

Г. В. Никитенко

# ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ



Г. В. НИКИТЕНКО

# ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

*Издание второе, исправленное и дополненное*

**РЕКОМЕНДОВАНО**

УМО РАЕ по классическому университетскому и техническому образованию в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлениям:

110800.62, 110800.68 — «Агроинженерия»,

140400.62, 140400.68 — «Электроэнергетика и электротехника»

и специальностям:

110302.65 — «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»,

140211.65 — «Электроснабжение»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •  
МОСКВА •  
КРАСНОДАР •  
2013

ББК 31.2я73

Н 62

**Никитенко Г. В.**

**Н 62** Электропривод производственных механизмов: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2013. — 224 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-1468-0**

Учебное пособие содержит подробное изложение основных разделов дисциплины «Электропривод» в соответствии с требованиями государственных общеобразовательных стандартов для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям «Агроинженерия» и «Электроэнергетика и электротехника».

В пособии даются основные понятия электрического привода, рассматриваются вопросы электропривода постоянного и переменного тока. Изложены основы динамики и энергетики, а также особенности работы электроприводов в сельскохозяйственном производстве. Приведены примеры решений типовых задач в электронной среде Mathcad.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, аспирантов, преподавателей и слушателей ФПК.

**ББК 31.2я73**

**Рецензенты:**

**С. В. ОСЬКИН** — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электрические машины и электропривод» Кубанского государственного аграрного университета; **С. М. ВОРОНИН** — доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетика» Азово-Черноморской государственной агроинженерной академии.

Зав. редакцией инженерно-технической литературы

*В. А. Мусеева*

ЛР № 065466 от 21.10.97

Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10  
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

**Издательство «ЛАНЬ»**

lan@lanbook.ru; www.lanbook.com

192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.

Тел./факс: (812) 412-29-35, 412-05-97, 412-92-72.

Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

**ГДЕ КУПИТЬ**

**ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:**

**по России и зарубежью**

«ЛАНЬ-ТРЕЙД». 192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13  
тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82; тел./факс: (812) 412-54-93  
e-mail: trade@lanbook.ru; ICQ: 446-869-967 www.lanpbl.spb.ru/price.htm

**в Москве и в Московской области**

«ЛАНЬ-ПРЕСС». 109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, д. 6/19  
тел.: (499) 178-65-85; e-mail: lanpress@lanbook.ru

**в Краснодаре и в Краснодарском крае**

«ЛАНЬ-ЮГ». 350072, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1  
тел.: (861) 274-10-35; e-mail: lankrd98@mail.ru

**ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ: интернет-магазины:**

Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>

«Сова»: <http://www.symplex.ru>; «Ozon.ru»: <http://www.ozon.ru>

«Библион»: <http://www.biblion.ru>

**Обложка**

*Е. А. ВЛАСОВА*

© Издательство «Лань», 2013

© Г. В. Никитенко, 2013

© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

**Р**ост производительности труда, наращивание объемов производства, удешевление выходной продукции, обеспечение постоянного технического прогресса в промышленности и агропромышленном комплексе страны невозможно без внедрения новой техники и современных технологий.

Концепция инновационного подъема и развития всех отраслей народного хозяйства базируется на широком внедрении передовых научных и технологических достижений в области ресурсосбережения, нанотехнологий и энергосберегающего оборудования. Техническое развитие механических машин и агрегатов, составляющих основу разнообразных технологических линий и производственных процессов, в значительной мере определяется совершенством входящих в их состав электроприводов.

Повышение технического уровня автоматизированного электропривода должно проходить по следующим основным направлениям:

- разработка и выпуск комплектных приводов с использованием современных преобразователей и микропроцессорной техники, обладающих высокой степенью надежности, унификацией и улучшенными энергетическими показателями;
- расширение области применения регулируемого асинхронного электропривода;
- оснащение нового оборудования и переоснащение эксплуатируемых производственных механизмов энерго-

сберегающими типами электроприводов на основе вращательных, линейных, шаговых и вентильных электродвигателей;

- создание новых математических моделей, программных продуктов и роботизированных рабочих мест для более быстрого проектирования всех элементов электропривода;
- подготовка инженерно-технических и научных кадров, способных отслеживать и обобщать мировые технические достижения с новыми подходами, эксплуатировать и разрабатывать высокоэффективные, надежные, обладающие высокими удельными характеристиками электроприводы.

Отличительными особенностями учебного пособия являются:

- полнота и системность изложения материала по основным разделам дисциплины «Электропривод» в объеме, предусмотренном государственными образовательными стандартами для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям: 110800.62, 110800.68 — «Агроинженерия» и 140400.62, 140400.68 — «Электроэнергетика и электротехника»;
- наличие дидактического материала — вопросы для контроля, примеры решения задач, которые дают возможность закреплять изученный материал и планомерно развивать у студентов стремление к самостоятельной инженерной работе;
- добавление главы, в которой решение задач электропривода представлены в электронной среде *Mathcad* с целью привития студентам навыков использования компьютеров и современных электронно-вычислительных продуктов, применяемых для повышения степени автоматизации математических расчетов и быстрого построения графических зависимостей, а также способствующих более эффективному усвоению изучаемого материала и сокращению времени вычислений.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**В** различных литературных источниках по электроприводу приводятся самые разнообразные определения электропривода. Наиболее полное понятие представлено в ГОСТ 50369–92 «Электроприводы. Термины и определения». Электропривод (ЭП) — электромеханическая система, состоящая из электродвигательного (ЭД), преобразовательного (ПУ), передаточного (ПМ) и управляющего (УУ) устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления положениями координат вращающихся и возвратно поступательных элементов. Принципиальная структурная схема электропривода приведена на рисунке 1.1. Основное назначение электропривода — создание полезной работы на выходном валу нагрузочной машины за счет преобразования электрической энергии в механическую.

На рисунке 1.2 представлена упрощенная схема подключения асинхронного электрического двигателя к трехфазной сети.

В сельскохозяйственном производстве в настоящее время используется большое разнообразие электрифицированных машин и механизмов, но наиболее широкое распространение получили следующие электромеханические установки: насосные агрегаты, вентиляторы, крановые механизмы, устройства для раздачи кормов и уборки навоза, дробилки, системы сортировки и очистки семян, мобильные транспортные средства, ручной инструмент, сепараторы молока и т. д.

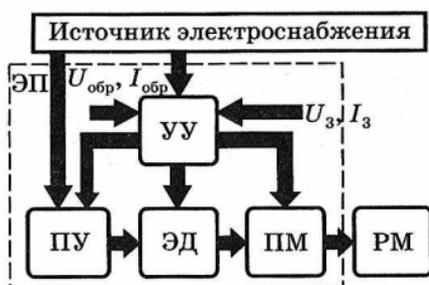


Рис. 1.1

Функциональная схема электропривода:

УУ — устройство управления; ПУ — преобразовательное устройство; ЭД — электродвигатель; ПМ — передаточный механизм; РМ — рабочая машина; ЭП — электропривод.

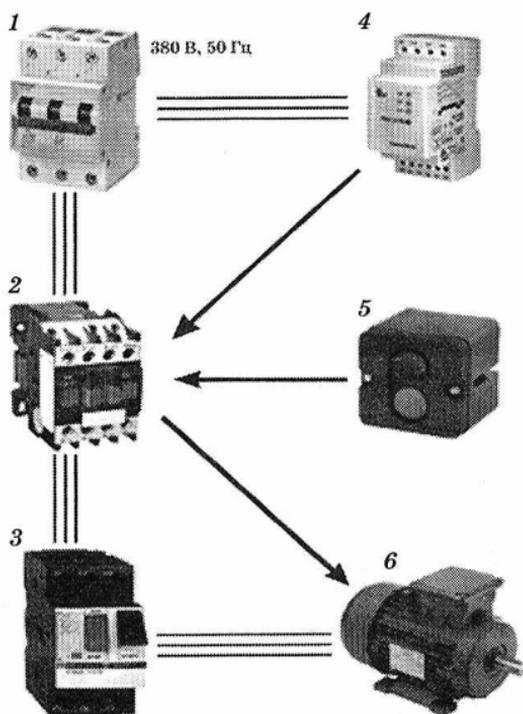


Рис. 1.2

Упрощенная схема подключения асинхронного электропривода:

1 — вводной автоматический выключатель; 2 — магнитный пускатель; 3 — тепловое реле; 4 — реле контроля фаз и уровня напряжения; 5 — кнопки управления; 6 — электродвигатель.

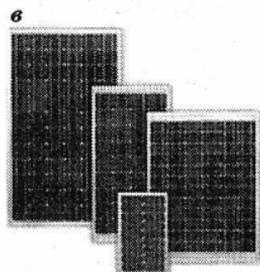
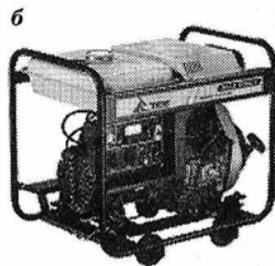
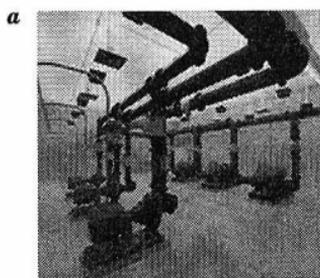


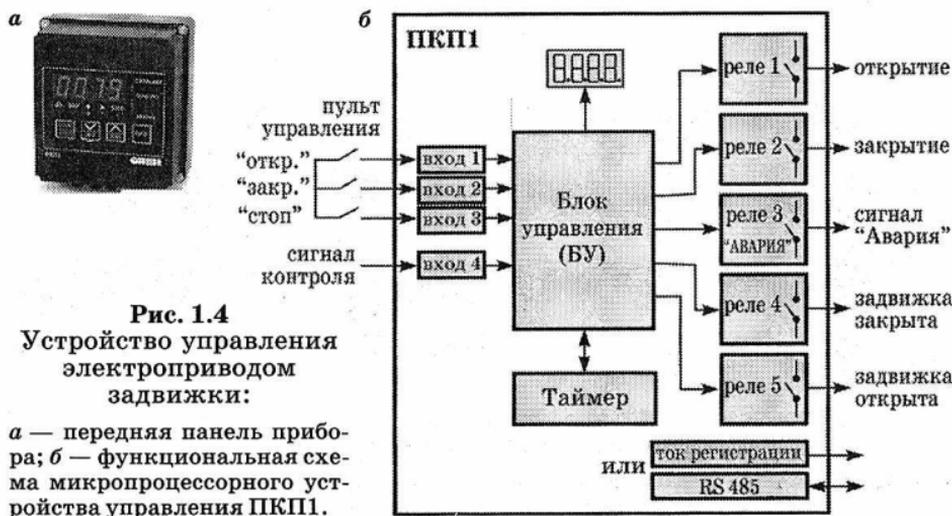
Рис. 1.3

Примеры источников электроснабжения:

а — подключение к сети электропривода насосного агрегата; б — дизель-генератор; в — панели солнечных батарей.

**Источником электроснабжения** электрического привода традиционно может быть: электрическая сеть, автономный бензо-дизель-генератор, химические аккумулялирующие устройства или возобновляемые источники энергии, например панели солнечных батарей, ветроэнергетические установки, электростанции на биогазе, морские, волновые и приливные источники электроэнергии и т. д. На рисунке 1.3 в качестве примера представлены источники электроснабжения, относящиеся к рассмотренным группам.

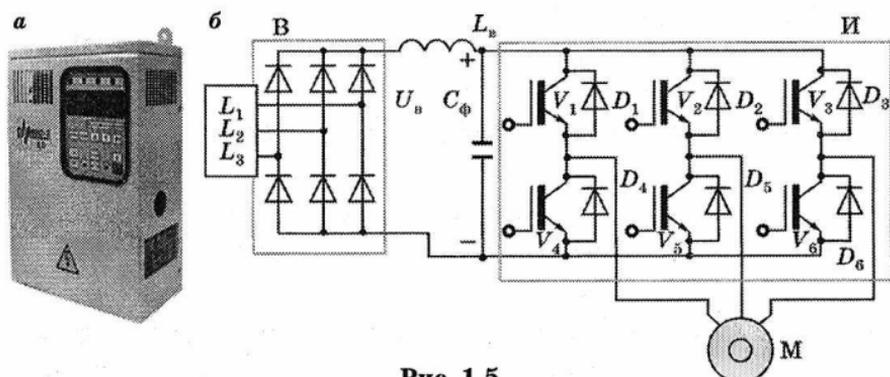
**Устройство управления** применяется для выработки управляющих сигналов силовой энергетической части электропривода, в состав которой входят преобразующее устройство, электрическая машина и передаточный механизм. На вход УУ поступают задающие сигналы по току или напряжению, а также импульсы обратных связей. На выходе вырабатывается необходимая функциональная зависимость управления. В состав управляющих устройств входят микропроцессорные средства и разнообразная компьютерная техника. На рисунке 1.4 представлено устройство управления и защиты электропривода задвижки фирмы «ОВЕН», ПКП1 и его функциональная схема. Прибор ПКП1 предназначен для управления задвижками и затворами в системе «Водоканал» и защиты их механизмов и электроприводов при заклинивании без применения концевых выключателей.



**Преобразовательное устройство** разработано для коммутации и преобразования электрических параметров на входе и выходе. ПУ способно изменять род тока, форму, амплитуду и скважность импульсов входного напряжения и тока, частоту питающей сети и регулировать обороты вращения с учетом обратных связей. В качестве преобразовательных устройств используют магнитные пускатели, контакторы, выпрямители, тиристорные коммутаторы, частотные преобразователи (ПЧ), регуляторы напряжения, устройства плавного пуска.

На рисунке 1.5 изображены преобразователь частоты серии ОМЕГА-2, применяемый для изменения угловой частоты вращения выходного вала электродвигателя, и принципиальная электрическая схема ПЧ на *IGBT*, транзисторах, обладающих более высокой частотой переключения, что позволяет вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы с минимальным искажением.

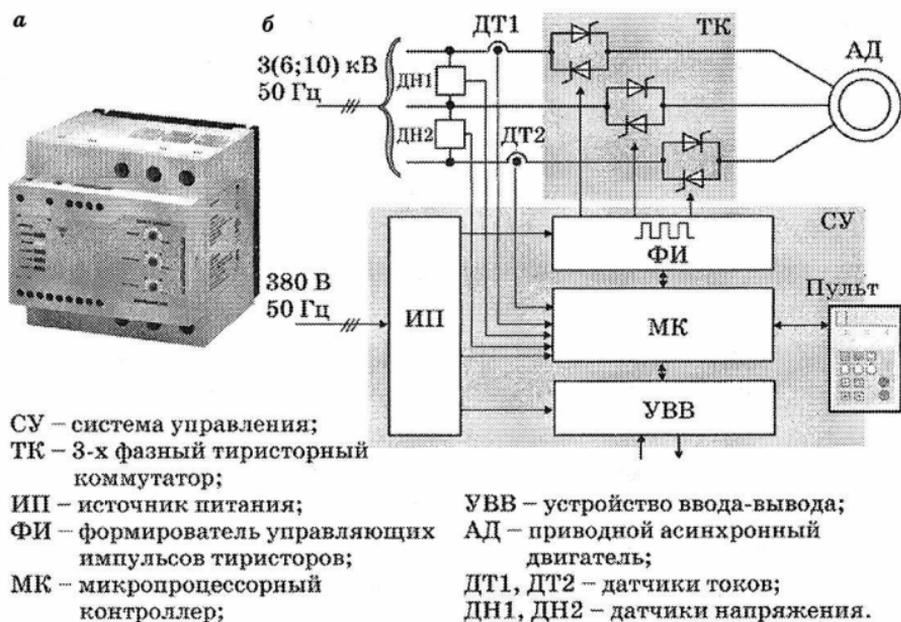
Устройства плавного пуска (УПП) (рис. 1.6) электродвигателей, производимые на базе тиристоров, предназначены для постепенного запуска и остановки двигателей и представляют собой тиристорное трехфазное регулирующее устройство. Пусковые устройства предназначены для работы с трехфазными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Разработанные на элементной базе отечественных и зарубежных ведущих европейских производителей УПП позволяют мягко управлять элект-



**Рис. 1.5**

Преобразовательное устройство для электропривода:

*a* — ПЧ для частотно регулируемых асинхронных электроприводов насосов, компрессоров, вентиляторов; *б* — принципиальная схема управления силовой части ПЧ с широтно-импульсной модуляцией формы токов.



**Рис. 1.6**

Внешний вид устройства плавного пуска (а) и функциональная схема (б), совмещенная с устройством управления работой асинхронного электродвигателя

родвигателем, используя его в системах автоматизации. К достоинствам систем плавного пуска следует отнести: регулировку электромагнитного момента, уменьшение пускового тока, минимизацию потерь в тиристорах, возможность каскадного запуска электрических машин одним УПП, снижение износа двигателей и редукторов, сокращение расходов на обслуживание.

Выпускаются импортные серии *ESL*, *ATS*, *RSE* и отечественные типа *Triol*, *Kimo*.

**Электрический двигатель** предназначен для непосредственного преобразования электрической энергии в механическую и наоборот. Электродвигатели подразделяются на синхронные, асинхронные и машины постоянного тока. Наиболее широкое распространение в промышленности и сельскохозяйственном производстве получил электропривод на основе асинхронного короткозамкнутого электрического двигателя и электродвигателя с фазным ротором. В настоящее время выпускаются общепромышленные унифицированные асинхронные электродвигатели на пере-

менное напряжение питания 380, 660 В, с частотой тока 50 Гц. Наиболее известны серии трехфазного типа: АИ, 7АИ, 5А, 6А, и постоянного тока класса: 2П, 4П, 5П, 6П на напряжение 220, 440 В. Электродвигатели асинхронные трехфазные с фазным ротором серий 5АНК, АК4, 6АК, АДФ предназначены для привода механизмов, требующих изменения частоты вращения. Используются в качестве привода вентиляторов, дымососов, компрессоров, металлорежущего и другого оборудования. Широкое распространение получили специализированные модификации двигателей, например, для крановых механизмов разработан линейный ряд *МТФ* и *МТКФ*. В помещениях с повышенной взрывоопасностью, высокой влажностью или агрессивной средой используют электрические двигатели специального назначения — 2В, 2ВР, ВРП. Наряду с применением электродвигателей указанных групп до сих пор эксплуатируются и ранее выпускавшиеся двигатели единой серии 4 А.

На рисунке 1.7 представлены фотографии внешнего вида асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым и фазным ротором и машины постоянного тока.

Асинхронный электродвигатель обладает простотой обслуживания, повышенной надежностью, высокой нагрузкой на отказ, улучшенными удельными характеристиками (отношение потребляемой мощности к общему объему двигателя или к его активным материалам) по сравнению с машиной постоянного тока при одной и той же номинальной мощности.

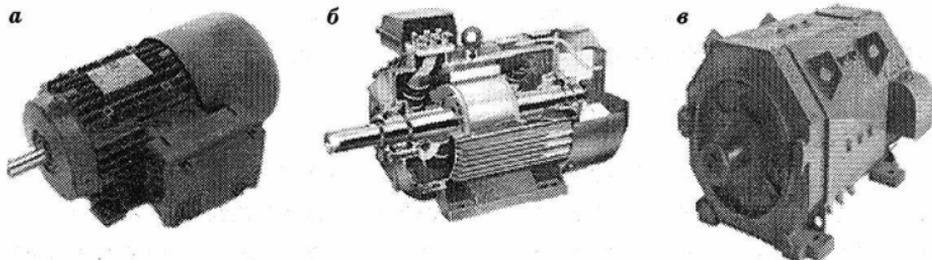


Рис. 1.7

Внешний вид электродвигателей:

а — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; б — электродвигатель с фазным ротором; в — машина постоянного тока.

**Передаточный механизм** необходим для передачи механической энергии от электродвигателя к исполнительному органу рабочей машины и согласования вида и скоростей движения. С целью получения высокоэффективного, энергосберегающего электропривода рекомендуется выбирать электрические машины с высокими скоростями вращения  $1500\text{--}3000\text{ мин}^{-1}$ , что противоречит методики подбора рабочих машин. Для длительного и нормального функционирования рабочей машины в составе электропривода необходимо с точки зрения механической прочности и сохранения высокой производительности не увеличивать обороты вращения рабочего органа более чем  $500\text{ мин}^{-1}$ . В качестве устранения существующего противоречия используются разнообразные передаточные устройства. Различают зубчатые, цепные, ременные передачи, вариаторы, редукторы, механические и электромагнитные муфты.

Наиболее широкое распространение в отраслях промышленности и агропромышленного комплекса находят редукторные и ременные передачи. Промышленность выпускает редукторы цилиндрические двухступенчатые типа РМ и РК, с планетарной зубчатой передачей серий МПз 300, червячные марки Ч, 2Ч, мотор-редукторы МЦ2В, М1Ц2У и вариаторы МВ. Выбор в пользу применения мотор-редуктора следует производить в случаях, когда необходим компактный привод.

В последнее время в системах автоматизированного электропривода все чаще и чаще применяются электромагнитные муфты класса ЭМ и ЭТМ. Электромагнитные муфты обеспечивают плавное регулирование передаваемого момента и частоты вращения, позволяют ограничивать крутящий момент, осуществлять плавность процесса пуска, изменять направление вращения и выполнять торможение по заданному закону.

Фрикционные пары в электромагнитных муфтах сцепляются под действием магнитного притяжения между деталями, находящимися на ведущих и ведомых частях привода. Притяжение возникает благодаря пропусканию через обмотку электромагнитного тока, создающего магнитный поток требуемой величины.

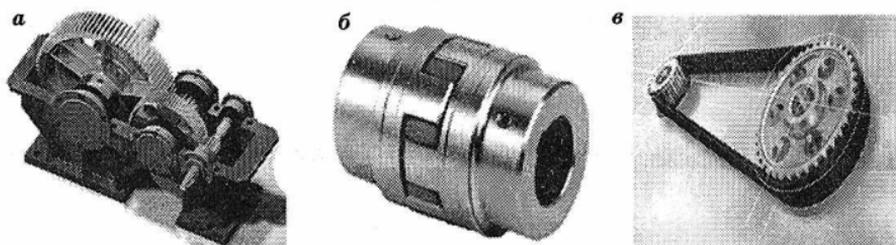


Рис. 1.8  
Внешний вид:

*a* — многоступенчатого редуктора; *b* — электромагнитной муфты; *в* — зубчато-ременной передачи.

