементы электро-, гидро- и пневмоавтоматики, сложные электронные платы, блоки, датчики и т. п.,

редукторы, коробки передач, устройства удаления стружки, комплектные электро-, гидро- и пневмоприводы, гидростанции и т. п.,

устройства числового программного управления, программируемые командоаппараты, встраиваемые роботы и т. п.

По мере усложнения изделий падает «удельный вес» стандартизуемых показателей, и для характеристики технического уровня изделия требуется соответственно больший объем информации, выходящей за рамки стандартов.

2 *Уровень качества изготовления* — это степень реализации «нормативного технического уровня» в готовом изделии. Потребитель склонен предъявлять претензии прежде всего к качеству изготовления, которое, помимо прочих факторов, зависит от технологии изготовления изделий и его составных частей, средств и методов контроля, т. е. от тех элементов процесса производства, которые может и должен иметь в виду разработчик и изготовитель продукции при создании и организации производства новой модели станка.

3 *Эстетический уровень* — степень отражения в станке сложившихся в обществе эстетических представлений и норм, свойственных определенному периоду времени, применительно к виду оборудования. Эстетический уровень характеризуется выразительностью, целостностью композиции, совершенством производственного исполнения, стабильностью товарного вида изделия. Эстетический уровень станка определяется его компоновкой и архитектурой, применяемыми графическими и изобразительными элементами, цветовыми сочетаниями и декоративными свойствами применяемых материалов, чистотой выполнения контуров и сопряжений элементов, сохраняемостью элементов формы, поверхностей и декоративных покрытий (см. гл. 16).

4 *Уровень работы с потребителем* включает набор, качество и цену услуг, предоставляемых изготовителем или продавцом изделия потребителю. Уровень работы с потребителем следует отнести к важнейшим факторам конкурентоспособности сложной продукции. Так, например, ведущие станкостроительные фирмы предлагают покупателю их станков следующие услуги: по выбору оборудования, оптимального для принятой потребителем технологии, по обучению персонала, по разработке программного обеспечения, по монтажу, пусконаладке, техническому обслуживанию, ремонту, модернизации, обеспечению запчастями. Широкое распространение получает поставка оборудования, оснастки, инструмента, средств измерений, математического обеспечения и других слагаемых конкретного технологического процесса «из одних рук». Изготовитель, как правило, демонстрирует способность поставить потребителю как любое стандартное исполнение продукции из выпускаемого фирмой типоразмерного или параметрического ряда, так и нестандартную, с учетом специфики требований, модификацию.

Необходимая для развития такого рода услуг гибкость в работе фирмы наряду с организационными и техническими мерами в сфере производства и сбыта требует целенаправленных усилий разработчиков по обеспечению технической совместимости создаваемого изделия с элементами технологических систем машин и оборудования, развития унификации и блочно-модульных принципов построения конструкций, обеспечения оптимальной надежности и ремонтпригодности изделий. Изготовитель технологического оборудования все чаще вынужден конкурировать не на рынке универсального оборудования, а на рынке технологий, предлагая «из одних рук» наиболее приемлемое комплексное решение задач, стоящих перед потребителем в той или иной области техники. Только такой подход может обеспечить высокую конкурентоспособность металлообрабатывающего оборудования на современном рынке. Он требует от разработчиков станков и их изготовителей существенного расширения круга задач, решаемых при создании новой техники, организации ее производства и сбыта.

5 *Сроки поставки* — это время, в течение которого может быть выполнен заказ потребителя на разработку (поставку) оборудования или оказание тех или иных услуг.

Сроки поставки во многом определяют успех поставщика оборудования на рынке. В наибольшей степени влияние этого фактора конкурентоспособности проявляется при появлении на рынке новых изделий или новых технологий, требующих технологического оборудования, обладающего новыми свойствами и функциональными возможностями. Способность изготови-

теля в кратчайшие сроки предложить такое оборудование во многом гарантирует ему успех, так как по мере насыщения рынка и появления на нем конкурентов все больший вес будут приобретать другие факторы конкурентоспособности, по которым предлагаемая продукция может оказаться неконкурентоспособной.

Разработчик и изготовитель станков должны знать спрос и тенденции его развития (с учетом рассмотренных факторов конкурентоспособности), сокращать сроки проектирования, постоянно иметь отработанные, готовые к запуску в серию станки, оптимальные с точки зрения удовлетворения прогнозируемых потребностей рынка и затрат на перестройку технологического процесса производства при переходе на выпуск нового изделия, постоянно работать над повышением гибкости производства, в том числе путем унификации конструктивных элементов и технологических процессов на основе постоянной работы по их совершенствованию.