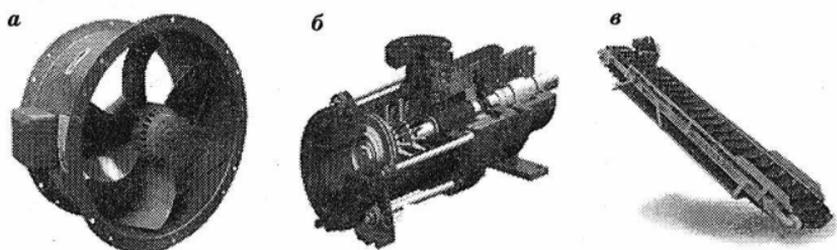


Рис. 1.9

Рабочие машины, применяемые в сельском хозяйстве:

*a* — осевой вентилятор; *b* — центробежный насос; *в* — ленточный скребковый транспортер.

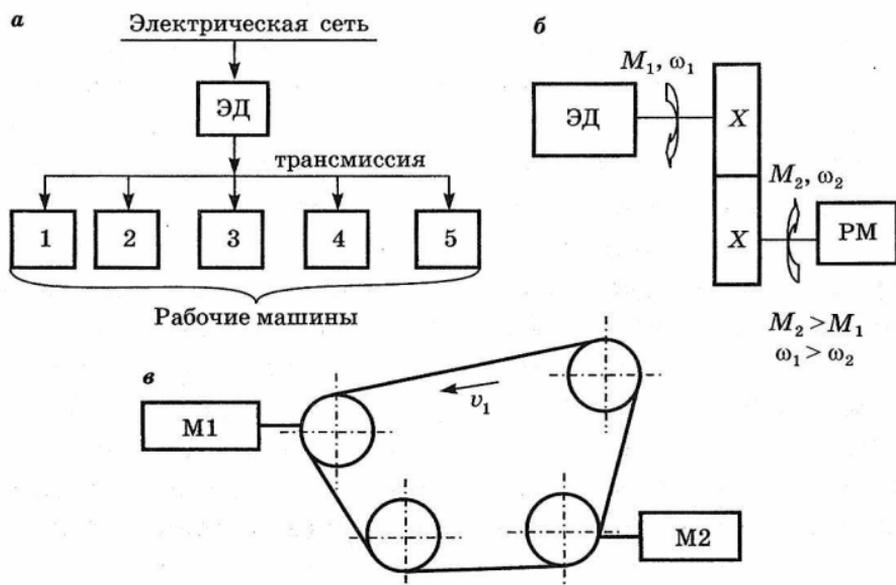


Рис. 1.10  
Схемы электропривода:

*a* — групповой; *b* — индивидуальный; *в* — взаимосвязанный.

На рисунке 1.8 представлены фотографии многоступенчатого редуктора, электромагнитной муфты и зубчато-ременной передачи.

**Рабочей машиной** называется устройство, предназначенное для изменения формы, свойств, состояния и положения предмета труда. Основным элементом РМ считается исполнительный рабочий орган (РО), который предназначен для выполнения полезной работы электропривода в процессе реализации технологической операции.

На рисунке 1.9 изображены примеры рабочих машин, используемых в сельскохозяйственном производстве.

**Классификация электропривода.** В зависимости от способа передачи механической энергии от электродвигателя к рабочей машине различают групповой, индивидуальный, взаимосвязанный и многодвигательный электроприводы (рис. 1.10). При групповом электроприводе несколько машин приводятся в действие от одного электрического двигателя через систему передач. Коэффициент полезного действия подобной механической системы очень низок, а потребляемая мощность электродвигателя сильно завышена. Индивидуальный электропривод имеет свою рабочую машину и сопрягается с ней либо напрямую, либо через передаточный механизм. Взаимосвязанный электропривод представляет собой два или несколько ЭП, при работе поддерживается исходя из технологического процесса — требуемое соотношение скоростей вращения, нагрузок и положения исполнительных органов рабочих машин.

По принципу передачи движения и управления электроприводы подразделяются на непрерывного и дискретного, вращательного и линейного действия, реверсивные и неревверсивные, позиционные, следящие и программно-управляемые.

Различают ЭП и по роду тока и степени автоматизации. Выделяют электропривод постоянного и переменного тока, а также классифицируют на неавтоматизированный, автоматизированный и автоматический привода.

Исходя из системы электроснабжения, ЭП разделяют на сетевой, подключаемый к централизованной системе электроснабжения, и автономный электропривод, потреб-

ляющий энергию от бензо-дизель-генераторов, аккумуляторных батарей и возобновляемых источников энергии.

По характеру изменения параметров разграничение происходит на регулируемый ЭП, характеристики которого могут варьироваться под воздействием управляющего устройства, и нерегулируемый. У последнего обороты вращения ротора, нагрузка, диапазон регулирования, жесткость механических характеристик и электромеханическая постоянная времени способны отклоняться от стандартных значений только под действием возмущающих факторов.

Вследствие возможной связи с передаточным механизмом электрический привод подразделяется на редукторный и безредукторный и электропривод со встроенным в одном корпусе червячным ПМ, благодаря особенностям конструкции называемый мотор-редуктор.

В сельскохозяйственном производстве наиболее широкое распространение получил индивидуальный автоматизированный электропривод с асинхронными электродвигателями, имеющими повышенную степень защиты от влияния внешней среды, мощностью до 200 кВт, с синхронными частотами вращения от 750 до 3000 мин<sup>-1</sup>, приводящий в движение рабочий орган через редуктор, ременную или цепную передачу.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Из каких элементов состоит функциональная схема электропривода?
2. Какие источники электроснабжения используются для питания электрических двигателей?
3. Для каких целей применяется система управления и преобразовательное устройство?
4. Какие серии электродвигателей выпускаются отечественной электротехнической промышленностью?
5. Когда в электроприводах используются передаточные механизмы?
6. Какие разновидности ПМ нашли наиболее широкое распространение в АПК?
7. Каково назначение рабочей машины?
8. Приведите примеры РМ для агропромышленного производства.
9. Как классифицируется электропривод?
10. Какой привод получил наиболее широкое распространение в сельскохозяйственном производстве?

# ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 2.1. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электродвигатели постоянного тока применяют в тех электроприводах, где требуется большой диапазон регулирования скорости, высокая точность поддержания оборотов вращения привода и регулирования угловой частоты вращения вверх и вниз от номинальной.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) состоят из четырех основных частей: статора, обмотки возбуждения (ОВ), якоря с обмоткой и щеточно-коллекторного узла, необходимого для подведения напряжения к якорной обмотке. При этом щетки неподвижны, а коллектор жестко связан с якорем.

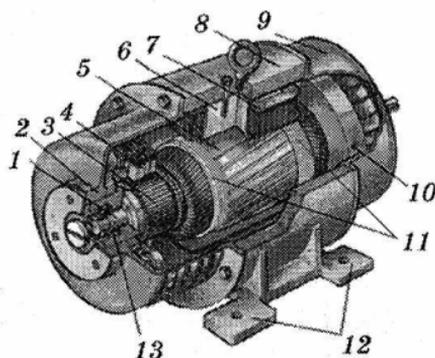
На рисунке 2.1 дано трехмерное изображение конструкции машины постоянного тока.

В ДПТ для улучшения условий коммутации могут быть также предусмотрены и дополнительные полюса, а для компенсации поперечной реакции якоря — компенсационные обмотки на полюсах статора.

**Рис. 2.1**

Разрез конструкции машины постоянного тока:

1 — вал; 2, 9 — подшипниковые щиты; 3 — коллектор; 4 — щеткодержатели; 5 — магнитопровод якоря; 6 — сердечник главных полюсов; 7 — катушка с обмоткой возбуждения; 8 — станина; 10 — вентилятор; 11 — бандаж; 12 — лапы станины; 13 — подшипник.



В зависимости от способа электромагнитного возбуждения, машины постоянного тока подразделяют на двигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения (ДПТ НВ), с параллельной обмоткой возбуждения (ДПТ ПВ), последовательного и смешанного возбуждения.

Наибольшее распространение получили двигатели комбинированного параллельно-последовательного возбуждения и машины постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения.

В сельскохозяйственном производстве двигатели постоянного тока находят применение в металлорежущих станках, вентиляционных установках, в электрокарах, в электротрансмиссиях тракторов и автомобилей большой мощности, в ручном электрифицированном инструменте и т. д.

## 2.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Одним из обязательных условий производительной, надежной и экономичной работы нагрузочной машины является правильный выбор электропривода. Выбранный электропривод должен обеспечивать благоприятную работу исполнительного органа в статическом и динамическом режимах.

Запуск электрической машины, переход с одной скорости на другую, сброс нагрузки и торможение производственного механизма — это процессы, которые определяются характером изменения тока, скоростью вращения и электромагнитного момента.

Связь между угловой частотой вращения двигателя и развиваемым им моментом называется механической характеристикой электродвигателя,  $\omega = f(M)$  или  $n = f(M)$ , а зависимость оборотов вращения от тока определяется как электромеханическая характеристика,  $\omega = f(I)$  или  $n = f(I)$ .

Механические характеристики, построенные по паспортным данным двигателя, называются **естественными**. Характеристики, полученные в результате изменения од-

ного или нескольких номинальных параметров, называются **искусственными**.

Естественные и искусственные механические характеристики различаются по степени изменения скорости вращения электродвигателя в процессе роста момента нагрузки. Данное изменение называется жесткостью механических характеристик.

Под **жесткостью механических характеристик** понимается разность между электромагнитными моментами двигателя, отнесенная к разности угловых скоростей вращения.

Критерием для оценки графических зависимостей обычно служит их крутизна:

$$\beta = \frac{M_1 - M_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}, \quad (2.1)$$

где  $M_1, M_2$  — электромагнитные моменты;  $\omega_1, \omega_2$  — угловые частоты вращения.

На рисунке 2.2 представлены механические характеристики электродвигателей.

Выбор характеристик определяется требованиями производственного механизма и технологического процесса.

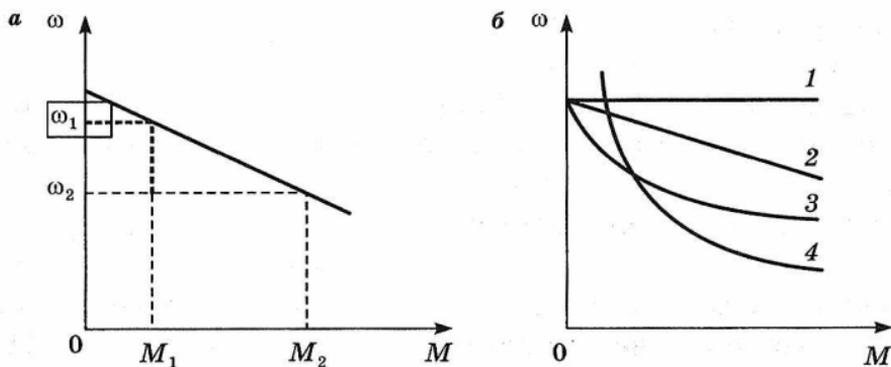


Рис. 2.2

Механические характеристики электродвигателей:

*a* — иллюстрация к определению жесткости; *б* — механические характеристики электродвигателей: 1 — абсолютно жесткая синхронного вентильного двигателя; 2 — жесткая двигателя постоянного тока независимого возбуждения; 3 — мягкая двигателя постоянного тока смешанного возбуждения; 4 — мягкая двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

### 2.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Механической характеристикой машины постоянно-го тока с параллельной или независимой обмоткой возбуждения называется функциональная зависимость между угловой частотой вращения якоря и электромагнитным моментом при постоянстве тока возбуждения и магнитного потока в электродвигателе,  $\omega = f(M)$ .

Электромеханической характеристикой считается взаимосвязь между скоростью вращения электродвигателя и током, протекающим по цепи якоря,  $\omega = f(I_{\text{я}})$ , полученная при постоянном напряжении сети и неизменном сопротивлении обмотки возбуждения.

Механические и электромеханические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением аналогичны характеристикам электродвигателя параллельного возбуждения при постоянстве напряжения питания на обмоточных выводах последнего.

На рисунке 2.3 представлены схемы подключения двигателя постоянного тока с параллельной и независимой обмоткой возбуждения и дополнительными резисторами в электрических цепях.

Математически выражение механической характеристики ДПТ может быть получено из уравнения баланса напряжений:

$$U = E + I_{\text{я}}R_{\text{я}}, \quad (2.2)$$

где  $U$  — напряжение питания;  $E$  — ЭДС якорной обмотки;  $I_{\text{я}}$  — ток в обмотке якоря;  $R_{\text{я}}$  — сопротивление обмотки якоря.

Ток, протекающий в обмотке якоря, вычисляется из уравнения (2.2)

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}. \quad (2.3)$$

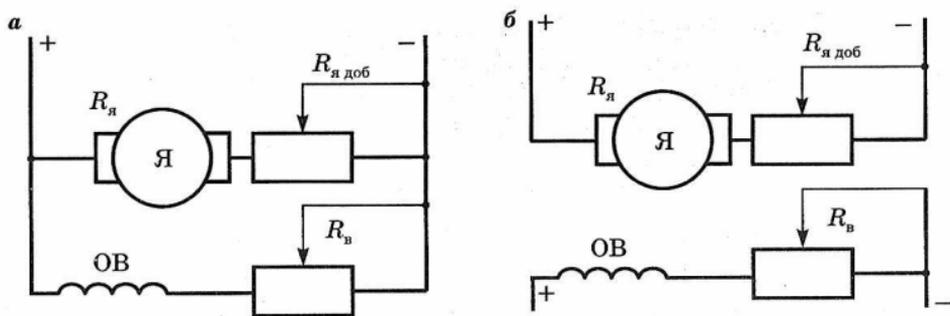


Рис. 2.3

Схемы подключения ДПТ с параллельной (а) и независимой (б) обмоткой возбуждения

Если ЭДС электродвигателя выразить через угловую скорость и магнитный поток, получим

$$E = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{\alpha} \omega \Phi = C_E \omega \Phi, \quad (2.4)$$

где  $p$  — количество пар полюсов двигателя;  $N$  — число активных проводников обмотки якоря;  $\alpha$  — количество параллельных ветвей обмотки якоря;  $\Phi$  — магнитный поток одного полюса;  $\omega$  — угловая частота вращения якоря;  $C_E$  — конструктивная постоянная якорной обмотки.

Ток якоря можно рассчитать через магнитный поток и электромагнитный момент:

$$I_{\text{я}} = \frac{2\pi\alpha}{pN} \frac{M}{\Phi} = \frac{M}{C_M \Phi}, \quad (2.5)$$

где  $M$  — электромагнитный момент;  $C_M$  — конструктивный коэффициент двигателя.

В результате подстановки уравнений (2.4) и (2.5) в (2.2) выводится математическое выражение, связывающее между собой напряжение питания, угловую частоту вращения якоря, электромагнитный момент и магнитный поток:

$$U = C_E \omega \Phi + M \frac{R_{\text{я}}}{C_M \Phi}. \quad (2.6)$$

Выражая из (2.6) угловую частоту вращения, получим уравнение механической характеристики ДПТ НВ:

$$\omega = \frac{U}{C_E \Phi} - M \frac{R_{\text{я}}}{C_E C_M \Phi^2}. \quad (2.7)$$

Из равенств (2.4) и (2.5) видно, что коэффициенты  $C_E$  и  $C_M$ , определяемые конструктивными параметрами машин постоянного тока, практически равны между собой:

$$C_E = 1,03C_M \approx C_k. \quad (2.8)$$

С учетом (2.8) уравнение (2.7) приводится к виду

$$\omega = \frac{U}{C_k \Phi} - M \frac{R_{\text{я}}}{C_k^2 \Phi^2}. \quad (2.9)$$

Сопротивление якоря вычисляется по паспортным данным электродвигателя:

$$R_{\text{я}} = 0,5[1 - \eta_{\text{НОМ}}] \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}}, \quad (2.10)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  — номинальное напряжение сети;  $I_{\text{НОМ}}$  — номинальный ток двигателя;  $\eta_{\text{НОМ}}$  — номинальный КПД электродвигателя.

Для расчета механических характеристик необходимо определить частоту вращения идеального холостого хода, когда ток якоря равен нулю ( $I_{\text{я}} = 0$ ):

$$\omega_0 = \omega_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R_{\text{я}}}, \quad (2.11)$$

где  $\omega_{\text{НОМ}}$  — угловая частота вращения якоря в номинальном режиме работы ДПТ.

Угловая частота вращения ротора в номинальном режиме находится из выражения

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30}, \quad (2.12)$$

где  $n_{\text{НОМ}}$  — обороты вращения якоря в номинальном режиме работы.

Номинальный момент электродвигателя

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}, \quad (2.13)$$

где  $P_{\text{НОМ}}$  — номинальная мощность двигателя.

Для вывода электромеханической характеристики двигателя постоянного тока с параллельной и независимой

обмоткой возбуждения достаточно в уравнение (2.2) подставить выражение (2.4):

$$U = C_k \omega \Phi + I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (2.14)$$

Из формулы (2.14) определяется зависимость между параметрами  $\omega$  и  $I_{\text{я}}$ :

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_k \Phi} = \omega_0 - I_{\text{я}} \frac{R_{\text{я}}}{C_k \Phi}. \quad (2.15)$$

Выражение (2.15) называется уравнением электромеханической характеристики ДПТ НВ.

С учетом угловой частоты вращения при работе электродвигателя в режиме холостого хода уравнение (2.15) переписывается так:

$$\omega = \omega_0 \left[ 1 - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U} \right]. \quad (2.16)$$

В соответствии с (2.7) и (2.15) механическая и электромеханические характеристики ДПТ НВ представляют собой линейную функциональную зависимость, связывающую между собой скорость вращения, электромагнитный момент и электрический ток.

Для построения рассматриваемых характеристик в различных режимах работы электродвигателя достаточно знать координаты двух точек.

Механическая характеристика для номинального режима работы строится по следующим данным:  $M = 0$ ,  $\omega = \omega_0$  — первая точка, откладываемая на оси ординат, и  $M = M_{\text{ном}}$ ,  $\omega = \omega_{\text{ном}}$  — координаты второй точки, необходимой для построения линейной функции.

Электромеханическая прямая рассчитывается исходя из двух режимов работы электродвигателя — идеального холостого хода и короткого замыкания. Уравнение описывает прямую линию, пересекающую оси декартовой системы координат в точках: 1 — с координатами  $M = 0$ ,  $\omega = \omega_0$ , 2 — со значениями  $\omega = 0$ ,  $I_{\text{я}} = I_{\text{пуск}}$ .

На рисунке 2.4 представлены механическая и электромеханическая характеристики ДПТ НВ для двух режимов работы.

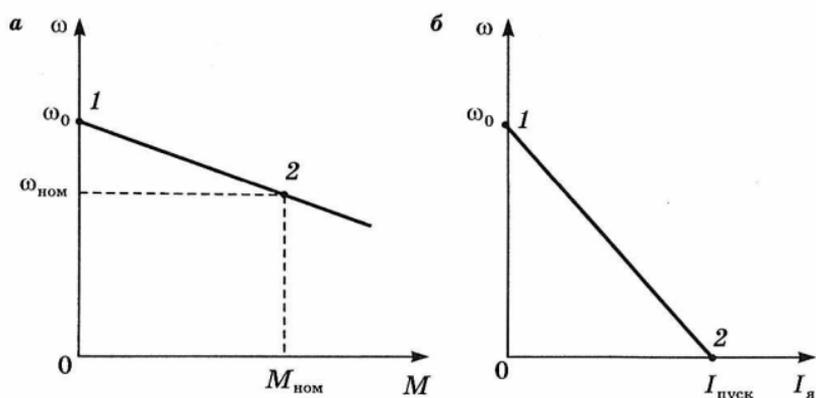


Рис. 2.4

Механическая (а) и электромеханическая (б) характеристики ДПТ НВ

Угловую скорость вращения двигателя постоянного тока рекомендуется регулировать следующими способами:

- ослаблением магнитного потока или увеличением напряжения на якоре для изменения оборотов вращения выше номинальных значений;
- введением в электрическую цепь якоря дополнительных сопротивлений с целью снижения скорости вращения;
- комбинированным подключением переменных сопротивлений — последовательно и параллельно якорной обмотке для получения жестких механических характеристик.

У машины постоянного тока мощностью до 0,5 кВт сопротивление якоря в относительных единицах варьирует  $R_{я} = 0,12-0,17$ , поэтому пусковой ток при номинальном напряжении сети в 6–8 раз превышает номинальный и электродвигатель запускается напрямую от сети.

Более мощные машины постоянного тока имеют диапазон относительных активных сопротивлений в пределах  $R_{я} = 0,1-0,02$ .

Пусковой ток якоря может превышать номинальный в 10–50 раз, поэтому запуск без наличия дополнительных сопротивлений недопустим. Ограничение пускового тока в момент запуска ДПТ связано со значительным снижением напряжения сети, появлением большого кратков-

ременного электромагнитного момента и, как следствие, опасного для механических соединений динамического удара, а также с высоким насыщением в добавочных полюсах, что ухудшает коммутацию и ведет к подгоранию коллекторных пластин и износу щеток.

## 2.4. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБОРОТОВ ВРАЩЕНИЯ ДПТ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ И НЕЗАВИСИМОЙ ОБМОТКОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Из анализа уравнения (2.9) вытекает, что обороты вращения электродвигателя постоянного тока с независимой или параллельной обмоткой возбуждения можно регулировать тремя способами: изменением сопротивления цепи якоря  $R_{я}$ , координированием магнитного потока полюсов  $\Phi$ , варьированием напряжения на зажимах якорной обмотки  $U$ .

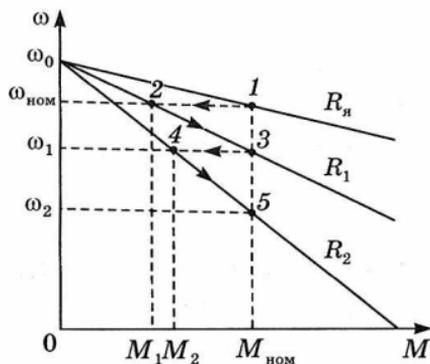
Регулирование угловой частоты вращения ДПТ изменением сопротивления цепи якоря достигается за счет введения добавочного переменного резистора (рис. 2.5).

Механическая характеристика рассчитывается по формуле

$$\omega = \omega_0 \left[ 1 - \frac{M(R_{я} + R_{я\text{доб}})}{C_k U} \right], \quad (2.17)$$

где  $R_{я}$  — добавочное сопротивление якоря.

Сопротивление добавочного резистора  $R_{я\text{доб}} = var$  рекомендуется изменять ступенчато или плавно в зависимости от требований технологического процесса и особенностей работы нагрузочного механизма, а сопротивление регулирующего резистора в цепи ОБ следует поддерживать постоянным,  $R_{в} = const$ .



**Рис. 2.5**  
Регулирование угловой частоты вращения изменением сопротивления в цепи якоря:  
 $R_2 > R_1 > R_{я}$

На рисунке 2.5 представлены механические характеристики ДПТ НВ.

Механическая характеристика, построенная по номинальным данным, называется естественной механической характеристикой. На рисунке 2.5 она обозначена как  $R_{я}$ . Прямые  $R_1$  и  $R_2$  построены с учетом ввода добавочного резистора и называются искусственными механическими характеристиками. С ростом добавочного сопротивления в цепи якоря наклон характеристик увеличивается, а диапазон регулирования составляет 3–4 от  $\omega_{ном}$  в сторону понижения.

Анализ электромеханического процесса изменения скорости электропривода, работающего в точке 1 на естественной механической характеристике, с параметрами:  $R_d = 0$ ,  $\omega = \omega_{ном}$ ,  $M_{ном} = M_c$  выглядит следующим образом.

Если в цепь якоря вводится дополнительный резистор, то работа электропривода переходит из точки 1 в точку 2. Точка 1 обозначена на естественной механической характеристике  $R_{я}$ , а точка 2 изображена на искусственной прямой  $R_1$ . Переход выполняется без изменения оборотов вращения якоря за счет наличия большого момента инерции электропривода, но с меньшим электромагнитным моментом  $M_1$ . Снижение электромагнитного момента объясняется уменьшением тока якоря после введения в электрическую цепь дополнительного резистора. Поскольку  $M_1 < M_c$ , вращение всех подвижных частей электропривода замедляется, уменьшается ЭДС, а ток якоря и момент начинают возрастать (отрезок [2, 3]). Когда в точке 3 вращающий момент по величине сравнивается с моментом сопротивления, угловая скорость вращения двигателя снижается до  $\omega_1$  ( $\omega_1 < \omega_{ном}$ ). При  $M_c = \text{const}$  ток якоря достигает прежнего значения, а потребляемая мощность не изменяется.

Дальнейшее увеличение сопротивления добавочного резистора приводит к тому, что работа машины постоянного тока аналогично рассмотренному процессу по искусственным механическим характеристикам  $R_1$  и  $R_2$  переходит из точки 3 в точку 4, а затем в точку 5, в которой обороты вращения якоря спадают до  $\omega_2$  ( $\omega_2 < \omega_1 < \omega_{ном}$ ). В процессе

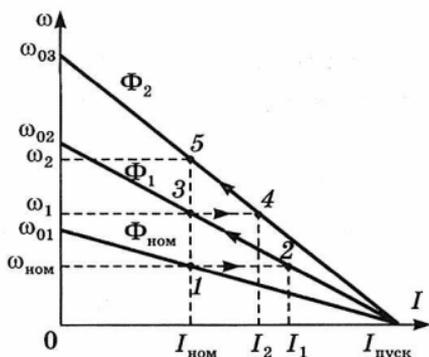
переходного периода механическая мощность  $P_{\text{мех}}$  и КПД электродвигателя резко уменьшаются.

К недостаткам данного способа регулирования относятся большие потери мощности в добавочном резисторе, а также возможное снижение механической мощности электродвигателя до 50%, когда обороты якоря достигают половины  $\omega_0$ .

**Изменение оборотов вращения якоря вследствие регулирования магнитного потока полюсов.** Данный способ основывается на вводе добавочного резистора  $R_{\text{в}}$  в обмотку возбуждения (рис. 2.3) или подключении к концевым зажимам регулируемого источника напряжения. Процесс повышения или понижения оборотов вращения происходит в следующем порядке. Предполагается, что сопротивление добавочного резистора  $R_{\text{я доб}}$  остается величиной неизменной, а сопротивление  $R_{\text{в}}$  в цепи обмотки возбуждения варьируется. В результате ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  и магнитный поток  $\Phi$  изменяются по заданному закону.

Увеличение сопротивления в цепи ОВ приводит к снижению тока возбуждения и магнитного потока. Уменьшение магнитного потока  $\Phi$  дает возможность повысить скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ , сохранив неизменным пусковой ток  $I_{\text{пуск}}$  (ток короткого замыкания) электродвигателя. На рисунке 2.6 даны естественная и искусственные электромеханические характеристики ДПТ НВ.

Переходный процесс в результате ввода в ОВ дополнительного сопротивления протекает следующим образом. Из точки 1, обозначенной на естественной электромеханической характеристике  $\Phi_{\text{ном}}$  ДПТ независимого возбуждения, из-за резкого скачка тока якоря  $I_1$ , вызванного ослаблением магнитного потока обмотки, возбуждение переходит в точку 2, изображенную на искусственной характери-



**Рис. 2.6**  
Электромеханические характеристики, построенные в результате изменения магнитного потока

стике  $\Phi_1$ . Переход, протекающий при неизменной номинальной угловой скорости вращения, сопровождается снижением ЭДС и увеличением электромагнитного момента ( $M_1 > M_c$ ), который становится намного больше момента сопротивления. В результате ослабления магнитного потока основных полюсов электродвигателя и постепенного нарастания ЭДС ток обмотки якоря начинает уменьшаться (отрезок [2, 3]), а обороты — расти. В точке 3 угловая скорость вращения привода достигает установившегося значения  $\omega_1$  ( $\omega_1 > \omega_{\text{ном}}$ ), а электромагнитный момент и ток якоря становятся равными номинальному току и первоначальному моменту сопротивления ( $M_{\text{ном}} = M_c$ ). Работа электропривода продолжается в новом режиме, который характеризуется номинальными значениями тока якоря и электромагнитного момента и более высокими оборотами вращения. Дальнейшее увеличение сопротивления в обмотке возбуждения вызывает снижение магнитного потока полюсов  $\Phi_2$  и очередной скачок тока  $I_2$  в обмотке якоря. Переходный процесс протекает аналогично рассмотренному на искусственных механических характеристиках  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  по цепочке: точки 3 → 4 и 4 → 5. В конце переходного периода угловая скорость достигает значения  $\omega_2$  ( $\omega_2 > \omega_1 > \omega_{\text{ном}}$ ). Анализ изучаемых характеристик показывает: снижение тормозного момента электродвигателя за счет понижения магнитного потока  $\Phi_2 < \Phi_1 < \Phi_{\text{ном}}$  в цепи обмотки возбуждения приводит к росту угловой частоты вращения в режиме холостого хода:  $\omega_{03} > \omega_{02} > \omega_{01}$ .

Пусковой электромагнитный момент рассчитывается по формуле

$$M_{\text{пуск}} = C_k \Phi I_{\text{пуск}}, \quad (2.18)$$

где  $I_{\text{пуск}}$  — пусковой ток ДПТ.

Из выражения (2.18) следует, что если величина пускового тока неизменна ( $I_{\text{пуск}} = \text{const}$ ), то в результате ослабления магнитного потока ( $\Phi \rightarrow 0$ ) уменьшается и пусковой момент электродвигателя ( $M_{\text{пуск}} \rightarrow 0$ ).

Механические характеристики машины постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения показаны на рисунке 2.7.

Рассматриваемый способ регулирования является экономичным, так как потери мощности в якоре минимальны и постоянны:  $\Delta P_{\text{я}} \approx \text{const}$ . Диапазон изменения направлен в сторону повышения скорости вращения якоря и может достигать 2–3 значений выше  $\omega_{\text{ном}}$ . Пусковой момент уменьшается пропорционально магнитному потоку.

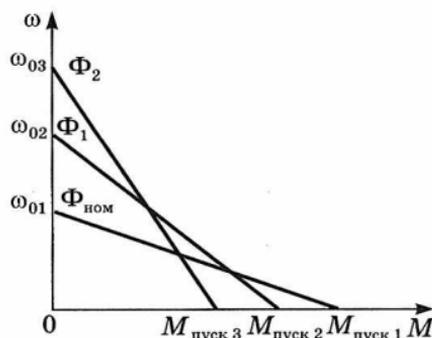


Рис. 2.7  
Механические характеристики ДПТ НВ

Ток короткого замыкания ограничивается условиями коммутации на якоре и не должен превышать  $(2-4) I_{\text{ном}}$ . Регулирование скорости изменением магнитного потока происходит при постоянной мощности ДПТ или по условию нагрева допускается при токах, не превышающих номинальное значение.

**Регулирование оборотов вращения якоря с помощью напряжения питания якорной обмотки.** Реализация способа предусматривает подключение обмотки якоря к преобразователю напряжения, выходные параметры которого могут меняться как плавно, так и ступенчато.

В двигателе параллельного возбуждения частота вращения холостого хода изменяется пропорционально изменению напряжения. Регулирование оборотов вращения идет вниз от номинального значения.

Наиболее распространенным техническим устройством для этих целей служит управляющий выпрямитель (УВ).

Соотношение между угловыми частотами вращения и напряжением, подаваемым на обмотку якоря, вытекает из равенства

$$\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} = \frac{U_1}{U_{\text{ном}}}, \quad (2.19)$$

где  $U_{\text{ном}}$  и  $U_1$  — напряжения, подаваемые на обмотку якоря,  $U_{\text{ном}} > U_1$ ;  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$  — угловые частоты вращения в режиме холостого хода,  $\omega_{01} > \omega_{02}$ .

Из выражения (2.19) определяется скорость вращения  $\omega_{02}$ :

$$\omega_{02} = \frac{\omega_{01} U_1}{U_{\text{ном}}} \quad (2.20)$$

На рисунке 2.8 представлены схема управления и механические характеристики ДПТ НВ при регулировании напряжения на зажимах якоря.

Работу электропривода в переходном процессе возможно описать, исходя из графиков на рисунке 2.8б.

В первоначальный момент времени двигатель работает в номинальном режиме на естественной механической характеристике  $U_{\text{ном}}$  в точке 1 ( $M_c = M_{\text{ном}}$ ). С уменьшением напряжения на выводах обмотки уменьшается ток в цепи якоря и, следовательно, электромагнитный момент ДПТ. Момент сопротивления мгновенно становится намного больше электромагнитного момента двигателя ( $M_c > M_1$ ). Переход из точки 1, обозначенной на естественной механической характеристике, в точку 2, изображенную на искусственной  $U_1$ , вызывает появление тормозящего динамического момента  $M_d = M_1 - M_c < 0$ . В результате ток якоря и электромагнитный момент двигателя возрастают, а обороты вращения непрерывно уменьшаются (отрезок [2, 3]). Процесс торможения постепенно затухает, а угловая скорость спадает до  $\omega_1$  ( $\omega_1 < \omega_{\text{ном}}$ ). По истечении переходного периода в точке 3 устанавливается равенство между моментами,  $M_{\text{ном}} = M_c$ .

Последующее снижение напряжения заставляет электродвигатель работать на искусственных механических характеристиках  $U_1$ ,  $U_2$  и перейти вначале в точку 4, а за-

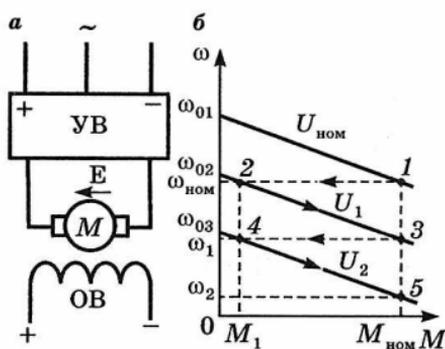


Рис. 2.8

Схема управления ДПТ НВ (а), механические характеристики (б), полученные в результате изменения напряжения,  $U_{\text{ном}} > U_1 > U_2$

тем в точку 5. В новом установившемся состоянии электропривода угловая скорость вращения якоря снижается до значения  $\omega_2$  ( $\omega_{\text{ном}} > \omega_1 > \omega_2$ ), а электродвигатель переходит в очередной режим работы.

Рассмотренный способ регулирования требует довольно сложного и дорогостоящего оборудования, несмотря на это, его широко применяют в современных электроприводах, поскольку он обеспечивает плавное и экономичное регулирование скорости в широких пределах. Диапазон изменения скорости вращения якоря составляет (8–10)  $\omega_{\text{ном}}$  вниз от номинальной, при этом жесткость механических характеристик  $\beta$  и потери мощности в якоре  $\Delta P_{\text{я}}$  постоянны.

**Анализируя режимы работы двигателя постоянного тока с параллельной и независимой обмоткой возбуждения, можно отметить основные свойства, которыми обладает электропривод, в состав которого входит исследуемая машина.**

При помощи переменных резисторов, включенных в цепь якоря, легко ограничивать пусковой ток и момент короткого замыкания, и тем самым снижать вероятность появления динамических ударов в механической части электропривода; в широком диапазоне уменьшать обороты вращения якоря и, как следствие, производительность электропривода при наличии момента сопротивления на валу электродвигателя, например, в виде насоса, вентилятора, металлорежущих станков, загрузочных устройств агрегатов витаминной муки и т. д.

Регулируя в обмотке возбуждения величину магнитного потока в сторону его снижения, можно повышать скорость вращения рабочего органа механического устройства и тем самым эффективность его работы.

Используя управляемый преобразователь напряжения можно понижать потери мощности, возникающие в процессе регулирования скорости вращения, а также получить стабилизацию оборотов на каждой линейной зависимости, поскольку получаемое семейство искусственных механических характеристик обладает постоянной величиной жесткости.

## 2.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Машины данного типа отличаются от ДПТ НВ тем, что обмотка возбуждения подключается последовательно якорной, а магнитный поток является функцией тока, протекающего в последовательном соединении элементов электрической цепи. Особенность работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения заключается в том, что при изменении нагрузки на выходном валу обороты вращения изменяются не только в результате роста или уменьшения магнитного потока, но и за счет падения напряжения в цепи якоря. С ростом нагрузки и тока якоря магнитный поток возрастает, а угловая скорость вращения падает. В результате механические и электро-механические характеристики ДПТ ПВ имеют значительную крутизну и по форме напоминают гиперболу.

Способность двигателей последовательного возбуждения развивать большой электромагнитный момент, пропорциональный квадрату тока якоря ( $M = \alpha C_R I^2$ ), обеспечивает хорошие пусковые свойства. Пусковой момент достигает максимальных значений при сравнительно малом токе якоря.

Электродвигатель применяется для привода вентиляторов, электрического транспорта и подъемных устройств. Наличие мягкой механической характеристики у двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приводит к автоматическому снижению оборотов в момент увеличения нагрузки на валу, например, подъем в гору и увеличение скорости при снижении сопротивления, когда движение происходит по равнине.

Во всех режимах работы ДПТ ПВ механические и электро-механические характеристики получаются мягкими. Если  $M = 0$ , то угловая скорость теоретически возрастает до бесконечности,  $\omega \rightarrow \infty$ . Во избежание разрушения конструкции под действием центробежных сил электродвигатель нельзя эксплуатировать в режиме холостого хода и

с нагрузкой менее 25% от номинальной. На рисунке 2.9 представлена схема подключения машины постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения.

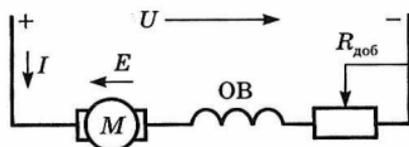


Рис. 2.9  
Схема подключения двигателя постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения

Механической характеристикой двигателя последовательного возбуждения называют зависимость угловой частоты вращения от электромагнитного момента.

Под электромеханической характеристикой понимается функциональная связь между оборотами вращения якоря и током, протекающим по обмоткам последовательной электрической цепи.

Механическая и электромеханическая характеристики ненасыщенного ДПТ с последовательным возбуждением имеют гиперболический характер.

Электромагнитный момент двигателя прямо пропорционален току и магнитному потоку и находится так:

$$M = C_k I \Phi. \quad (2.21)$$

Из выражения (2.21) определяется ток последовательной цепи, состоящей из якорной обмотки и обмотки возбуждения:

$$I = \frac{M}{C_k \Phi}. \quad (2.22)$$

Подставляя (2.22) в (2.15), одновременно заменяя в нем ток якоря  $I_{я}$  на  $I$ , а  $R_{я}$  на  $R$ , получим формулу для расчета механической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{C_k \Phi} - \frac{MR}{C_k^2 \Phi^2}, \quad (2.23)$$

где  $R$  — суммарное активное сопротивление цепи,  $R = R_{я} + R_{в}$ ;  $R_{в}$  — активное сопротивление обмотки возбуждения.

Для вывода уравнения электромеханической характеристики в выражение (2.23) подставляется (2.21):

$$\omega = \frac{U}{C_k \Phi} - I \frac{R}{C_k \Phi}. \quad (2.24)$$

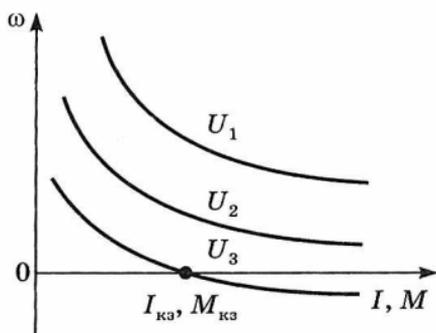


Рис. 2.10

Механические и электромеханические характеристики ДПТ ПВ:  $U_1$  — естественная;  $U_2, U_3$  — искусственные характеристики,  $U_1 > U_2 > U_3$ .

Выражение (2.22) связывает между собой скорость вращения ДПТ ПВ с током и называется уравнением электромеханической характеристики.

Для получения искусственных механических и электромеханических характеристик в формулы (2.23) и (2.24) добавляются переменные сопротивления, тогда

$$\omega = \frac{U}{C_k \Phi} - M \frac{(R + R_{\text{доб}})}{C_k^2 \Phi^2};$$

$$\omega = \frac{U}{C_k \Phi} - I \frac{(R + R_{\text{доб}})}{C_k \Phi}. \quad (2.25)$$

На основании системы уравнений (2.25) строится семейство характеристик (рис. 2.10).

С ростом нагрузки на валу электродвигателя, работающего по основной схеме включения, резко возрастают ток и электромагнитный поток, вызывающие появление тормозного момента и снижение оборотов вращения, поэтому машины постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения применяются в электроприводах с частыми и тяжелыми пусками, у которых не предусматривается периодического сброса нагрузки.

Для двигателя постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения существуют два периода работы: двигательный и противовключения (рис. 2.10, первый и четвертый квадранты декартовой системы координат), и не существуют режимы холостого хода и генераторного торможения.

## 2.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Регулирование скорости ДПТ ПВ может осуществляться: введением в электрическую цепь дополнительного сопротивления, изменением магнитного потока и подводимого напряжения, шунтированием обмотки якоря и применением импульсных источников питания.

**Снижение скорости вращения с помощью переменного резистора в цепи обмотки якоря.** Реализация предлагаемого способа основывается на введении в последовательно соединенную электрическую цепь, состоящую из двух обмоток, переменного резистора (см. рис. 2.9). Передвижение подвижного контакта резистора в сторону максимума приводит к повышению суммарного активного сопротивления  $R$  цепи, снижению тока  $I$  и магнитного потока ( $\Phi = C_1 I$ ) и, как следствие, к увеличению скорости вращения якоря. В результате добавочного падения напряжения на пусковом резисторе искусственные механические и электромеханические характеристики располагаются ниже кривой, построенной по паспортным данным электродвигателя (рис. 2.10).

Данный способ регулирования отличается простотой реализации и не требует дорогостоящих автоматических систем управления. Диапазон снижения угловой частоты вращения изменяется в пределах  $(2-3) \omega_{ном}$ . По мере роста  $R_{доб}$  работа двигателя может перейти в режим короткого замыкания, что соответствует нулевой угловой частоте вращения.

Недостатками способа управления считаются дополнительные потери мощности на добавочном сопротивлении, низкая точность установления требуемых оборотов вращения и кратковременный режим работы на пониженных скоростях.

**Изменение оборотов вращения якоря ДПТ ПВ магнитным потоком.** На рисунке 2.11 дана схема подключения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с шунтирующим ОВ переменным резистором. Последовательно-параллельное соединение электрической цепи

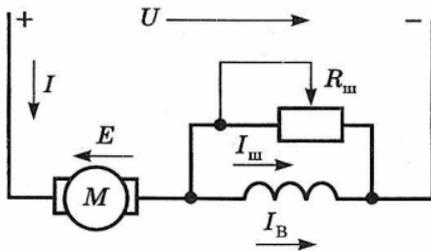


Рис. 2.11

Схема подключения ДПТ ПВ с шунтирующим обмотку возбуждения резистором

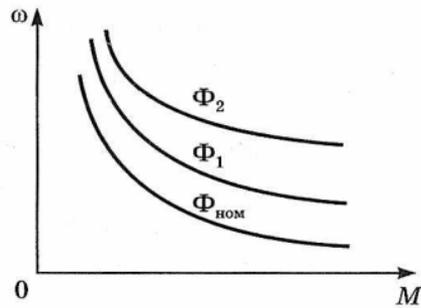


Рис. 2.12

Естественная и искусственные механические характеристики ДПТ ПВ с шунтированием обмотки возбуждения,  $\Phi_{ном} > \Phi_2 > \Phi_1$

приводит к тому, что часть тока якоря протекает по шунтирующему резистору  $R_{ш}$ , в результате ток обмотки возбуждения  $I_{в}$  и магнитный поток  $\Phi$  уменьшаются, а скорость вращения двигателя увеличивается.

Регулирование угловой частоты вращения осуществляется в сторону увеличения от  $\omega_{ном}$ , поэтому искусственные механические характеристики располагаются выше естественной (рис. 2.12).

Ослабление магнитного потока происходит при постоянном значении напряжения питания электродвигателя. Если ползунок переменного резистора выведен на максимум, то электродвигатель оказывается включенным по своей основной схеме и работает на номинальной скорости вращения. При установлении шунтирующего сопротивления на минимум ДПТ ПВ достигает максимальной скорости вращения якоря.