6 *Цена изделия* — преysкурантная (договорная, контрактная), цена оборудования, услуг — отражает как сумму потребительских свойств изделия, так и уровень затрат на его производство. Потребитель готов платить за каждый из факторов конкурентоспособности, характеризующих изделие, или сопутствующие его приобретению услуги, но не больше, чем за аналогичную продукцию, предлагаемую конкурентом. Побеждает тот, кто предлагает больше за ту же цену (функциональные возможности изделия, комплектность поставки, услуги и т. п.) или назначает меньшую цену за ту же продукцию. И в том, и в другом случае изготовитель должен обеспечить себе прибыль, не уступающую прибыли конкурента (иначе он отстанет от конкурента по уровню производства, научных разработок, квалификации кадров и т. п.). Следовательно, перед разработчиком и изготовителем стоит задача снижения собственных затрат на выпуск единицы продукции, т. е. повышения эффективности использования средств, вкладываемых в разработку и производство продукции.

Кроме перечисленных основных факторов, определяющих конкурентоспособность станков, могут учитываться и другие, выявленные при детальном изучении рынка — групп потребителей и их требований, областей возможного применения создаваемой техники, достижений возможных конкурентов во всех областях их деятельности и т. п. В тех случаях, когда поставщиком продукции (например, при поставках на экспорт) является фирма-посредник, она стремится удовлетворить требования рынка по факторам конкурентоспособности, оставшимся вне поля зрения изготовителя. Формы работы посредника при этом различны кон-

структивные доработки с учетом запросов конкретных потребителей, повышение эстетического уровня оборудования, организация обучения потребителя, создание сервисной сети, консультирование потребителя, сокращение сроков поставки, реклама и т. д. Однако ограниченные инженерно-технический потенциал и производственные мощности посредника объективно заставляют его работать только с той частью продукции, доведение которой до уровня требований рынка приносит максимальную прибыль (минимальные собственные затраты при стабильной оплате посреднических услуг).

Остальная масса продукции выхода на рынок не получает. Изготовитель может предпринимать меры по повышению технического уровня продукции, качества ее изготовления. Но продукция по-прежнему не находит потребителя, потому что изготовитель не сумел учесть и с пользой для себя и потребителя реализовать все факторы ее конкурентоспособности. Иными словами, продукция оказывается неконкурентоспособной, если неконкурентоспособен сам изготовитель.

Таким образом, ключом к обеспечению конкурентоспособности продукции является конкурентоспособность изготовителя, т. е. его способность обеспечить эффективность взаимодействия с потребителем, не уступающую уровню, достигнутому конкурентами. Под эффективностью взаимодействия с потребителем следует понимать прибыль, которую может получить потребитель от использования приобретенного оборудования, и прибыль, которую получает сам изготовитель при продаже. Такой подход позволяет устранить противоречия в понимании проблемы и поисках путей ее решения.

Таким образом, целью, объединяющей деятельность всех участников процесса разработки, производства и доведения изделия до потребителя, должно быть обеспечение конкурентоспособности изготовителя, а следовательно, и самого изделия.

Задача повышения технического уровня соз-

даваемой техники должна рассматриваться как составная часть проблемы конкурентоспособности и должна решаться на основе анализа факторов конкурентоспособности и альтернативных путей ее достижения.

Список литературы

1. Баталин А. А., Камышев А. И., Черпачков Б. И. Основные принципы построения системы технического диагностирования станков с ЧПУ//Станки и инструмент. 1980. № 5. С. 5—8.
2. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
3. Макаров Р. А. Средства технической диагностики машин. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
4. Нахалетян Е. Г. Контроль и диагностирование автоматического оборудования. М.: Наука, 1990. 272 с.
5. Проников А. С., Исаченко В. А., Аполлонов Ю. С., Дмитриев Б. М. Испытания станков программным методом в испытательно-диагностическом центре//Станки и инструмент. № 9. 1990. С. 8—12.
6. Проников А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
7. Селезнева В. В. Связь параметров траектории оси шпинделя с показателями качества детали//Станки и инструмент. 1985. № 1. С. 8—10.
8. Техническая диагностика/И. М. Синдеев, В. Ф. Воскобоев, Д. В. Гаспаров и др. Надежность и эффективность в технике: Справочник: Под ред. В. В. Ключева, П. П. Пархоменко. М.: Машиностроение, 1987. 352 с.
9. Технические средства диагностирования/В. В. Ключев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др. Справочник: Под ред. В. В. Ключева М.: Машиностроение, 1989. 672 с.