Ток в обмотке возбуждения рассчитывается из уравнения

$$I_{в} = I \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_{в}}. \quad (2.26)$$

**Регулирование оборотов вращения якоря с помощью изменения напряжения питания.** Электродвигатель подключается к управляемой схеме, например, тиристорному выпрямителю, у которого выходное напряжение регулируется в зависимости от величины сигнала  $U_y$ , подавае-

мого на управляющий электрод. Если к обмоткам подводится номинальное напряжение, то двигатель работает на естественной механической характеристике. Уменьшение напряжения переводит работу ДПТ ПВ на искусственные механические характеристики. Кривые на графике проходят ниже естественной характеристики, при этом скорость вращения якоря замедляется,  $\omega \rightarrow 0$ .

На рисунке 2.13 представлена схема подключения машины постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения к управляемому выпрямителю.

Механические характеристики, получаемые при регулировании напряжением питания, аналогичны характеристикам, представленным на рисунке 2.10.

Недостаток системы, состоящей из управляемого выпрямителя и электродвигателя последовательного возбуждения, — низкий коэффициент мощности при пониженном выходном напряжении, а также наличие пульсаций напряжения, вызывающие появление бросков тока, которые ухудшают коммутацию и увеличивают потери мощности в двигателе.

**Понижение скорости вращения электродвигателя в результате шунтирования обмотки якоря.** Способ применяется для снижения оборотов вращения ДПТ ПВ.

На рисунке 2.14 изображена схема подключения электродвигателя с шунтирующей обмотку якоря переменным резистором.

Наличие сопротивления, шунтирующего обмотку якоря  $R_{ш}$ , позволяет при токе якоря равным нулю ( $I_{я} = 0$ ) перевести работу электродвигателя в режим идеального холостого хода ( $\omega = \omega_0$ ).

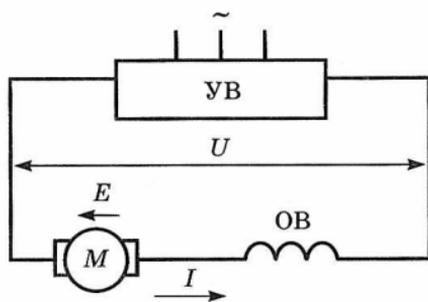


Рис. 2.13

Схема подключения ДПТ ПВ к управляемому выпрямителю

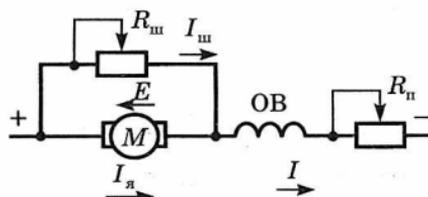


Рис. 2.14

Схема подключения ДПТ ПВ с шунтирующей обмотку якоря резистором

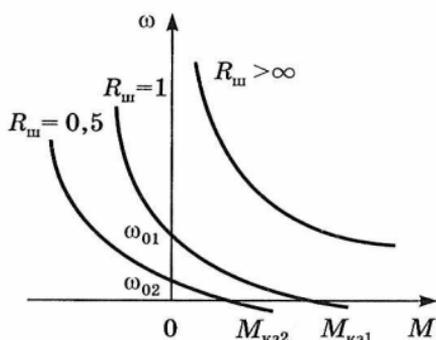


Рис. 2.15

Механические характеристики ДПТ ПВ с шунтирующим якорь резистором

Увеличение магнитного потока  $\Phi$  за счет роста тока в  $R_{ш}$  приводит к дополнительным потерям напряжения в пусковом резисторе  $R_{п}$  и значительному снижению скорости вращения электродвигателя.

Уменьшение величины шунтирующего сопротивления практически до нуля переводит работу двигателя постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения в генераторный режим (рис. 2.15). Когда ЭДС якоря становится равной падению напряжения на шунтирующем сопротивлении ( $R_{ш} = 1$ ), электродвигатель переходит в режим работы идеального холостого хода,  $\omega_{01}$ . Дальнейшее уменьшение шунтирующего сопротивления сдвигает искусственную механическую характеристику влево от оси ординат ( $R_{ш} = 0,5$ ). Сдвиг происходит за счет увеличения тока и, как следствие, магнитного потока в  $R_{ш}$ . В результате появления тормозного момента работа электродвигателя переходит на пониженные обороты вращения.

Перевод электродвигателя на искусственные механические характеристики в двигательном режиме работы снижает пусковой момент (момент короткого замыкания) и уменьшает крутизну кривых, поэтому торможение противовключением неприменимо, так как возникает большой тормозной момент.

Увеличение последовательного сопротивления  $R_{п}$  ведет к уменьшению напряжения, приложенного к двигателю, и снижению скорости вращения.

## 2.7. ПРИВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Электродвигатель постоянного тока комбинированного исполнения конструктивно состоит из якоря и двух обмоток возбуждения, одна из которых подключена после-

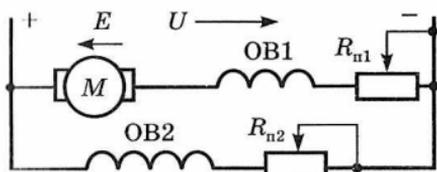


Рис. 2.16

Схема подключения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

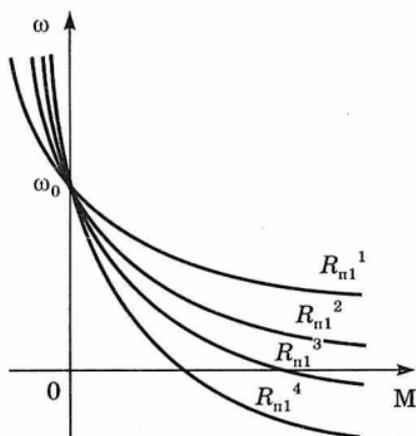


Рис. 2.17

Механические характеристики ДПТ СВ,  
 $R_{n1}^4 > R_{n1}^3 > R_{n1}^2 > R_{n1}^1$

довательно, а другая параллельно. На рисунке 2.16 дана схема подключения рассматриваемой машины.

Наличие двух обмоток возбуждения ОВ1 и ОВ2 приводит к тому, что механические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения (ДПТ СВ) занимают промежуточное положение между характеристиками электродвигателей параллельного и последовательного возбуждения. Электропривод на основе ДПТ СВ может работать в двигательном и генераторном режимах, а также в режиме противовключения.

Рост тока в последовательной обмотке возбуждения ОВ1 увеличивает магнитный поток двигателя и пусковой момент и снижает обороты вращения, когда электропривод работает под нагрузкой.

Электродвигатели данного типа имеют насыщенную магнитную систему, поэтому нет строгих математических выражений, которые бы достаточно точно аналитически описывали механические и электромеханические характеристики. Поэтому приводные характеристики строятся на основе двух зависимостей —  $n = f(I_{я})$  и  $M = f(I_{я})$ .

На рисунке 2.17 изображены механические характеристики ДПТ СВ. Крутизна механических характеристик зависит от электрических параметров последовательной обмотки возбуждения.

При увеличении сопротивления пускового резистора в цепи обмотки якоря скорость вращения двигателя понижается, а характеристики становятся более мягкими. Установка подвижного контакта сопротивления  $R_{п1}$  на максимальное значение переводит работу ДПТ СВ из двигательного режима в тормозной.

Наличие магнитного потока, создаваемого шунтирующей обмоткой возбуждения ОВ2, позволяет электродвигателю не только потреблять электрическую мощность из сети, но и отдавать ее обратно в сеть. Якорь, преодолевая обороты вращения, соответствующие идеальному холостому ходу, заставляет ДПТ перейти из двигательного режима в режим генераторного торможения. При работе в генераторном режиме направление тока в электрической цепи якоря меняется на противоположное. В результате действующая МДС последовательной обмотки возбуждения ОВ1 оказывает размагничивающее действие, приводящее к медленному нарастанию электромагнитного момента, поэтому искусственные механические характеристики в тормозном режиме круто поднимаются вверх. Для устранения размагничивающего действия в процессе отдачи электроэнергии в сеть у ДПТ СВ отключают последовательную обмотку возбуждения, превращая машину в генератор постоянного тока параллельного возбуждения.

С целью согласованного действия обмоток возбуждения реверсирование двигателя смешанного возбуждения выполняется изменением направления тока якоря.

Регулирование координат электропривода на основе ДПТ СВ осуществляется изменением напряжения питания, магнитного потока и сопротивления добавочного резистора в цепи якоря. Двигатель обеспечивает работу во всех тормозных режимах: генераторном, противовключения и динамического торможения.

При динамическом торможении с сохранением направления вращения последовательная обмотка размагничивает машину и снижает тормозной эффект, а во время изменения направления движения наблюдается дополнительное намагничивание магнитопровода и увеличение тормозного момента.

## 2.8. ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электропривод постоянного тока используется не только для приведения во вращение исполнительных органов рабочих машин и регулирования их производительности, но и для создания тормозных режимов работы. В промышленности и сельскохозяйственном производстве имеется много технологических процессов, когда необходимо быстро остановить механизм или, например, уменьшить его обороты вращения.

Для реализации процесса торможения применяют либо механические тормозные устройства, либо искусственно переводят машину постоянного тока в специальный режим работы. Применение механических тормозов на сегодняшний день считается малоэффективным из-за быстрого их износа, нестабильности характеристик и малого быстродействия, поэтому наибольшее распространение получили более эффективные методы снижения скорости, получаемые в результате перевода электрического двигателя в тормозные режимы работы.

Различают три вида торможения двигателя постоянного тока: остановка вращающихся элементов рабочей машины с отдачей электрической энергии в сеть — **генераторное торможение**; снижение оборотов вращения в результате гашения выработанной электрической энергии на реостате, подключаемом к обмотке якоря, — **динамическое торможение**; уменьшение скорости электродвигателя за счет изменения направления электромагнитного момента — **торможение противовключением**.

В тормозных режимах электромагнитный момент воздействует на вращающуюся часть машины постоянного тока в направлении, противоположном тенденции вращения якоря, и является тормозным.

**Генераторное торможение.** Переход электродвигателя постоянного тока с параллельной или независимой обмоткой возбуждения в генераторный режим возможен тогда, когда скорость вращения исполнительного механизма, соединенного с валом якоря, превышает угловую

частоту вращения идеального холостого хода. Ситуация может возникнуть в двигательном режиме, когда в процессе выполнения технологической операции происходит совпадение направлений действия вращающего момента рабочей машины и электромагнитного момента двигателя. Под действием двух моментов система «электродвигатель — рабочая машина» начнет ускоряться, при этом ЭДС двигателя будет расти, а ток падать. В момент наступления равновесия между ЭДС двигателя и напряжением питания потребление тока из сети прекращается. Электропривод работает в режиме идеального холостого хода,  $\omega_0$ . Дальнейшее увеличение скорости приводит к тому, что ЭДС становится больше подводимого напряжения и двигатель вместо потребления мощности от источника питания начинает генерировать электрическую энергию в сеть, создавая при этом определенное торможение всех вращающихся частей (рис. 2.18а). Переход на короткое время в рекуперативный режим возможен, если при резком снижении напряжения питания  $U_1 > U_2$  использовать запас кинетической энергии (рис. 2.18б).

Реализация данного способа торможения возможна и при опускании тяжелого груза со скоростью, превышающей  $\omega_0$ . В процессе снижения груза электродвигатель включается в направлении спуска, и система ускоряется под влиянием суммы действующих моментов: электромагнитного момента и момента, создаваемого нагрузкой.

Двигатель разгоняется до тех пор, пока не произойдет уравнивание двух моментов  $M_c = M_{дв}$ , после этого спуск происходит с постоянной скоростью и электропривод начинает работать в установившемся режиме. На рисунке 2.19 представлены механические характеристики ДПТ НВ, работающего в генераторном режиме.

Электродвигатель включается в работу и на отрезке [1, 2] набирает обороты вращения за счет увеличения ЭДС и снижения тока в обмотке якоря. На участке [2, 3] момент сопротивления становится намного больше электромагнитного момента, что приводит к нарастанию тока, снижению ЭДС и возникновению тормозного момента. На интервале [3, 4] происходит набор скорости, и машина

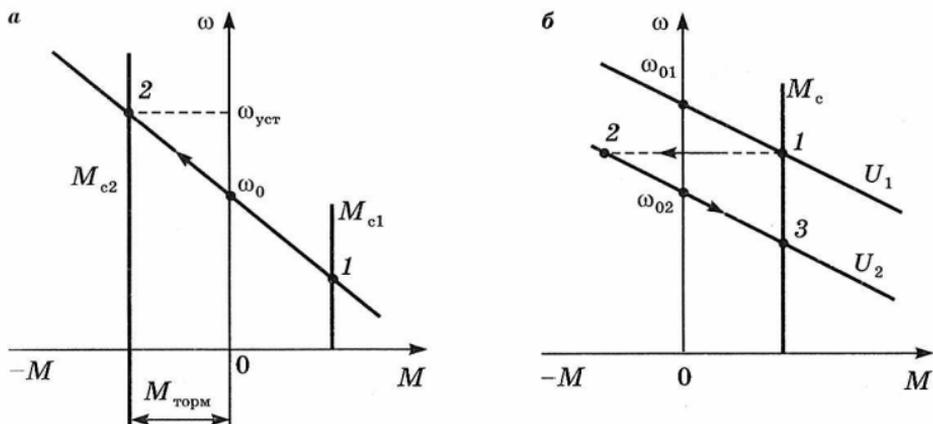


Рис. 2.18

Механические характеристики ДПТ НВ в генераторном режиме:

*a* — переход в рекуперативный режим за счет ускорения исполнительного механизма; *b* — отдача энергии в сеть в результате снижения напряжения.

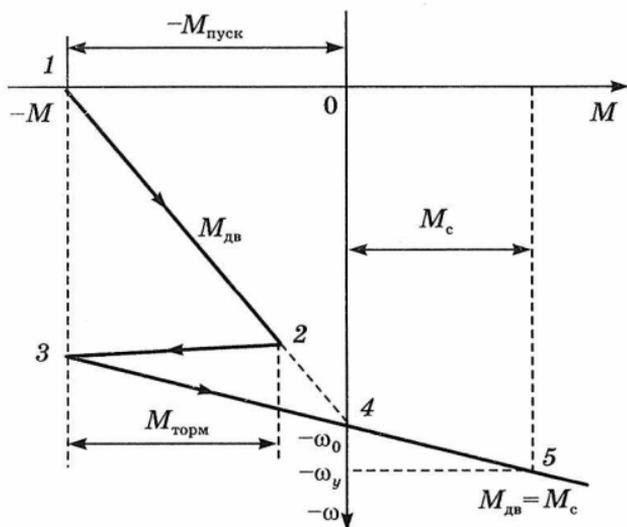


Рис. 2.19  
Механические характеристики ДПТ НВ при спуске груза

постоянного тока, преодолевая точку 4, соответствующую идеальному холостому ходу, переходит в генераторный режим работы. Отдача электрической энергии осуществляется на отрезке [4, 5]. Электропривод на этом участке разгоняется намного медленнее, так как электромагнитный момент при переходе через ось ординат меняет свой знак на противоположный.

Рассмотренный вид торможения обеспечивает только тормозной спуск со скоростью, превышающей  $\omega_0$ , и не может быть использован для полной остановки ДПТ.

Двигатели с последовательным возбуждением без изменения схемы подключения не могут работать с отдачей энергии в сеть. Машины постоянного тока смешанного возбуждения переходят в генераторный режим автоматически.

**Динамическое торможение.** В режиме электродинамического торможения двигатели постоянного тока с обмотками независимого и параллельного возбуждения применяются в качестве генераторов постоянного тока независимого возбуждения или самовозбуждения, у которых обмотка якоря замкнута на добавочное тормозное сопротивление. На рисунке 2.20 представлены схемы подключения ДПТ при динамическом торможении.

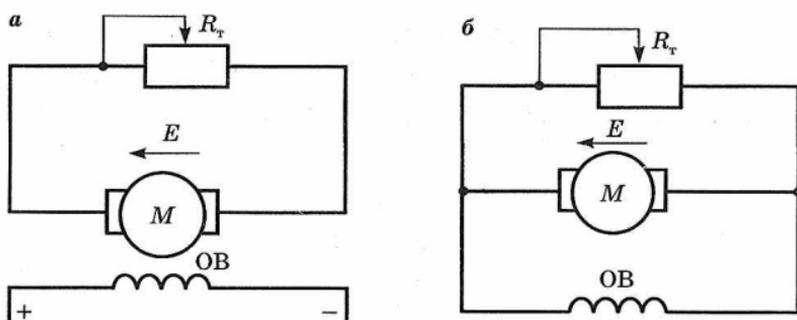


Рис. 2.20

Схемы динамического торможения двигателя постоянного тока с независимой (а) и параллельной (б) обмоткой возбуждения

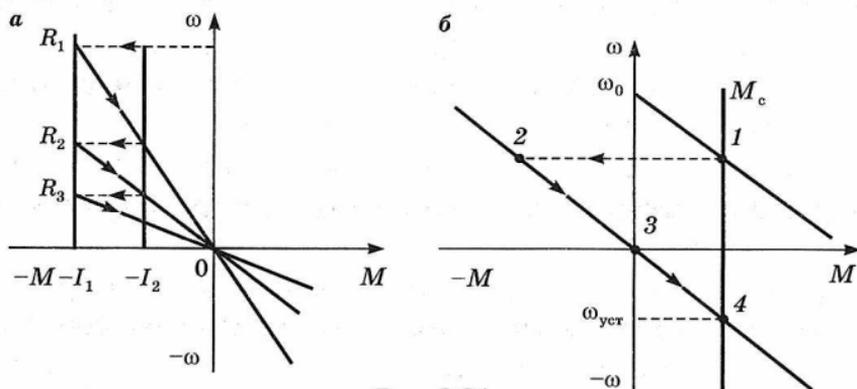


Рис. 2.21

Механические характеристики ДПТ НВ в режиме динамического торможения:

а — характеристики, полученные при замыкании обмотки якоря на многоступенчатое тормозное сопротивление; б — характеристики, построенные в результате спуска груза.

Запасенная в процессе работы электродвигателя кинетическая или потенциальная энергия преобразуется в электрическую и выделяется в виде тепловой энергии в обмотке якоря и на тормозном сопротивлении.

Причиной появления тока якоря является ЭДС, величина и знак которой определяются магнитным потоком и скоростью вращения. Если выполняется торможение движущегося по инерции механизма, то направление вращения якоря и знак ЭДС сохраняются, а направление тока в якорной обмотке по сравнению с двигательным режимом работы изменяется на противоположное. Остановка электропривода может выполняться практически мгновенно, если обмотка якоря подключается к большому по величине тормозному сопротивлению или с выдержкой во времени, если присоединение происходит к многоступенчатому резистору. На рисунке 2.21 изображены механические характеристики ДПТ НВ в режиме торможения.

Уравнение механической характеристики ДПТ НВ в тормозном режиме работы:

$$\omega = -M \frac{\sum R}{(C_k \Phi)^2}, \quad (2.27)$$

где  $\sum R$  — суммарное сопротивление цепи якоря.

Управление моментом ДПТ с заданием времени наиболее часто используется в режиме многоступенчатого динамического торможения. Входящие в состав схемы реле времени подают команды на последовательное отключение ступеней тормозного сопротивления. Электромагнитные реле времени настраиваются таким образом, чтобы в процессе коммутации они обеспечивали колебания тока якоря  $I$  и тормозного момента  $M$  в определенном диапазоне (рис. 2.21а).

Динамическое торможение с выдержкой во времени протекает по следующему алгоритму. При отключении обмотки якоря от сети схемным решением она замыкается на полный набор тормозных сопротивлений. По мере снижения оборотов якоря происходит последовательное отключение секций многоступенчатого резистора ( $R_1 > R_2 > R_3$ ), в результате скорость двигателя спадает до

нуля, и если электропривод в этот момент времени не отключается от сети, то начинается его разгон с изменением направления вращения.

Динамическое торможение широко используется для остановки привода в период отключения его от сети, например при спуске груза (см. рис. 2.21б). Процесс отключения якоря от сети и замыкание его обмотки на тормозное сопротивление сопровождается тем, что из установившегося двигательного режима работы, обозначенного на механической характеристике точкой 1, электропривод переходит в точку 2 на характеристику динамического торможения (точки 2-3-4). В точке 3 электродвигатель останавливается, тормозной момент снижается до нуля, а якорь начинает вращаться в обратную сторону. Электрическая машина переходит в режим противовключения. Под воздействием  $M_c$  скорость двигателя возрастает до тех пор, пока в точке 4 тормозной момент не станет равным моменту сопротивления,  $M_T = M_c$ , а  $\omega = \omega_{уст}$ .

Перевести электродвигатель в режим противовключения возможно и в результате изменения полярности напряжения в электрической цепи якоря.

Наиболее интенсивное торможение получается при замыкании обмотки якоря накоротко. Однако по условиям ограничения тока подобная процедура возможна, только когда электропривод работает на малых скоростях вращения.

С энергетической точки зрения рассмотренный способ торможения выгоднее режима противовключения, однако уступает генераторному, поскольку в процессе рекуперации энергии двигатель постоянного тока не только отдает, но потребляет обмоткой возбуждения электрическую мощность из сети.

**Динамическое торможение электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения реализуется по двум схемам: с независимым возбуждением и самовозбуждением. Торможение ДПТ ПВ с независимым возбуждением выполняется аналогично машине постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения (см. рис. 2.20а).**

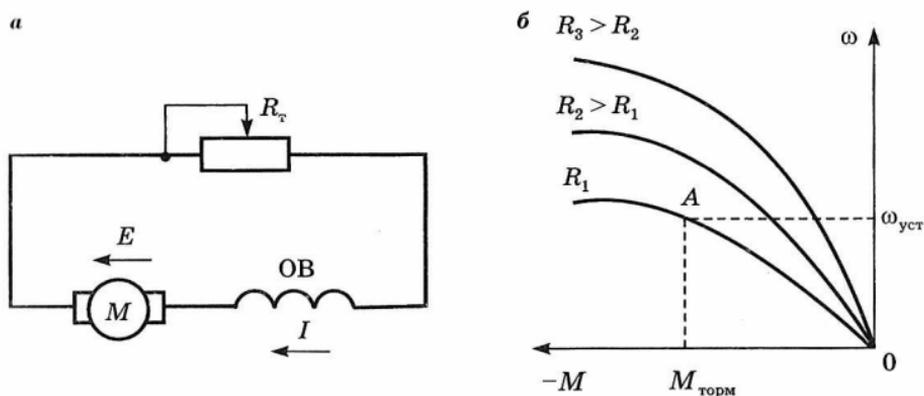


Рис. 2.22

Схема подключения (а) и механические характеристики (б) ДПТ ПВ в режиме динамического торможения с самовозбуждением

Характеристики выглядят в виде прямых линий, представленных на рисунке 2.21а.

В практике широкое применение находит динамическое торможение с самовозбуждением. Схема подключения и механические характеристики показаны на рисунке 2.22.

Сущность исследуемого тормозного режима заключается в том, что двигатель, отключенный от сети, замыкается на тормозное сопротивление и работает в качестве генератора с самовозбуждением. Под действием кинетической энергии нагрузки якорь начинает вращаться. В результате наличия остаточного магнетизма в магнитопроводе якоря в его обмотке индуцируется ЭДС. Наводимая ЭДС вызывает появление тока, который создает основной магнитный поток  $\Phi$ , совпадающий по направлению с остаточным  $\Phi_{ост}$ , что приводит к увеличению ЭДС двигателя и тока якоря. Процесс продолжается до тех пор, пока ЭДС не станет равной суммарному падению напряжения в электрической цепи якоря.

Резкое увеличение ЭДС одновременно с ростом скорости вращения электропривода создает неравномерное движение нагрузки, при этом торможение получается недостаточно плавным. Например, в первый период спуска груза крановым механизмом скорость двигателя и его тормозной момент весьма малы. Груз свободно опускается под действием силы тяжести. По мере опускания груза оборо-

ты якоря нарастают, и наступает процесс самовозбуждения двигателя. Вследствие этого появляется тормозной момент, и движение груза затормаживается (точка А, рис. 2.22б), при этом на конструкцию крана в виде толчков различной интенсивности воздействуют динамические нагрузки, поэтому данный вид торможения используется только в аварийных ситуациях.

**Торможение противовключением.** Противовключением называется режим, когда электропривод под действием запаса кинетической энергии или потенциальных сил исполнительного органа вращается в сторону, обратную действию электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем.

Момент двигателя, стремящегося вращаться в противоположную сторону, противодействует движению исполнительного механизма нагрузочной машины, т. е. создаст тормозной момент сопротивления. Рассматриваемый режим может иметь место в электроприводе кранового механизма, когда двигатель работает на подъем груза, а обмотка якоря подключается к значительному по величине добавочному сопротивлению. Повышенное сопротивление электрической цепи якоря приводит к тому, что электродвигатель переходит с естественной на искусственную механическую характеристику с большой крутизной, на которой электромагнитный момент, развиваемый двигателем, будет значительно меньше момента сопротивления. Электрическая машина начнет замедляться, и если процесс не будет остановлен, то при достаточной величине нагрузки произойдет изменение направления движения, и якорь с ускорением продолжит вращаться в обратном направлении, до тех пор, пока электромагнитный момент не сравняется по величине с моментом сопротивления.

На рисунке 2.23 изображены схема подключения и механическая характеристика электропривода в режиме противовключения.

Механическая характеристика в режиме противовключения является продолжением характеристики двигательного режима в 4-м квадранте (рис. 2.23б). Подъем

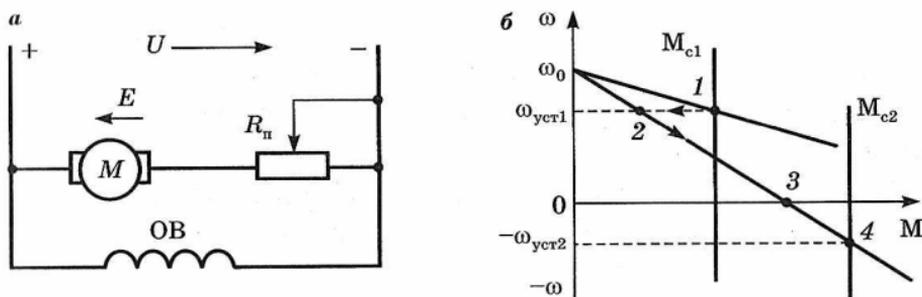


Рис. 2.23

Схема включения ДПТ НВ в режиме противовключения (а) и механические характеристики (б)

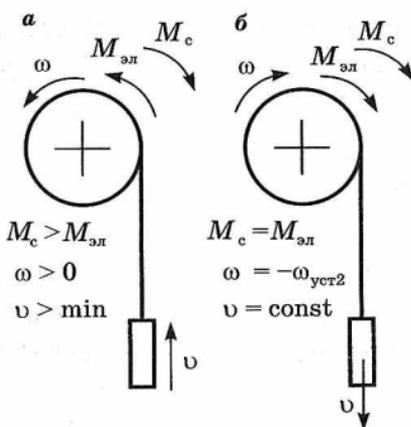


Рис. 2.24

Торможение ДПТ НВ в режиме противовключения:

а — тормозной подъем груза; б — режим противовключения.

груза с установившейся скоростью вращения  $\omega_{уст1}$  возможен, когда  $M_{с1} = M_{дв1}$ , что соответствует точке 1. При включении в цепь якоря дополнительного сопротивления (рис. 2.23а) ток электрической цепи резко падает, а момент сопротивления  $M_{с1}$  становится больше электромагнитного момента двигателя  $M_{дв1}$ . Увеличение нагрузочного момента переводит работу электродвигателя с естественной механической характеристики на искусственную (точка 2). Электропривод начинает замедляться (рис. 2.24а), и его обороты спадают до нуля (точка 3).

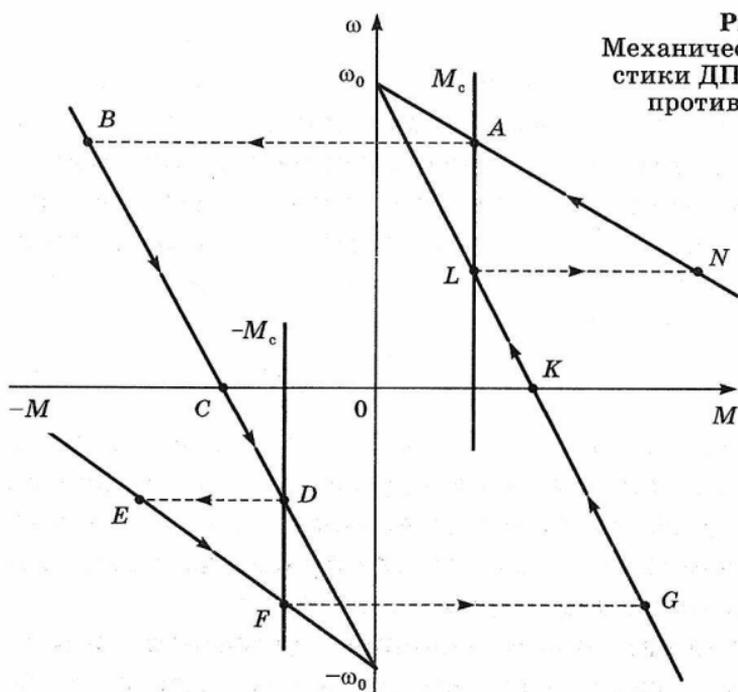
Под действием величины груза якорь машины постоянного тока с параллельным возбуждением меняет направление вращения на противоположное, и начинается ускоренный разгон электропривода, пока  $M_{с2}$  не станет равным  $M_{дв2}$  (точка 4). Обороты двигателя перестают расти и достигают значения  $-\omega_{уст2}$  (рис. 2.24б), а электропри-

вод кранового механизма переходит в новый установившейся режим работы с противоположным направлением вращения якоря, который называется режимом противовключения.

Режим торможения противовключением у ДПТ с независимым и параллельным возбуждением достигается и в результате смены полярности напряжения на обмотке якоря. Под влиянием запасенной кинетической энергии системы вал двигателя продолжает вращаться в прежнем направлении, в то время как обмотка якоря подключена к источнику напряжения так, чтобы создавать вращение исполнительного органа рабочей машины в обратную сторону.

Изменение схемы подключения соответствует переходу из точки *A* в точку *B* (рис. 2.25). Сохранение неизменной угловой скорости в первый момент времени обусловлено большой механической инерцией всех вращательных элементов электропривода.

Под влиянием момента сопротивления обороты вращения двигателя уменьшаются до 0, участок механичес-



**Рис. 2.25**  
Механические характеристики ДПТ НВ в режиме противовключения

кой характеристики  $[B, C]$  во втором квадранте. Когда угловая частота вращения достигнет нулевой отметки (точка  $C$ ), электродвигатель необходимо отключить от источника напряжения. Если в этот момент электропривод не отключается от сети, то якорь меняет направление вращения на противоположное. Скорость двигателя начинает плавно увеличиваться по отрезку  $[C, D]$  механической характеристики (квадрант 3). При достижении скорости соответствующей точке  $D$ , ток и электромагнитный момент резко возрастают. Работа двигателя скачкообразно переходит с точки  $D$  на точку  $E$ , находящейся на естественной механической характеристике  $[E, F]$ . Электропривод продолжает разгон до тех пор, пока не наступит равенство между моментом сопротивления и электромагнитным моментом (точка  $F$ ). Если в очередной раз поменять полярность напряжения на обмотке якоря, то электродвигатель перейдет с точки  $F$  на точку  $G$ , и весь цикл повторится заново. Двигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения выйдет в первоначальный режим работы (точка  $A$ ).

ЭДС электрической машины в процессе торможения противовключением совпадает по направлению с током, протекающим по обмотке якоря. Для ограничения тока и тормозного момента в период коммутации в электрическую цепь якоря включается добавочное сопротивление, в 2 раза превышающее величину пускового резистора.

При торможении к электродвигателю с одной стороны подводится электрическая мощность, а с другой механическая, которые расходятся в сопротивлении цепи якоря

$$P_{\text{эл}} + P_{\text{мех}} = UI + EI = I^2 \sum R. \quad (2.28)$$

Режим противовключения обеспечивает быстрое торможение до полной остановки электропривода, сопровождающееся потреблением электрической энергии из сети, сильным нагревом обмоток и сравнительно мало изменяющимся тормозным моментом.

**Торможение противовключением двигателя постоянного тока последовательного возбуждения является основ-**

ным тормозным режимом, который можно осуществить в результате смены полярности напряжения на обмотке якоря или вводом в электрическую цепь добавочного сопротивления.

На рисунке 2.26 представлены схема подключения и механические характеристики. После переключения полярности напряжения на обмотке якоря совершается изменение направления действия электромагнитного момента. Процесс торможения протекает следующим образом.

До торможения электропривод работал в точке *A*, поднимая груз с установившейся скоростью вращения (рис. 2.26б). После изменения полярности напряжения на обмотка и включения в электрическую цепь сопротивления  $R_r$ , предназначенного для ограничения тока и, следовательно, тормозного момента (рис. 2.26а), работа элект-

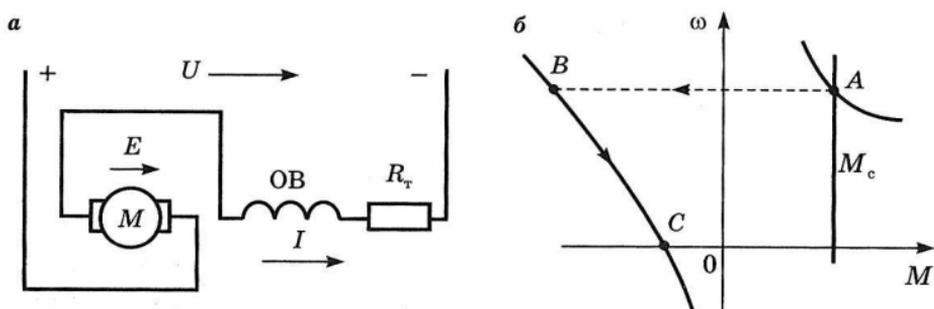


Рис. 2.26

Схема подключения (а) и механические характеристики (б) ДПТ ПВ при торможении противовключением

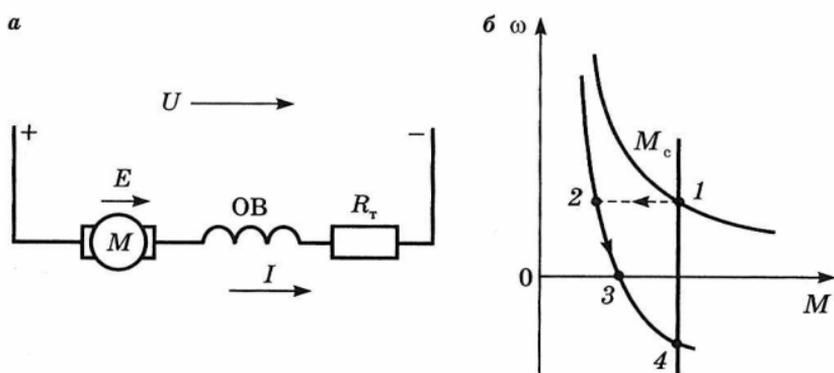


Рис. 2.27

Схема подключения (а) и механические характеристики (б) ДПТ ПВ при спуске груза в режиме торможения противовключением

родвигателя переходит на искусственную механическую характеристику в точку  $B$ , электромагнитный момент уменьшается и начинается процесс торможения противовключением (участок  $BC$ ). В точке  $C$  торможение заканчивается, обороты спадают до нуля, и схема управления должна отключить двигатель от источника питания. Если электропривод не отключается от сети, то происходит разгон якоря, но в противоположную сторону вращения. Электропривод разгоняется, пока не сравняются между собой электромагнитный момент двигателя и момент сопротивления нагрузочной машины.

Торможение противовключением у ДПТ ПВ возникает и тогда, когда в цепь якоря вводится добавочное сопротивление  $R_T$ .

Схема включения и механические характеристики представлены на рисунке 2.27.

Переход из двигательного в тормозной режим работы выполняется следующим образом. Первоначально электропривод кранового устройства работает на подъем груза с установившейся скоростью вращения. При введении в электрическую цепь тормозного сопротивления  $R_T$  (рис. 2.27а) момент, развиваемый двигателем, становится меньше момента сопротивления, однако под действием запасенной кинетической энергии маховых масс электропривод, не снижая обороты, переходит из точки 1 в точку 2 (рис. 2.27б). Подъем груза прекращается. Под действием статического момента сопротивления, превосходящего по своей величине электромагнитный момент двигателя, груз начинает опускаться. В точке 3 обороты становятся равными нулю. Если обмотки ДПТ ПВ не отключаются от сети, то якорь машины постоянного тока приходит во вращение и начинается разгон в противоположном направлении. При некоторых оборотах вращения якоря достигается равенство тормозного и статического моментов (точка 4), и спуск груза выполняется с постоянной скоростью вращения.

Смена направления вращения электродвигателя изменяет и знак действия ЭДС, которая становится согласно направленной с напряжением источника питания.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие параметры машины постоянного тока связывают между собой механическая и электромеханическая характеристики?
2. Что понимается под жесткостью механических характеристик?
3. Какие приводные характеристики называются естественными, а какие искусственными?
4. Перечислите способы регулирования оборотов вращения ДПТ НВ.
5. Дайте характеристику основным способам регулирования угловой частоты вращения ДПТ НВ.
6. Охарактеризуйте способы изменения оборотов вращения якоря у двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
7. Перечислите возможные режимы работы ДПТ последовательного возбуждения и ДПТ смешанного возбуждения.
8. Для какой цели необходимы тормозные режимы работы ДПТ?
9. Назовите основные виды торможения ДПТ и дайте их краткую характеристику.
10. В каких электроприводах применяются ДПТ?

# ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## 3.1. АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**А**синхронным двигателем (АД) называется электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора отстает от частоты вращения электромагнитного поля статора. Отечественная и зарубежная промышленности выпускают асинхронные электродвигатели однофазного и трехфазного тока. Асинхронная машина обратима и может работать в двигательном режиме, преобразуя электрическую энергию в механическую, или в генераторном, преобразуя механическую в электрическую.

Из всех разновидностей электрических машин переменного тока наибольшее распространение в промышленности и сельскохозяйственном производстве получил трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором.

Конструктивно трехфазный электродвигатель состоит из статора и ротора. Статор — неподвижная часть, а ротор — вращающийся элемент электрической машины, которые разделены между собой воздушным зазором. Магнитопровод асинхронного двигателя набирают из тонкой листовой электротехнической стали с пазами на внутренней поверхности для укладки обмоток.

По конструкции ротора асинхронные машины подразделяют на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Оба типа имеют одинаковую конструкцию статора и отличаются лишь исполнением обмотки ротора. Обмотку короткозамкнутого ротора изготавливают в результате заливки пазов магнитопровода расплавленным алюминием под высоким давлением. Сво-

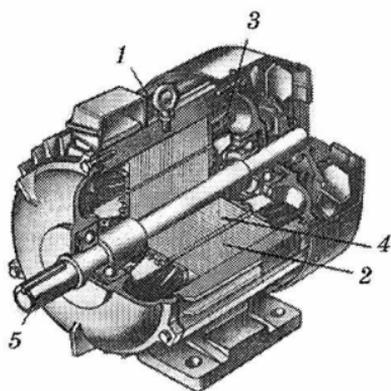


Рис. 3.1

Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора:

1 — статор; 2 — магнитопровод статора; 3 — обмотка статора; 4 — ротор; 5 — выходной вал.

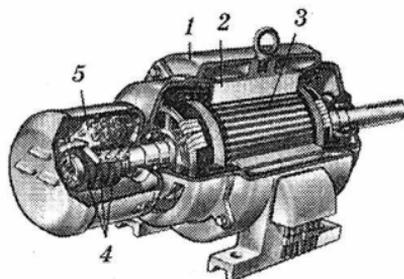


Рис. 3.2

Асинхронный электродвигатель с фазной обмоткой ротора:

1 — статор; 2 — магнитопровод статора с обмоткой; 3 — ротор с обмоткой; 4 — контактные кольца; 5 — щеткодержатели.

бодные концы по торцам замыкают проводящими кольцами, изготовленными из того же материала. В фазном роторе в пазах укладывается трехфазная медная обмотка, соединяемая обычно по схеме «звезда».

На рисунке 3.1 изображена фотография трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя в разрезе, а на рисунке 3.2 — двигателя с фазным ротором.

Обмотки статора могут соединяться по схеме «звезда» или «треугольник». Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от напряжения сети и паспортных данных электрической машины. В паспорте трехфазного двигателя задаются линейные напряжения и схемы соединения обмоток статора. Например, 380/220, Y/Δ. Электродвигатель можно включать в сеть с линейным напряжением 380 В по схеме «звезда» или подключать к источнику электроснабжения с напряжением 220 В — по схеме «треугольник».

На базе двигателей основного исполнения, предназначенных для нормальных условий работы в длительном режиме, предусмотрены модификации с повышенным пусковым моментом и скольжением, многоскоростные, двигатели со встроенной температурной защитой, тропического и химвстойкого исполнения, для холодного климата и сельскохозяйственного назначения.

Принцип работы трехфазного асинхронного электродвигателя следующий. На обмотку статора подается переменное напряжение, под действием которого по обмоткам начинает протекать электрический ток, который создает вращающееся магнитное поле. Магнитное поле через воздушный зазор воздействует на стержни ротора и по закону магнитной индукции наводит в них ЭДС. В проводниках ротора под действием ЭДС возникает ток, вызывающий появление магнитного потока, который вступает во взаимодействие с магнитным полем статора. В результате на короткозамкнутую обмотку действует сила, создающая вращающийся электромагнитный момент ротора.

Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их достоинствами по сравнению с другими двигателями: высокая надежность, возможность работы непосредственно от сети переменного тока, простота обслуживания.

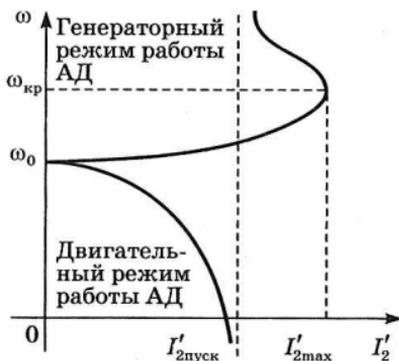
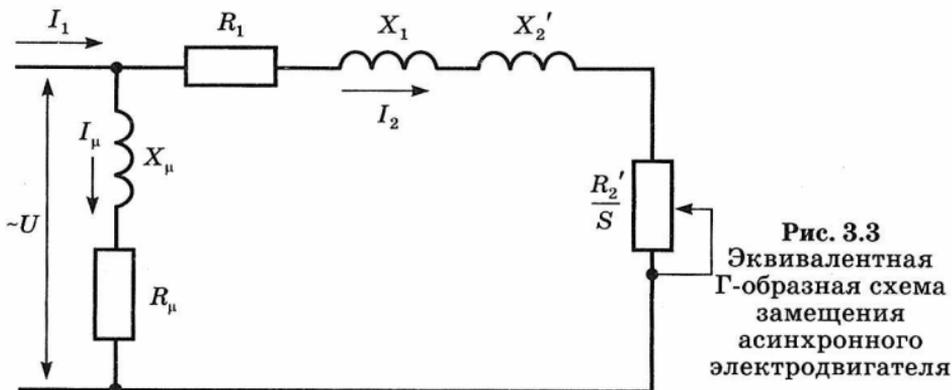
### 3.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронный двигатель обладает свойством обратимости и может работать в двигательном и тормозных режимах: генераторном, противовключения и динамического торможения. Анализ работы асинхронного электродвигателя в установившихся режимах основывается на изучении электромагнитных и электрических явлений для одной из фаз эквивалентной схемы. Наиболее удобна для вывода основных уравнений электропривода Г-образная схема замещения (см. рис. 3.3).

Первичный ток для любого значения скольжения определяется из формулы

$$I_1 = U_\phi \left[ \frac{1}{R_\mu + jX_\mu} + \frac{1}{R_1 + \frac{R'_2}{S} + j(X_1 + X'_2)} \right], \quad (3.1)$$

где  $U_\phi$  — фазное напряжение сети;  $R_1, R'_2$  — первичное и вторичное приведенные активные сопротивления;  $X_1, X_2$  —



индуктивные сопротивления от потоков рассеяния фазы обмотки статора и приведенной фазы ротора;  $R_\mu$ ,  $X_\mu$  — активное и индуктивное сопротивления контура намагничивания;  $S$  — скольжение асинхронного электродвигателя.

Приведенный ток ротора рассчитывается по выражению

$$I_2' = \frac{U_\Phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (3.2)$$

Формула (3.2) считается уравнением, описывающим электромеханическую характеристику асинхронного электродвигателя. На рисунке 3.4 представлена электромеханическая характеристика асинхронного двигателя.