Оглавление

| | | | |
|---|-----|--|-----|
| Предисловие (А С Проников) | 3 | 5 3 Математическое моделирование станочных узлов и систем (Г Н Васильев) | 144 |
| Глава 1 | | 5 4 Структурный синтез станочных конструкций (Г Н Васильев) | 152 |
| Состояние и основные тенденции развития станков и станочных систем (И А Ординарцев) | 4 | 5 5 Параметрический синтез станочных конструкций (Г Н Васильев) | 155 |
| 1 1 Станочный парк | 4 | 5 6 Оптимизация при проектировании (А В Пуш) | 161 |
| 1 2 Основные направления развития современных станков и станочных систем | 8 | 5 7 Примеры автоматизированного проектирования (А В Пуш, Г Н Васильев, Ю И Кириллов) | 167 |
| Глава 2 | 17 | Глава 6 | |
| Станок и его технические показатели | | Работоспособность станков | 176 |
| 2 1 Станок как основной компонент технологической системы (А С Проников) | 17 | 6 1 Показатели и критерии работоспособности станка (А С Проников) | 176 |
| 2 2 Выходные параметры станка по показателю точности (А С Проников) | 17 | 6 2 Геометрическая и кинематическая точность станка (А С Проников) | 178 |
| 2 3 Показатели технического уровня станка (Л П Толстых) | 20 | 6 3 Силы, действующие в станках (П М Чернянский) | 184 |
| 2 4 Оценка технического уровня станка (Л П Толстых) | 25 | 6 4 Жесткость и силовые смещения в станках (П М Чернянский) | 189 |
| Глава 3 | 30 | Глава 7 | |
| Область применения станков | | Тепловые деформации станков (А И Бельзецкий) | 200 |
| 3 1 Классификация станков по технологическому назначению (А С Проников) | 30 | 7 1 Тепловые погрешности и их влияние на точность станка | 200 |
| 3 2 Технические характеристики отечественных станков (В С Белов, В С Стародубов) | 34 | 7 2 Расчет мощности тепловыделения в механизмах и системах станка | 207 |
| 3 3 Технические характеристики основных групп зарубежных станков (В С Стародубов, Г Г Лебязьев) | 56 | 7 3 Расчет температурных полей основных элементов станка | 211 |
| Глава 4 | 86 | 7 4 Тепловые смещения формирующих узлов станка | 215 |
| Проектирование технологии механической обработки на станках | | Глава 8 | |
| 4 1 Режущий инструмент (В Н Подураев) | 86 | Динамика станков (В А Кудинов) | 221 |
| 4 2 Выбор режимов обработки резанием (В Н Подураев) | 112 | 8 1 Анализ динамической системы станка | 221 |
| Глава 5 | 123 | 8 2 Расчет характеристик упругой системы станок—приспособление—инструмент—заготовка | 222 |
| Этапы проектирования станков, автоматизация проектирования | | 8 3 Расчет динамических процессов при установочных и вспомогательных движениях | 225 |
| 5 1 Основные этапы проектирования и освоения новых станков (А В Пуш) | 123 | 8 4 Расчет динамических процессов при резании и их влияние на точность обработки | 231 |
| 5 2 Автоматизированное проектирование станков (А В Пуш, Г Н Васильев, Ю И Кириллов) | 126 | | |