Связь между угловой скоростью вращения АД и скольжением осуществляется с помощью математического выражения

$$\omega = \omega_0(1 - S). \quad (3.3)$$

Приведенный ток ротора является функцией скольжения. Когда скольжение  $S = 0$ , ток ротора также принима-

ет значение, равное 0. С увеличением скольжения растет и  $I'_2$ , и в момент достижения  $S = 1$  ток становится равным пусковому значению:

$$I'_{2n} = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (3.4)$$

Пусковой ток превышает номинальный в 5–8 раз при отсутствии в цепи ротора пускового сопротивления. Большие пусковые токи вызывают значительное падение напряжения в сети, что приводит к ухудшению работы других электроприемников.

Эквивалентная схема замещения дает возможность получить выражение для электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем. Электрическая мощность, потребляемая из сети, частично расходуется на потери, возникающие за счет перемагничивания стали в обмотке статора, и преобразуется в электромагнитную мощность

$$P_1 = p_0 + p_{m1} + P_{эм}, \quad (3.5)$$

где  $p_0$  — потери мощности на перемагничивание;  $p_{m1}$  — потери в меди обмотки статора;  $P_{эм}$  — электромагнитная мощность.

Электромагнитная мощность рассчитывается как

$$P_{эм} = \frac{mU_\phi^2 \frac{R'_2}{S}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}, \quad (3.6)$$

где  $m$  — количество фаз электродвигателя.

Электромагнитная мощность может быть определена и по другой формуле:

$$P_{эм} = M_{эм}\omega_0. \quad (3.7)$$

Из выражений (3.6) и (3.7) находится электромагнитный момент асинхронного электродвигателя:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_0} = \frac{mU_\phi^2 \frac{R'_2}{S}}{\omega_0 \left[ \left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}. \quad (3.8)$$

Произведя ряд математических преобразований и упрощений, а также заменяя  $M_{эм}$  на  $M$ , в окончательном варианте получим выражение для расчета электромагнитного момента асинхронного электродвигателя:

$$M = \frac{2M_k(1-\varepsilon)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2\varepsilon}, \quad (3.9)$$

где  $M_k$  — критический момент электродвигателя;  $S_k$  — критическое скольжение;  $\varepsilon$  — коэффициент, связывающий между собой критическое скольжение и отношение активных сопротивлений двух обмоток,

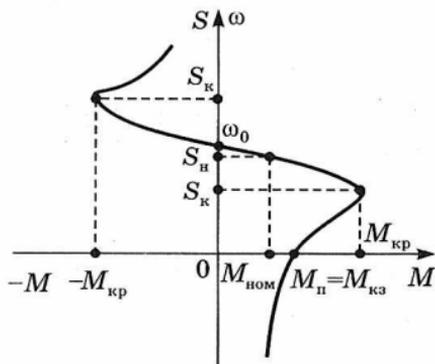
$$\varepsilon = S_k \frac{R_1}{R_2'}.$$

Выражение (3.9) называется уравнением **механической характеристики** асинхронного двигателя.

У большинства электрических машин активное сопротивление обмотки статора намного меньше индуктивного сопротивления двигателя при коротком замыкании. Тогда если принять  $R_1 = 0$  и  $\varepsilon = 0$ , то получим упрощенное уравнение для расчета электромагнитного момента:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}. \quad (3.10)$$

Выражение (3.10) называется формулой Клосса.



**Рис. 3.5**  
Механическая характеристика АД в двигательном и генераторном режимах работы, а также в режиме противовключения

На рисунке 3.5 представлена механическая характеристика асинхронного электрического двигателя. На кривых отмечены характерные точки:  $S = 0$ ,  $\omega = \omega_0$  — идеальный холостой ход;  $S = 1$ ,  $\omega = 0$  — режим короткого замыкания;  $S < 0$ ,  $\omega > \omega_0$  — генераторный режим работы АД параллельно с сетью (рекуперативное торможение);  $S > 1$ ,  $\omega < 0$  — генераторное торможение, последовательно с сетью (торможение противовключением).

Критическое скольжение рассчитывается как

$$S_k = S_n \left[ \lambda_{\max} \pm \sqrt{(\lambda_{\max}^2 - 1)} \right], \quad (3.11)$$

где  $\lambda_{\max}$  — кратность максимального электромагнитного момента,

$$\lambda_{\max} = \frac{M_k}{M_{\text{ном}}}.$$

Положительный знак в выражении (3.11) берется, когда  $S > 0$ , что соответствует двигательному режиму работы, а отрицательный принимается при  $S < 0$ , в момент перехода электрического двигателя в генераторный режим. Скольжение в двигательном режиме изменяется от 0 до 1 ( $0 < S < 1$ ).

Рабочая часть кривой от синхронной скорости до точки, близкой к критической, в которой происходит опрокидывание электродвигателя, ориентировочно может быть принята линейной. Рассматриваемый участок характеризуется небольшим падением угловой скорости и считается жестким с крутизной от 1 до 5%. Отрезок от критической точки до полной остановки ротора относится к разряду мягкой механической характеристики с большим падением скорости.

В зависимости от назначения АД могут иметь различные кратности пускового и критического моментов. Для серии АИ кратность  $\lambda_{\max}$ , характеризующая перегрузочную способность двигателей, лежит в пределах 1,7–3. Двигатели с фазным ротором имеют  $\lambda_{\max} = 1,8$ . Диапазон изменения  $\lambda_{\max}$  для крановых электродвигателей серии МТФ находится в пределах 2,3–3,4. Кратность пускового момента  $\lambda_{\text{пуск}}$  для асинхронных электродвигателей изменяется от 1,2 до 2,3.

### 3.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Регулирование оборотов вращения асинхронного электродвигателя может осуществляться в результате включения добавочных резисторов в электрические цепи обмотки статора и ротора, изменением напряжения, подводимого к выходным клеммам статора, варьированием частоты питающего тока, переключением числа пар полюсов и за счет использования импульсного источника электроснабжения.

Обороты вращения ротора  $n_2$  асинхронного двигателя определяются синхронной частотой вращения магнитного поля  $n_0$  и скольжением  $S$ .

В большинстве случаев работа асинхронного электродвигателя нормально протекает в пределах вариации значений скольжения от  $S = 0$  до

$$S = (1,2-1,5) S_{\text{ном}}.$$

Обороты вращения ротора рассчитываются из уравнения

$$n_2 = n_0(1 - S) = \frac{60f_1}{p}, \quad (3.12)$$

где  $f_1$  — частота питающего тока;  $p$  — количество пар полюсов.

**Влияние напряжения питающей сети на изменение оборотов вращения асинхронного электродвигателя вытекает из уравнений механической и электромеханической характеристик:**

$$M = \frac{mU_{\Phi}^2 \frac{R_2'}{S}}{\omega_0 \left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + X_{\text{к}}^2}, \quad (3.13)$$

где  $X_{\text{к}}$  — индуктивное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания,  $X_{\text{к}} = X_1 + X_2$ ;

$$I_2' = \frac{U_{\Phi}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + X_{\text{к}}^2}}. \quad (3.14)$$

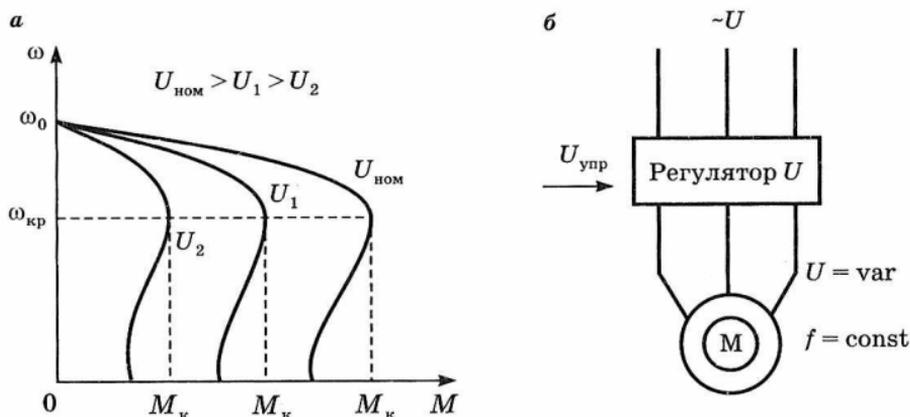


Рис. 3.6

Механические характеристики (а) при регулировании напряжения питания АД; упрощенная схема (б) регулятора напряжения

Из уравнений (3.13) и (3.14) видно, что электромагнитный момент, развиваемый двигателем, прямо пропорционален квадрату напряжения источника питания, а приведенный ток ротора изменяется линейно в функции подводимого напряжения.

На основании предложенных выражений строится семейство механических характеристик. Обозначенные на кривых пусковой, номинальный и критический моменты либо увеличиваются, либо уменьшаются. Изменения происходят в зависимости от величины подводимого напряжения (рис. 3.6а). Регулировать напряжение возможно в статических и динамических режимах работы АД с помощью довольно простых схем управления, выполненных на полупроводниковой базе (рис. 3.6б).

Регулирование напряжения на статоре приводит к снижению критического момента и, следовательно, перегрузочной способности электропривода. Диапазон изменения угловой скорости вращения ротора слишком мал, а сам способ считается малоэффективным. Данный метод рекомендуется применять только в переходных периодах работы электропривода, чтобы воздействовать на электромагнитный момент.

Регулировать напряжение можно с помощью **автотрансформаторов, магнитных усилителей и тиристорных регуляторов напряжения (ТРН)**, которые получили широкое

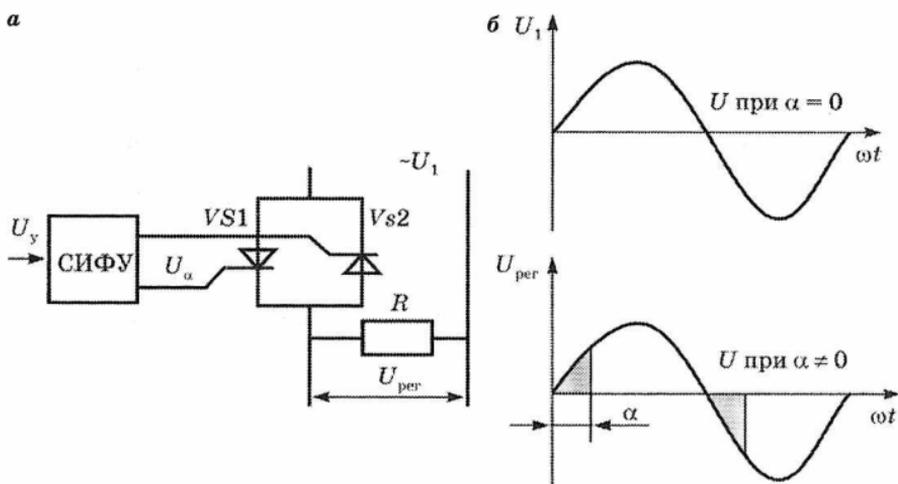


Рис. 3.7

Упрощенная схема (а) и синусоиды напряжения (б) однофазного ТРН

распространение из-за повышенного КПД, простоты обслуживания, высокой степени автоматизации и надежности. ТРН позволяют реализовать самые разнообразные функции по управлению и оптимизации режимов работ электропривода с асинхронным электродвигателем.

На рисунке 3.7 представлена упрощенная схема регулирования выходного напряжения однофазного тиристорного регулятора.

В силовую часть однофазного ТРН включены два управляемых тиристора, которые обеспечивают протекание электрического тока на нагрузке в двух направлениях при синусоидальном напряжении на входе.

Тиристоры получают импульсы управления от системы импульсно-фазового управления (СИФУ), которая обеспечивает их сдвиг на угол управления  $\alpha$  в функции внешнего сигнала управления  $U_y$ .

Изменяя угол управления, можно регулировать напряжение на нагрузке от полного напряжения до нуля.

Следует отметить, что получаемая форма напряжения несинусоидальна. Несинусоидальное напряжение можно представить как совокупность нескольких синусоидальных гармоник, каждая из которых изменяется с определенной частотой. Частота изменения первой из них (основной гармоники) равна частоте питающего напряжения,

а частота других гармоник больше, чем первая. Первая гармоника имеет наибольшую амплитуду и по ней ведутся все основные расчеты.

Для реализации трехфазного ТРН в каждую из фаз включают по два встречно работающих тиристора. Функциональные возможности тиристорного регулятора — реверс, торможение, формирование всех динамических характеристик.

**Введение активных и индуктивных сопротивлений в цепь статора** осуществляется с целью ограничения пускового тока мощных электродвигателей, чтобы исключить недопустимое снижение напряжения системы питания, а также для регулирования оборотов вращения и электромагнитного момента двигателя. Все искусственные характеристики располагаются в первом квадранте ниже естественной кривой.

Искусственные характеристики, представленные на рисунке 3.8б, практически не пригодны для регулирования скорости, так как обеспечивают небольшой диапазон изменения оборотов вращения, малую перегрузочную способность, недостаточную жесткость, а также низкую экономичность.

Рассматриваемый способ применяется, например, в электроприводе лифтов, в состав которого входит двухскоростной АД. Для ограничения тока и электромагнитного момента в цепь низкоскоростной обмотки статора

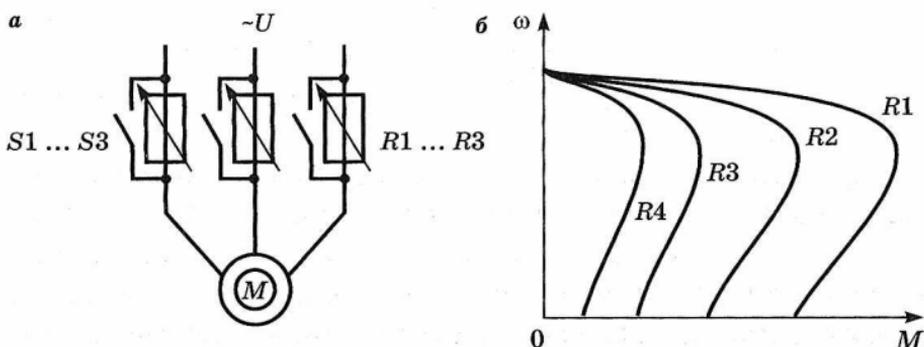


Рис. 3.8

Упрощенная схема (а) подключения переменных резисторов в электрические цепи фаз обмотки статора; естественная и искусственные механические характеристики (б) АД:  $R1 < R2 < R3 < R4$

включаются добавочные резисторы в момент перехода с высокой скорости вращения ротора на более низкую.

В процессе регулирования оборотов вращения в сторону понижения уменьшаются пусковые, номинальные и критические моменты асинхронного электродвигателя при сохранении неизменной угловой частоты вращения в режиме идеального холостого хода.

Критическое скольжение при введении в цепь статора добавочных сопротивлений также несколько снижается.

Иногда в электроприводах малой мощности добавочный резистор включается только в одну фазу, что позволяет получить необходимый эффект снижения пускового тока и электромагнитного момента, а также смягчение ударов в передачах и обеспечение плавного ускорения за счет использования меньшего количества переменных сопротивлений.

Для регулирования оборотов вращения АД и ограничения пусковых токов в электрические цепи обмотки статора включают не только активные, но и индуктивные сопротивления — реакторы.

Величина сопротивления, включаемого в цепь статора, определяется желаемым значением пускового тока.

Добавочные активные и индуктивные сопротивления рассчитываются по выражениям

$$R_d = \sqrt{\left(\frac{Z_k}{\lambda}\right)^2 - X_k^2 - R_k}; \quad (3.15)$$

$$X_d = \sqrt{\left(\frac{Z_k}{\lambda}\right)^2 - R_k^2 - X_k}, \quad (3.16)$$

где  $Z_k$  — полное сопротивление в режиме короткого замыкания АД;  $\lambda$  — кратность пускового тока к ограниченному.

Регулирование угловой частоты вращения асинхронного электродвигателя путем включения активных и индуктивных сопротивлений в цепь ротора широко используется и для ограничения пусковых токов и изменения вида механической характеристики.

Добавочное сопротивление в цепи ротора вызывает увеличение критического скольжения:

$$S_k = \frac{R'_2 + R'_{доб}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (3.17)$$

Активное и индуктивное сопротивления в цепи ротора изменяют критическое скольжение, не оказывая влияние на величину критического момента

$$M_k = \frac{mU_{\Phi}^2}{2\omega_0(\sqrt{R_1^2 + X_k^2} + R_1)}. \quad (3.18)$$

Увеличение активного сопротивления электрической цепи ротора повышает  $\cos \varphi_2$ :

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_1 + \frac{R'_2}{S}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_k^2}}. \quad (3.19)$$

На рисунке 3.9 изображена упрощенная схема подключения резисторов в фазы обмотки ротора асинхронного электродвигателя и механические характеристики. Анализ характеристик, представленных на рисунке, позволяет сделать ряд выводов. Рассматриваемый способ регулирования оборотов вращения АД с фазным ротором при переходе с естественной механической характеристики  $R_{p1}$

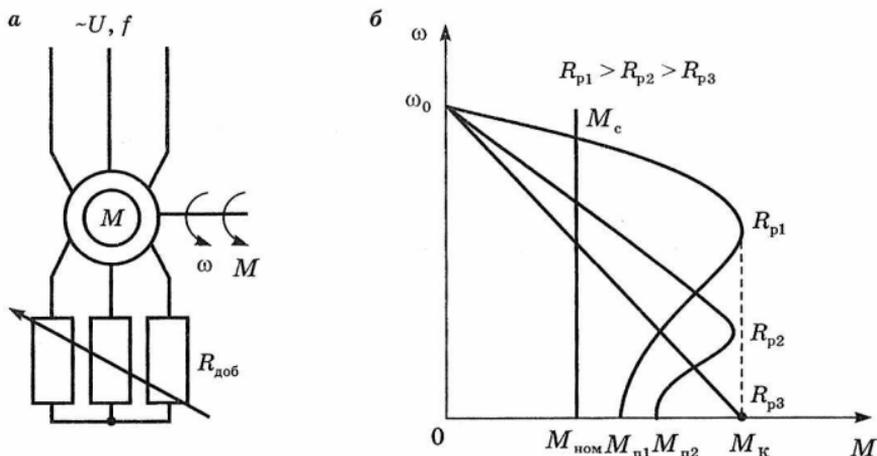


Рис. 3.9

Упрощенная схема подключения резисторов (а) асинхронного двигателя с фазным ротором и механические характеристики (б)

на искусственные  $R_{p2}$  и  $R_{p3}$  сохраняет числовые значения скорости идеального холостого хода и максимального момента. Введением в цепь ротора добавочного сопротивления возможно в широком диапазоне повышать пусковой момент АД вплоть до критического значения при одновременном снижении тока короткого замыкания, что позволяет сохранить постоянной перегрузочную способность АД.

Данный способ имеет следующие особенности: регулировка только вниз от естественной характеристики, небольшой диапазон изменения скорости из-за снижения жесткости, плавность регулирования определяется видом добавочного резистора, небольшие затраты. В то же время эксплуатационные расходы оказываются значительными, так как велики потери мощности в асинхронном двигателе.

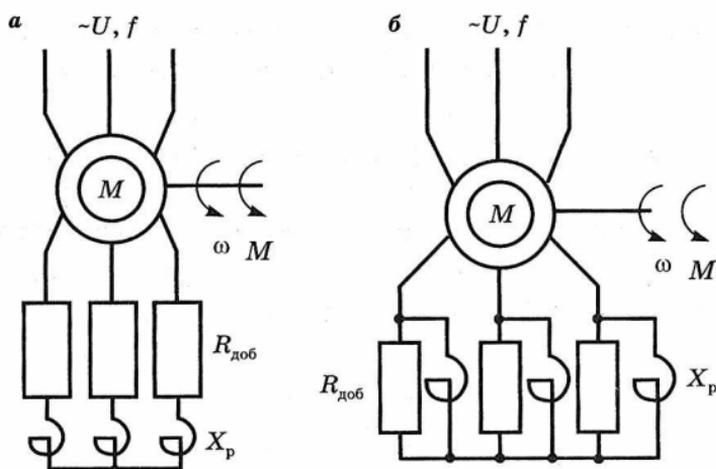
С увеличением скольжения возрастают потери мощности в роторной цепи, поэтому реализация широкого диапазона варьирования скорости приводит к большим потерям энергии и снижению КПД электропривода.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить постоянство пускового момента двигателя и одновременно ограничить ток короткого замыкания, в цепь ротора вместо активного вводят индуктивное сопротивление, подключаемое либо последовательно, либо параллельно.

В момент пуска, когда скорость двигателя незначительна, частота тока в роторе равна частоте сети. Индуктивное сопротивление реактора велико, а пусковой ток мал. По мере разгона электропривода частота тока и ЭДС ротора уменьшаются, что вызывает снижение индуктивного сопротивления реактора и сопровождается менее интенсивным, чем это имеет место при включении в ротор только активного сопротивления, уменьшением тока.

Подключая в обмотку ротора соединенные последовательно и параллельно активные и реактивные сопротивления (рис. 3.10), можно получить перераспределение тока в ветвях цепи ротора и разнообразный вид характеристик.

Расчет критического момента на искусственной механической характеристике для последовательно подклю-



**Рис. 3.10**

Схемы запуска асинхронного двигателя при наличии дополнительных индуктивного и активного сопротивлений в цепи якоря:

*а* — последовательное соединение; *б* — параллельное подключение.

ченных активных и индуктивных сопротивлений в цепи ротора выполняется по выражению

$$M_{ки} = M_{ке} \frac{\sqrt{R_1^2 + X_k^2} + R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_k + X_p)^2} + R_1}, \quad (3.20)$$

где  $M_{ке}$  — критический электромагнитный момент на естественной механической характеристике;  $X_p$  — индуктивное сопротивление реактора, приведенное к первичной обмотке.

Приведенный ток ротора в результате последовательного подключения реактора и активного сопротивления в фазу обмотки ротора рассчитывается из уравнения

$$I'_{2и} = \frac{U_\phi}{\left( R_1 + \frac{R'_2 + R'_{доб} + R'_p}{S} \right)^2 + (X_k + X'_p)^2}, \quad (3.21)$$

где  $R'_{доб}$  — активное сопротивление добавочного резистора, приведенное к первичной обмотке;  $R'_p$  — активное сопротивление реактора, приведенное к первичной обмотке АД.

Электромагнитный момент находится из уравнения

$$M_{\text{и}} = \frac{2M_{\text{ки}}(1 + \varepsilon_{\text{и}})}{\frac{S_{\text{и}}}{S_{\text{ки}}} + \frac{S_{\text{ки}}}{S_{\text{и}}} + 2\varepsilon_{\text{и}}}. \quad (3.22)$$

Критическое скольжение и величина  $\varepsilon$  рассчитываются:

$$S_{\text{ки}} = \frac{R'_2 + R'_{\text{доб}} + R'_p}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\text{к}} + X'_p)^2}}; \quad (3.23)$$

$$\varepsilon_{\text{и}} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\text{к}} + X'_p)^2}}. \quad (3.24)$$

Когда активные и реактивные сопротивления подключаются параллельно в фазах обмотки ротора, приведенный ток рассчитывается по уравнению

$$I'_{2\text{и}} = \frac{U_{\Phi}}{\left(R_1 + \frac{R'_{2\text{экв}}}{S}\right)^2 + (X_{\text{к}} + X'_{2\text{экв}})^2}, \quad (3.25)$$

где  $R'_{2\text{экв}}$  — эквивалентное активное сопротивление фазы ротора;  $X'_{2\text{экв}}$  — эквивалентное реактивное сопротивление фазы ротора.

На рисунке 3.11 приведены электромеханические и механические характеристики асинхронного двигателя с различными сопротивлениями в цепи ротора.

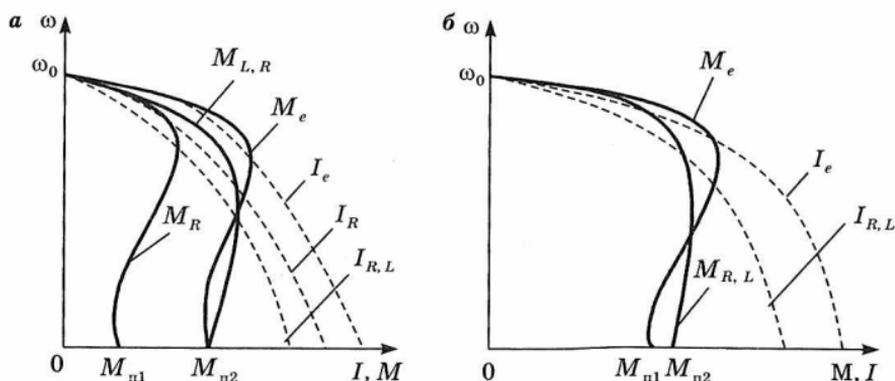


Рис. 3.11

Электромеханические и механические характеристики АД с фазным ротором при последовательном (а), параллельном (б) соединении добавочных активных и индуктивных сопротивлений в сравнении с естественной характеристикой

Момент, развиваемый двигателем, может быть вычислен по формуле

$$M = \frac{mI_2'^2 R_{2\text{ЭКВ}}}{\omega_0 S}. \quad (3.26)$$

Наличие последовательно и параллельно включенных сопротивлений в цепи ротора позволяет регулировать обороты вращения электропривода, ограничивать пусковой ток и получать практически постоянное значение электромагнитного момента в процессе запуска.

**Частотное регулирование угловой скорости вращения электропривода с асинхронным двигателем** в настоящее время широко применяется, так как позволяет в широком интервале плавно изменять обороты вращения ротора как выше, так и ниже номинальных значений.

Преобразователи частоты являются современными, высокотехнологичными устройствами, обладающими большим диапазоном регулирования, имеющими обширный набор функций для управления асинхронными двигателями. Высочайшее качество и надежность дают возможность применять их в различных отраслях, в том числе и в сельскохозяйственном производстве для управления приводами насосов, вентиляторов, транспортеров и т. д.

Частотные преобразователи по напряжению питания подразделяются на однофазные и трехфазные, а по конструктивному исполнению на электромашинные вращающиеся и статические. В электромашинных преобразователях переменная частота получается за счет использования обычных или специальных электрических машин. В статических ПЧ изменение частоты питающего тока достигается за счет применения не имеющих движения электрических элементов, таких как полупроводниковые приборы, реакторы, конденсаторы и т. д.

Преобразователи частоты для однофазной сети позволяют обеспечить электропривод производственного оборудования мощностью до 7,5 кВт. Особенностью конструкции современных однофазных преобразователей является то, что на входе имеется одна фаза с напряжением 220 В, а на выходе — три фазы с тем же значением напряжения,

что позволяет подключать к устройству трехфазные электродвигатели без применения конденсаторов.

Преобразователи частоты с питанием от трехфазной сети 380 В выпускаются в диапазоне мощностей от 0,75 до 630 кВт. В зависимости от величины мощности устройства изготавливаются в полимерных комбинированных и металлических корпусах.

Исходя из вида нагрузки на выходе преобразователи частоты подразделяются по типу исполнения:  $F$  — применяется для насосного и вентиляторного привода;  $G$  — используется для общепромышленного электропривода;  $H$  — эксплуатируется в составе электродвигателей, работающих с перегрузкой.

Современные преобразователи частоты обладают разнообразным набором функциональных особенностей, например имеют ручное и автоматическое управление скоростью и направлением вращения двигателя, а также встроенный потенциометр на панели управления; наделены возможностью регулирования диапазона выходных частот от 0 до 800 Гц. Преобразователи способны выполнять автоматическое управление АД по сигналам с периферийных датчиков и приводить в действие электропривод по заданному временному алгоритму. Поддерживать функции автоматического восстановления режима работы при кратковременном прерывании питания. Выполнять управление переходными процессами с удаленного пульта и осуществлять защиту электродвигателей от перегрузок.

Связь между угловой скоростью вращения и частотой питающего тока вытекает из уравнения

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (3.27)$$

где  $f_1$  — частота питающего тока;  $p$  — количество пар полюсов электродвигателя.

Для получения высоких энергетических показателей работы асинхронного короткозамкнутого двигателя одновременно с частотой питающего тока  $f_1$  необходимо изменять и подводимое напряжение  $U_1$ .

Рациональный закон регулирования напряжения зависит от характера момента сопротивления.

При постоянном моменте статической нагрузки ( $M_c = \text{const}$ ) напряжение должно регулироваться пропорционально его частоте:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const.} \quad (3.28)$$

Для вентиляторного характера нагрузки соотношение принимает вид

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const.} \quad (3.29)$$

При моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const.} \quad (3.30)$$

На рисунке 3.12 представлены упрощенная схема подключения и механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании угловой скорости.

Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя позволяет изменять угловую скорость вращения в диапазоне 20–30 : 1. Регулирование скорости АД вниз от основной осуществляется практически до нуля. При увеличении оборотов вращения двигателя выше указанного значения в его паспорте частота источника питания не должна превышать номинальную более чем 1,5–2 раза. Указанное ограничение связано с прочностью крепления обмотки ротора.

Частотный способ является наиболее перспективным для регулирования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Потери мощности при таком регулировании невелики, поскольку не сопровождаются увеличением скольжения. Получаемые при этом механические характеристики обладают высокой жесткостью.

Регулирование оборотов вращения асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов выполняется только

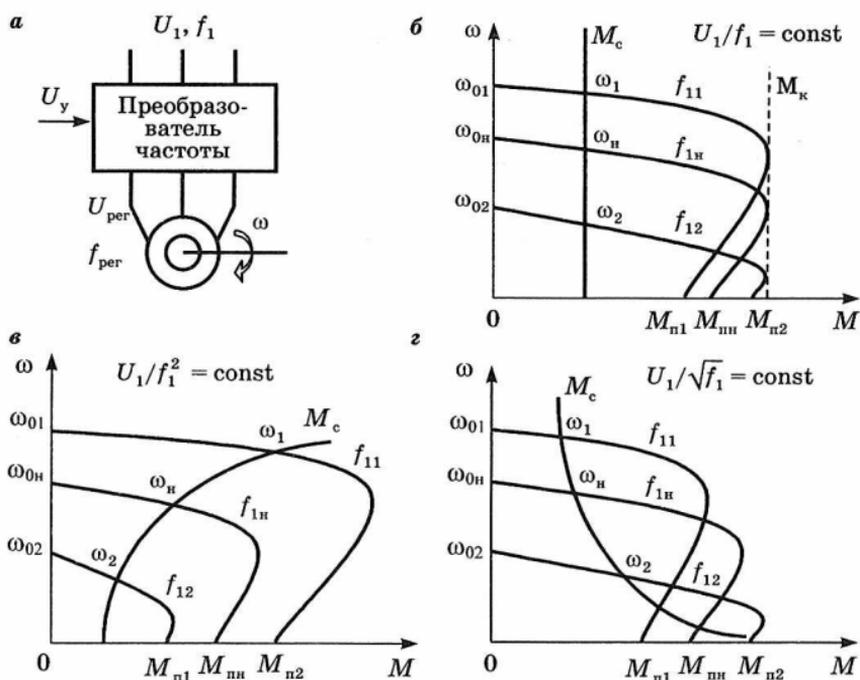


Рис. 3.12

Механические характеристики асинхронного электродвигателя при частотном регулировании скорости:

*а* — схема подключения; *б* — характеристики для нагрузки с постоянным статическим моментом сопротивления; *в* — характеристики для нагрузки вентиляторного характера; *г* — характеристики при статическом моменте нагрузки, обратно пропорциональном угловой скорости вращения.

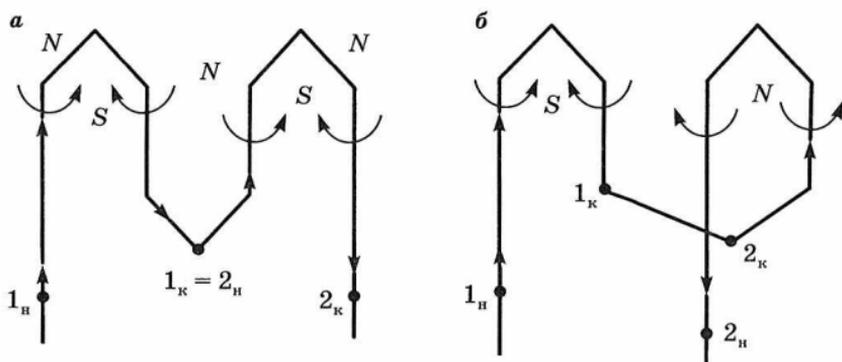


Рис. 3.13

Схемы соединения секций одной фазы статорной обмотки АД:

*а* — последовательность соединения начал и концов при  $p = 2$ ; *б* — последовательность соединения начал и концов, когда  $p = 1$ .

с использованием специальных электрических машин, получивших название многоскоростных. Электродвигатели имеют две одинаковые секции (катушки) статорной обмотки, приходящиеся на одну пару полюсов. В трехфазных двигателях одной паре полюсов соответствуют три катушки обмотки статора, двум парам полюсов — шесть катушек и т. д.

Варьирование числа пар полюсов обычно осуществляется в результате последовательно-параллельного переключения катушек каждой фазы, при этом изменяется скорость вращения магнитного поля  $\omega_0$  и обороты вращения ротора АД.

Процесс регулирования угловой скорости вращения вытекает из выражения

$$\omega = \omega_0 (1 - S) = \frac{2\pi f_1 (1 - S)}{p}, \quad (3.31)$$

где  $p$  — число пар полюсов.

Число пар полюсов может принимать только дискретные значения, например  $p = 1, 2, 3, 4, \dots, n$ , что приводит к ступенчатому регулированию скорости электродвигателя.

Наиболее распространенными в промышленности и сельскохозяйственном производстве являются двигатели с двумя ступенями скорости: 1500 и 750 мин<sup>-1</sup>.

Электрические машины с четырьмя и более ступенями угловой скорости вращения в агропромышленном комплексе встречаются очень редко, поскольку они дороги и обладают ухудшенными массогабаритными показателями из-за наличия на статоре двух независимых обмоток.

Чаще всего переключение полюсов осуществляется изменением направления тока в отдельных половинах фазной обмотки (рис. 3.13).

Статорная обмотка (рис. 3.13а) состоит из двух одинаковых секций  $1_n - 1_k$ ,  $2_n - 2_k$ . Каждая катушка содержит проводники, соединенные последовательно и согласно. Ток, протекающий по полуобмоткам, направлен в одну сторону. По правилу буравчика определяются направления магнитных силовых линий, которые показаны стрелками на соответствующем рисунке.

Магнитное поле статора образовано четырьмя полюсами ( $p = 2$ ).

Снижение числа пар полюсов достигается за счет изменения схемы соединения катушечных групп. Включая катушки последовательно и встречно, как показано на рисунке 3.13б, и, сохраняя при этом прежнее направление подводимого к обмотке тока, добиваются образования магнитного поля статора с вдвое меньшим числом пар полюсов ( $p = 1$ ).

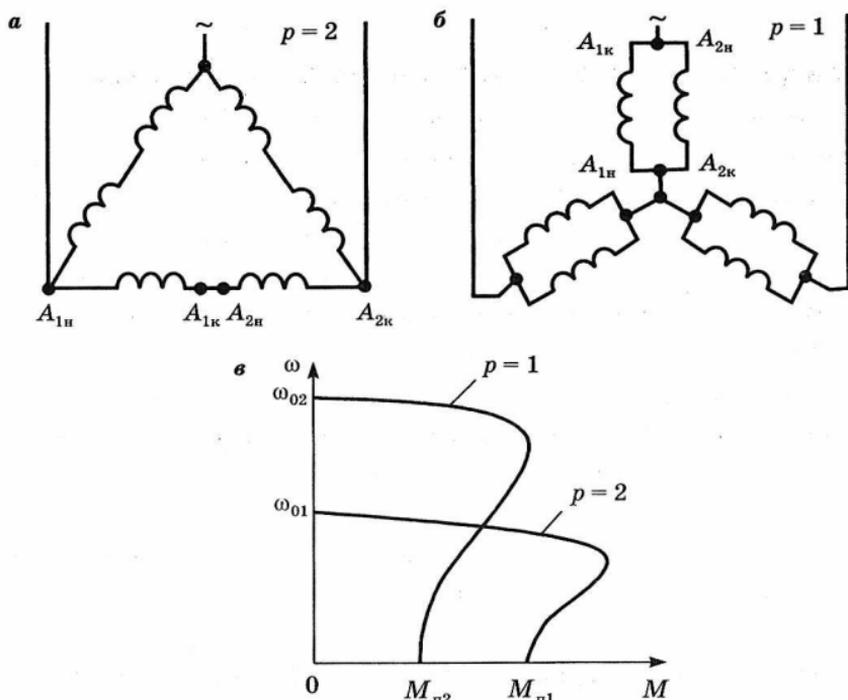
Наиболее часто применяются две схемы переключения статорных обмоток многоскоростного АД с короткозамкнутым ротором — с **треугольника на двойную звезду** и **звезды на двойную звезду**. Предлагаемые схемы соединения статорных обмоток и механические характеристики представлены на рисунке 3.14.

Схема «треугольник — двойная звезда» применяется для получения большего числа пар полюсов. Шесть секций трехфазной статорной обмотки соединяются последовательно и согласно, например для фазы  $A$  маркировка выглядит следующим образом:  $A_{1н}$  и  $A_{2н}$  — начало фазы;  $A_{1к}$  и  $A_{2к}$  — концы фазы (рис. 3.14а).

Переключение обмоток рекомендуется производить или при полной остановке двигателя, или когда электропривод работает в режиме холостого хода.

Соединение «звезда — двойная звезда» используется, когда необходимо уменьшить угловую скорость вращения ротора. В этом случае низким оборотам вращения АД, например  $500 \text{ мин}^{-1}$ , соответствует схема соединения шести катушек в одинарную звезду,  $p = 2$  (каждую фазу образуют последовательно соединенные две секции, рисунок 3.15а). В процессе переключения статорной обмотки со звезды на двойную звезду (рис. 3.14б) и переходе электродвигателя на более высокую угловую скорость вращения ротора  $1000 \text{ мин}^{-1}$  количество пар полюсов уменьшается вдвое,  $p = 1$ . Механические характеристики для двухскоростного двигателя представлены на рисунке 3.15б.

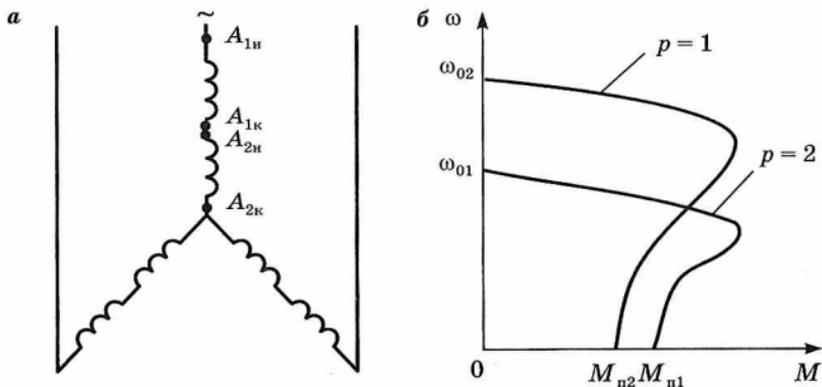
Диапазон регулирования многоскоростных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором находится в пределах  $6 : 1$ , что соответствует угловым ско-



**Рис. 3.14**

Схемы соединения обмоток и характеристики асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором:

*a* — соединение секций статора по схеме «треугольник»; *б* — соединение катушек по схеме «двойная звезда»; *в* — механические характеристики двухскоростного двигателя, имеющего разные значения числа полюсов.



**Рис. 3.15**

Схема соединений секций фаз АД и механические характеристики:

*a* — подключение шести статорных полуобмоток по схеме «звезда», *б* — механические характеристики двухскоростного асинхронного электродвигателя.

ростам  $3000\text{--}500\text{ мин}^{-1}$ . Механические характеристики полюсопереключаемых АД отличаются хорошей жесткостью и достаточной перегрузочной способностью.

Схему переключения «звезда — двойная звезда» рекомендуется применять, когда статический момент нагрузки на выходном валу двигателя постоянен, а схему «треугольник — двойная звезда» следует использовать при нагрузке электрического привода, имеющей характер постоянной мощности.

**Импульсное регулирование угловой скорости вращения асинхронных электродвигателей** осуществляется за счет изменения амплитудно-фазовых характеристик напряжения питания в цепях обмоток статора и ротора. На рисунке 3.16 даны упрощенная схема подключения и механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.

Принцип работы рассматриваемой схемы следующий. Контакт  $S$  замыкается и размыкается с определенной очередностью — скважностью. Когда ключ замкнут, электропривод на основе двигателя с фазным ротором работает на естественной механической характеристике, обозначенной цифрой 1 на рисунке 3.16б. Если ключ разомкнут, двигатель переходит на реостатную характеристику 3.

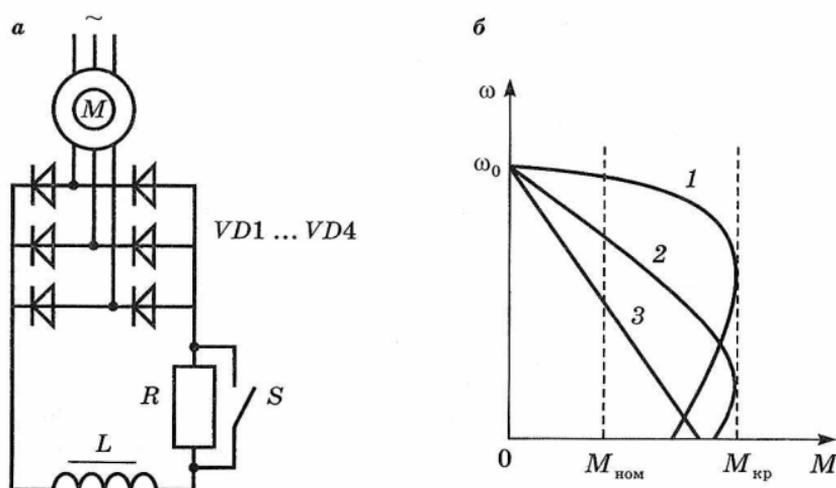


Рис. 3.16

Схема подключения формирователя импульсного напряжения (а) и механические характеристики (б) АД с фазным ротором

Уменьшая значение сопротивления  $R$  в электрической цепи обмотки ротора, можно получить промежуточную механическую характеристику 2. Рабочая зона регулирования располагается между двумя крайними функциональными зависимостями, 1–3. Очень часто шунтирование резистора  $R$  выполняется с помощью тиристорного ключа.

Способ регулирования является неэкономичным, так как ввод в фазы ротора добавочного сопротивления приводит к дополнительным потерям мощности, которая выделяется в виде тепловой энергии на резисторе вне корпуса электрической машины. Дроссель  $L$  предназначен для сглаживания пульсаций высших гармоник и приближения формы импульсов тока в роторе к синусоидальному виду.

Предлагаемый способ регулирования с использованием достаточно простых и дешевых технических средств обеспечивает в широком диапазоне плавное регулирование угловой скорости вращения и неизменную перегрузочную способность АД. Номинальный электромагнитный момент двигателя уменьшается по мере увеличения величины добавочного сопротивления  $R$ .

**Регулирование оборотов вращения асинхронного короткозамкнутого двигателя с помощью электромагнитной муфты скольжения**, связывающей электропривод и рабочую машину, например, крыльчатку вентилятора или рабочий орган центробежного насоса, выполняется на основе изменения величины электромагнитного потока.