| | | | |
|---|-----|--|-----|
| Глава 9 | | Глава 13 | |
| Надежность станков | | Проектирование электрической схемы станка (В И Сапожников) | 311 |
| (А С Проников) | 239 | 13 1 Функциональные электрические | |
| 9 1 Основные показатели надежности станков и их нормирование | 239 | схемы и элементы | 311 |
| 9 2 Причины потери станком работоспособности | 246 | 13 2 Электродвигатели | 314 |
| 9 3 Расчеты на износ сопряжений станков | 252 | 13 3 Типовые узлы электрических схем станка на бесконтактных элементах | 333 |
| 9 4 Модели параметрических отказов и прогнозирование надежности | 256 | | |
| 9 5 Оценка надежности сложных систем | 259 | Глава 14 | |
| 9 6 Основные методы повышения надежности станков | 261 | Проектирование гидравлических и пневматических схем станка (В В Громов) | 339 |
| | | 14 1 Структура, элементная база и области применения станочных гидропневмоприводов | 339 |
| Глава 10 | | 14 2 Исходные данные и порядок разработки гидропневмосхемы | 345 |
| Расчет и выбор основных параметров станка | 264 | 14 3 Гидравлические и пневматические исполнительные двигатели | 347 |
| 10 1 Проектное формирование новой модели станка (Ю С Аполлонов) | 264 | 14 4 Типовые схемы управления исполнительными двигателями | 349 |
| 10 2 Выбор основных геометрических параметров станка (В А Семенов) | 266 | 14 5 Кондиционеры рабочей жидкости и сжатого воздуха | 359 |
| 10 3 Обоснование выбора основных технических характеристик станка (В П Романов) | 269 | | |
| 10 4 Выбор основных параметров узлов станка на примере шпиндельного узла (В П Романов) | 272 | Глава 15 | |
| 10 5 Приближенная оценка точности станка (Ю С Аполлонов) | 278 | Системы управления (В С Стародубов) | 365 |
| 10 6 Технико-экономическое обоснование эффективности создания новой модели станка (В А Семенов) | 279 | 15 1 Классификация и структура систем управления | 365 |
| | | 15 2 Системы числового программного управления и варианты их построения | 372 |
| Глава 11 | | 15 3 Подготовка и расчет управляющих программ для систем автоматического управления станками | 383 |
| Компоновка станка | | 15 4 Адаптивные системы управления | 389 |
| (О И Аверьянов) | 282 | 15 5 Выбор и проектирование систем ЧПУ | 392 |
| 11 1 Структура компоновок | 282 | | |
| 11 2 Формирование структуры парка металлорежущих станков | 284 | Глава 16 | |
| 11 3 Модульный принцип построения компоновок станков | 286 | Художественное проектирование и эргономика станков (С Н Борисов) | 396 |
| 11 4 Структурное формирование комплекта модулей | 287 | 16 1 Общие требования технической эстетики | 396 |
| | | 16 2 Эргономические требования, предъявляемые к проектируемым станкам | 396 |
| Глава 12 | | 16 3 Эстетические требования, предъявляемые к проектируемым станкам | 404 |
| Проектирование кинематической схемы станка | 292 | | |
| 12 1 Классификация и структура кинематических цепей станка (Б А Усов) | 292 | Глава 17 | |
| 12 2 Кинематические расчеты на основе уравнений баланса (Б А Усов) | 294 | Испытания станков | 418 |
| 12 3 Графоаналитический метод расчета коробок скоростей и подач (А С Проников) | 296 | 17 1 Нормативное обеспечение и организация контрольных испытаний станков (Е И Тавер) | 418 |
| 12 4 Кинематические схемы станков с ЧПУ и электронные связи в станках (Б А Усов) | 302 | 17 2 Основные виды испытаний станков (А С Проников) | 421 |
| 12 5 Разработка и проектирование кинематической схемы (Б А Усов) | 307 | 17 3 Программный метод испытания станков (А С Проников) | 424 |
| | | 17 4 Диагностика станков (В В Селезнев) | 432 |
| | | 17 5 Конкурентоспособность станков (Л П Толстых) | 438 |

Учебно-справочное издание

**Проников Александр Сергеевич,
Аверьянов Олег Иванович,
Аполлонов Юрий Сергеевич и др.**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И СТАНОЧНЫХ СИСТЕМ

В трех томах
Том I

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНКОВ

Редакторы *Н.П. Гурвич, И.С. Форстен*
Переплет художника *В.С. Голубева*
Художественный редактор *С.Н. Голубев*
Технический редактор *Е.П. Смирнова*
Корректор *Л.Я. Шабашова*

ЛР № 020523 от 23.04.92 (Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ЛР № 080003 от 15.08.91 (Машиностроение)

Сдано в набор 20.10.92. Подписано в печать 05.09.94. Формат 70x100 1/16.

Бумага офсетная. Гарнитура литературная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 36,06. Усл.кр.-отт. 38.71. Уч.-изд.л. 46,25.

Тираж 3000 экз. Заказ 1979

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Издательство «Машиностроение». 107076, Москва, Стромьинский пер., 4.

Типография АО «Внешторгиздат»
127576, Москва, Илимская ул., 7.