Конструктивно муфта состоит из двух механических не контактирующих между собой частей: якоря 1, выполненного из ферромагнитного материала и соединенного с валом электродвигателя, и индуктора 2, в продольные пазы которого закладывается обмотка возбуждения 3, подключаемая к контактными кольцам 4 (см. рис. 3.17). Между якорем и индуктором имеется воздушный зазор. Якорь электромагнитной муфты вращается с такой же скоростью, как и ротор двигателя. При отсутствии тока на контактных кольцах индуктор неподвижен. Когда по катушке возбуждения электромагнитной муфты протекает ток,

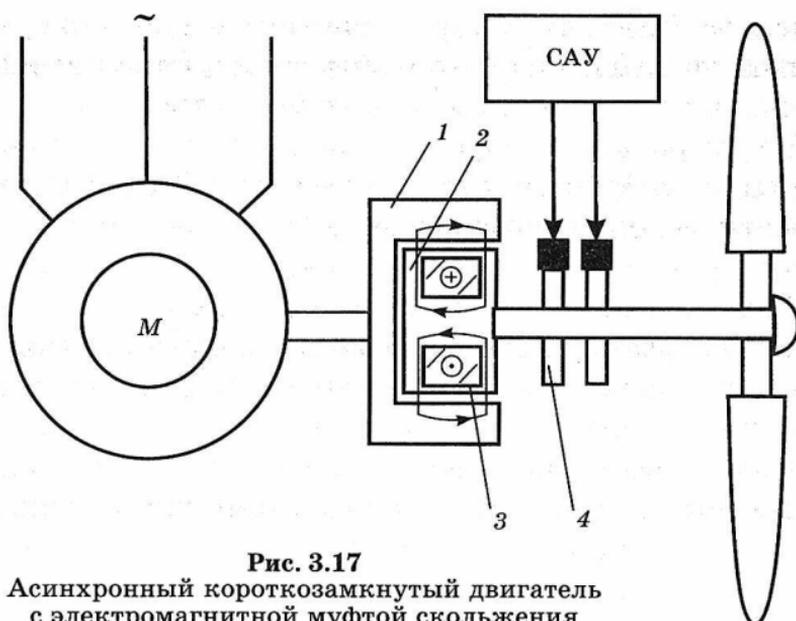


Рис. 3.17

Асинхронный короткозамкнутый двигатель с электромагнитной муфтой скольжения

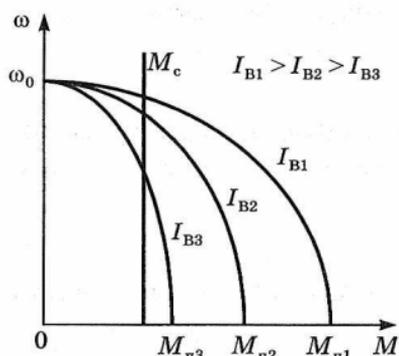


Рис. 3.18

Механические характеристики электромагнитной муфты

то силовые линии возникающего магнитного потока замыкаются через магнитопровод индуктора, воздушный промежуток и сечение якоря, в результате возникает радиальная сила, которая и создает вращающий электромагнитный момент. Ведомая часть муфты приходит в круговое движение и вовлекает нагрузочную машину в работу.

При одном и том же токе возбуждения с возрастанием оборотов вращения индуктора момент, передаваемый муфтой, уменьшается. С ростом тока возбуждения и постоянном моменте сопротивления на выходном валу муфты угловая скорость вращения индуктора возрастает.

Механические характеристики электропривода с электромагнитной муфтой скольжения представлены на ри-

сунке 3.18. Из анализа характеристик следует, что с уменьшением тока возбуждения муфты снижаются пусковой и номинальный электромагнитные моменты.

Регулирование оборотов вращения электропривода выполняется 8 : 1 вниз от номинальных. Перепад угловой скорости не должен быть более 15% .

В современных приводах большое применение находят фрикционные муфты с дистанционным управлением. Фрикционные пары в электромагнитных муфтах сцепляются под действием магнитного притяжения между деталями, находящимися на ведущих и ведомых частях привода. Притяжение возникает благодаря пропусканию через обмотку электромагнита тока, создающего магнитный поток требуемой величины. Расход электрической энергии на создание магнитного потока составляет 0,1–1% мощности, передаваемой муфтой. Сцепные муфты допускают реверсирование с промежутком времени до 0,2 с, а также частые остановки и запуски привода.

Достоинством этих муфт является то, что они позволяют ведомую часть привода включать с различной плавностью, необходимой для разгона электропривода.

Если необходимо обеспечить высокую плавность переходных процессов во время вращательного движения нагрузки и широкий диапазон регулирования угловой частоты вращения, то выбирают порошковые электромагнитные муфты.

### **3.4. ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Для торможения электропривода, созданного на основе асинхронных электрических машин, используются три основных способа:

- генераторное торможение с отдачей электрической энергии в сеть;
- режим противовключения;
- динамическое торможение с выделением электроэнергии на отдельном сопротивлении.

Перечисленные способы применимы к электроприводу как на основе асинхронного электродвигателя с фазным ротором, так и на базе двигателя с короткозамкнутой обмоткой.

**Генераторное торможение** в лабораторных условиях получается, когда с помощью первичного двигателя ротор АД вращается со скоростью, превосходящей синхронную. В режиме рекуперативного торможения проводники обмотки статора пересекаются вращающимся магнитным полем в одном направлении, а проводники ротора — в противоположном. ЭДС ротора по сравнению с двигательным режимом работы меняет свой знак на обратный.



Рис. 3.19

Механические характеристики АД в двигательном и генераторном режимах работы

Механические характеристики асинхронного электродвигателя представлены на рисунке 3.19.

При  $\omega > \omega_0$  двигатель работает в режиме генератора параллельно с сетью и отдает электрическую энергию в сеть, потребляя при этом реактивную мощность для возбуждения.

В производственных условиях генераторное торможение используется в подъемно-транспортных машинах для спуска тяжелых грузов. Под действием силы тяжести опускаемого груза выходной вал электропривода вращается с угловой скоростью  $\omega > \omega_0$ . Электрическая машина переходит в генераторный режим и начинает создавать тормозной момент. В точке равенства электромагнитного и статического момента сопротивления груз опускается с установившейся скоростью вращения ротора.

Рекуперативное торможение может возникнуть, например, в момент перехода двухскоростного АД с высокой скорости на низкую (рис. 3.20).

Предположим, что в первоначальный период времени электропривод работал на естественной механической характеристике  $I$ , в точке  $a$ , вращаясь с угловой скоростью  $\omega_{1уст}$ . В момент увеличения числа пар полюсов элек-

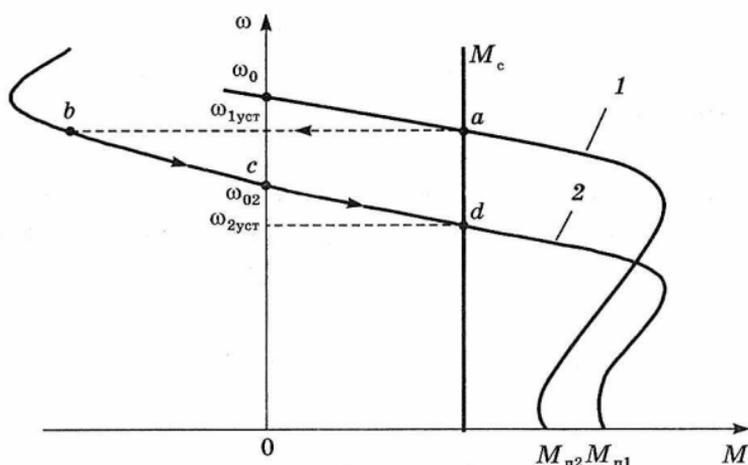


Рис. 3.20

Механические характеристики асинхронной машины в режиме генераторного торможения

тродвигатель под действием сил инерции всех крутящихся частей переходит без изменения скорости на искусственную механическую характеристику 2, в точку *b*. Возникает тормозной момент, под действием которого обороты ротора начинают падать, ток, магнитный поток и электромагнитный момент возрастают до тех пор, пока электропривод не перейдет в новое установившееся состояние (точка *d*), которое характеризуется меньшей угловой частотой вращения  $\omega_{2уст}$  и равенством нового статического момента сопротивления нагрузки и электромагнитного момента двигателя.

**Торможение противовключением** происходит при изменении чередования фаз напряжения, подводимого к обмоткам статора, или когда исполнительный механизм вращает ротор двигателя в сторону, обратную действию электромагнитного момента.

У асинхронного электродвигателя в режиме противовключения выходной вал крутится в направлении обратном направлению вращения электромагнитного поля статора. Допустим, что АД работает на естественной механической характеристике 1, в точке *a* (см. рис. 3.21).

При переключении двух фаз, например *A* и *B*, работа электропривода переходит в точку *b*, которая лежит на искусственной механической характеристике, обозначенной

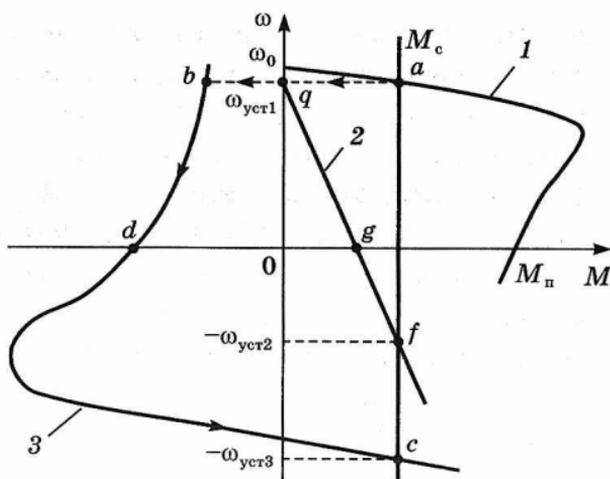


Рис. 3.21

Механические характеристики электропривода в режиме противовключения

цифрой 3. На отрезке  $[b, d]$  начинается режим торможения противовключением, который приводит к спаданию оборотов вращения ротора до нуля. Если в точке  $d$  электропривод не отключается от сети, то ротор меняет свое направление вращения на противоположное, и возобновляется процесс разгона. Угловая скорость будет расти до тех пор, пока не сравняются статический момент сопротивления и электромагнитный момент (точка  $c$ ). Новому установившемуся режиму работы электропривода соответствует  $-\omega_{уст3} = \omega_{уст1}$ . Для ограничения тока и электромагнитного момента в переходном режиме в электрические цепи обмотки статора и ротора устанавливаются ограничительные резисторы.

Реализация второго возможного режима противовключения происходит следующим образом. Если необходимо выполнить спуск груза крановым механизмом, обеспечивая его торможение с помощью асинхронного двигателя, то для этой цели АД включается на подъем с большим добавочным сопротивлением в цепи ротора. В результате резкого превышения статического момента сопротивления груза над электромагнитным моментом двигателя работа привода переходит из точки  $a$  (рис. 3.21) в точку  $q$ , обозначенную на искусственной характеристике 2. Вращение

ротора постепенно замедляется из-за возникающего тормозного момента. В точке  $g$  обороты спадают до нуля, и если не произойдет отключение двигателя от сети, то ротор меняет направление вращения на противоположное и разгоняется до точки  $f$ , которой соответствуют  $-\omega_{уст2}$ . В точке  $f$  наступает очередное равновесие системы «электродвигатель — рабочая машина».

**Динамическое торможение** с независимым возбуждением статора постоянным током осуществляется в момент отключения обмотки статора от сети и замыкание ее на клеммы источника постоянного тока или на выходные концы конденсаторной батареи. В первом случае имеет место режим динамического торможения с независимым возбуждением, во втором — с самовозбуждением.

В режиме независимого возбуждения обмотка статора отключается от сети трехфазного тока и подключается к источнику постоянного тока. Постоянный ток, протекающий по обмоткам статора, создает неподвижный в пространстве магнитный поток. В процессе вращения ротора магнитный поток индуктирует в его обмотках ЭДС. Наведенная электродвижущая сила вызывает появление тока. Взаимодействие неподвижного магнитного потока с током ротора приводит к появлению тормозного момента. Асинхронный двигатель, входящий в состав электропривода, работает как синхронный генератор с неявно выраженными полюсами. Нагрузкой генератора служат сопротивления, включаемые в цепь ротора двигателя с фазным ротором или короткозамкнутая обмотка, если эксплуатируется электрическая машина с обмоткой, выполненной в виде беличьей клетки. Симметричное включение трех обмоток статора в сеть постоянного тока невозможно без их переключения. С целью уменьшения коммутационной аппаратуры и упрощения систем управления на практике применяется одна из приведенных на рисунке 3.22 схем.

В качестве источника постоянного тока для двигателей малой и средней мощности используются полупроводниковые выпрямители с понижающим трансформатором, для крупных электрических машин разработаны специальные генераторы постоянного тока низкого напряжения.

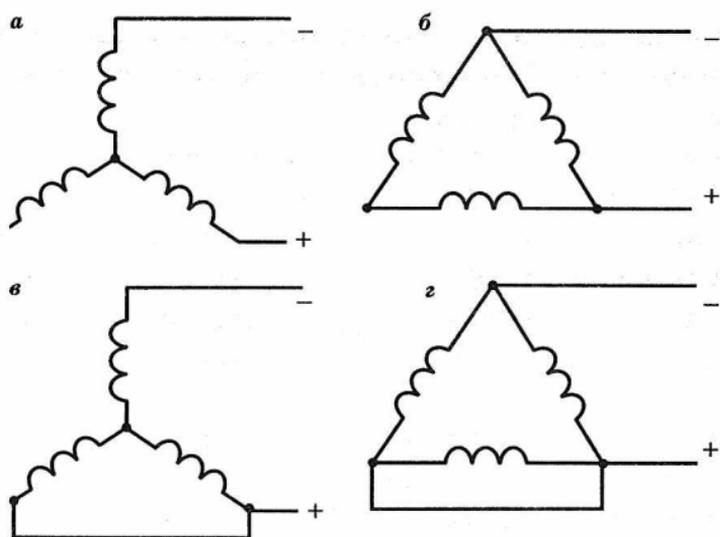


Рис. 3.22

Варианты схем питания статора асинхронного двигателя постоянным током при электродинамическом торможении

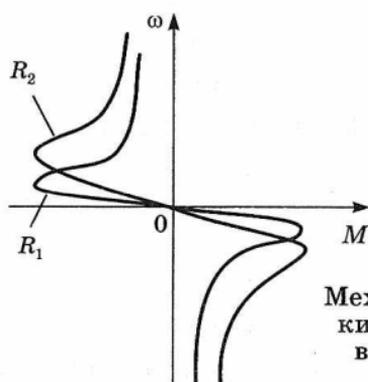


Рис. 3.23

Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

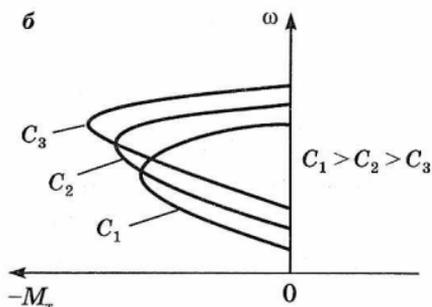
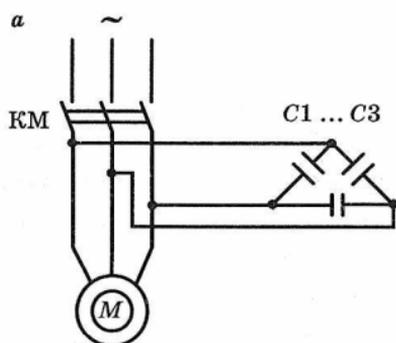


Рис. 3.24

Схема подключения (а) и механические характеристики (б) АД в режиме динамического торможения с самовозбуждением

Вид механической характеристики определяется зависимостью активной составляющей тока короткого замыкания от скорости вращения.

На рисунке 3.23 изображены механические характеристики работы АД в режиме динамического торможения для двух различных добавочных сопротивлений в цепи ротора.

Критический момент рассчитывается из выражения

$$M_{\kappa} = \frac{mI_1^2 X_{\mu}^2}{2\omega(X_{\mu} + X_2')} \quad (3.32)$$

Ток статора эквивалентной схемы вычисляется по уравнению

$$I_1 = \sqrt{\frac{2\omega M_{\kappa} (X_{\mu} + X_2')}{mX_{\mu}^2}} \quad (3.33)$$

Работа электропривода в процессе динамического торможения существенно отличается от эксплуатации его в двигательном режиме. При динамическом торможении результирующий магнитный поток неподвижен, а в двигательном режиме он вращается в пространстве с синхронной скоростью. Ток статора в двигательном режиме изменяется в функции скольжения, в режиме противовключения ток неизменен. В период динамического торможения, когда электродвигатель работает на малых угловых скоростях вращения, магнитный поток увеличивается. Рост магнитного потока происходит из-за снижения размагничивающего действия реакции ротора. В двигательном режиме работы результирующий магнитный поток остается постоянным, и все механические характеристики начинаются в точке, соответствующей синхронной скорости, а при динамическом торможении — выходят из точки режима короткого замыкания.

Динамическое торможение асинхронных двигателей широко используется в практике привода различного вида подъемников и подъемно-транспортных механизмов.

**Торможение с самовозбуждением (конденсаторное)** применяется в приводах с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. К обмотке статора подключаются конденсаторы по схеме, представленной на рисунке 3.24.

В рассматриваемом режиме электрическая машина работает самовозбужденным асинхронным генератором. Толчок для самовозбуждения после отключения двигателя от сети создает ЭДС, индуктируемая в обмотках статора вращающимся ротором за счет остаточного в нем намагничивания.

ЭДС остаточного намагничивания, приложенная к конденсаторам, обуславливает течение емкостного тока по обмоткам статора. Возникающий ток создает в генераторе вращающее магнитное поле, которое увеличивает ЭДС и напряжение на зажимах статора. Напряжение на конденсаторах повышается до максимума и вызывает рост тока, протекающего через конденсаторы, что приводит к самовозбуждению асинхронного генератора и резкому снижению оборотов вращения.

Обороты ротора, при которых прекращается процесс самовозбуждения:

$$n = n_0 \left( 1 + \frac{R}{R_1} \right) \sqrt{\frac{X_c}{X_1 + X_2'}}. \quad (3.34)$$

За счет энергии магнитного поля можно обеспечить самовозбуждение электрической машины и реализовать тормозной момент, который возникает лишь при условии  $n > (0,3-0,5) n_0$ , однако следует учесть, что на малых частотах вращения необходимо подключать большие емкости.

Конденсаторы могут присоединяться к статору АД постоянно или с помощью дополнительного контактора, будучи при этом соединенными по схеме «треугольник» или «звезда».

Достоинство данного вида торможения заключается в отсутствии внешнего источника энергии.

Недостатками являются: срыв электромагнитного момента при скоростях, превышающих критические обороты вращения; необходимость большой емкости конденсаторов для обеспечения тормозного эффекта, когда электропривод работает на пониженных угловых скоростях вращения.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какой из асинхронных электродвигателей наиболее часто эксплуатируется в составе электроприводов сельскохозяйственных машин и почему?
2. В каких режимах могут работать электрические приводы, изготовленные на базе асинхронных двигателей?
3. На основании какой схемы замещения выводятся уравнения механической и электромеханической характеристик?
4. Чем отличается искусственная механическая характеристика АД от естественной?
5. Перечислите способы регулирования угловой скорости вращения асинхронных электродвигателей.
6. Для какой цели используются тормозные режимы работы электроприводов с АД?
7. Какими способами можно регулировать обороты вращения электропривода на основе АД с короткозамкнутым ротором?
8. С помощью каких электрических элементов регулируют угловую скорость вращения АД с фазным ротором?
9. Для какой цели в асинхронном электроприводе применяют муфты скольжения?
10. Как характер нагрузки влияет на рациональный закон регулирования напряжения частотного преобразователя?

# ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

## 4.1. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Р**абота электропривода периодически сопровождается изменением скорости вследствие ускорения или замедления движения рабочих органов нагрузочных машин. Броски скорости вызываются рядом производственных причин, например колебаниями механической нагрузки, включением и отключением тормозных сопротивлений электродвигателя, бросками напряжения питающей сети, реверсированием, частыми запусками и торможениями электропривода.

**Динамическим режимом работы электропривода** называется режим, соответствующий переходу от одной установившейся угловой скорости вращения ротора или якоря электрического двигателя к другой.

Обычно переходный режим характеризуется скачками ЭДС, силы тока, электромагнитного момента и оборотов вращения двигателя.

Исследование характера движения рабочей машины и, следовательно, электрического привода может быть произведено на основе решения уравнений движения.

Уравнение движения может быть выведено из второго закона Ньютона или с помощью рассмотрения энергетического баланса системы «электродвигатель — рабочая машина».

В более общей форме возможно получить решение, основываясь на уравнении баланса мощностей.

Выражение для динамической мощности записывается в следующем виде:

$$P_d - P_c = P_{\text{дин}}, \quad (4.1)$$

где  $P_d$  — мощность, затрачиваемая на создание полезной работы;  $P_c$  — мощность, затрачиваемая на преодоление усилий сопротивления;  $P_{\text{дин}}$  — динамическая мощность, характеризующая изменение кинетической энергии подвижной системы.

Вывод уравнения движения начинается с определения выражения для нахождения запаса кинетической энергии системы:

$$A_n = J \frac{\omega^2}{2}, \quad (4.2)$$

где  $J$  — момент инерции системы.

Динамическая мощность, входящая в уравнение (4.1), вычисляется по формуле

$$P_{\text{дин}} = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}, \quad (4.3)$$

где  $t$  — время протекания переходного процесса.

Подставляя выражение (4.3) в уравнение (4.1), получим

$$P_d - P_c = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (4.4)$$

Разделив обе части формулы (4.4) на угловую скорость вращения  $\omega$  и сделав ряд преобразований, можно найти уравнение моментов

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (4.5)$$

По аналогии с (4.1) правая часть полученного выражения (4.5) называется динамическим моментом, и уравнение записывается в следующем виде:

$$M_d - M_c = M_{\text{дин}}. \quad (4.6)$$

Баланс моментов (4.6) представляет собой общий вид уравнения движения электропривода вращательного действия.

В развернутом виде динамический момент находится так:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}, \quad (4.7)$$

где  $\alpha$  — угол поворота рабочего органа нагрузочной машины.

В практике электропривода системы с переменным моментом инерции встречаются редко. Большинство рабочих машин имеют постоянный момент инерции  $J = \text{const}$ . Исходя из этого уравнение (4.5) приводится к виду

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.8)$$

Равенство (4.8) обычно характеризует угловую скорость вращения электродвигателя, но может быть отнесено и к расчету ускорения или изменению скорости любого звена исполнительного механизма.

Вращающий электромагнитный момент двигателя имеет положительное значение, если он совпадает по направлению с вращением выходного вала, и отрицательное — когда действует в противоположную сторону вращения.

Под статическим моментом сопротивления исполнительного механизма понимается момент на валу, обусловленный силами полезных и вредных сопротивлений. В зависимости от вида производственного процесса и свойств рабочей машины в динамическом режиме он может оставаться постоянным или изменяться в функции скорости пути, времени и т. д.

В большинстве случаев работы электропривода статический момент сопротивления нагрузки препятствует движению, однако при определенных условиях он может способствовать ему.

В зависимости от направления действия статические моменты сопротивления разделяются на: реактивные и потенциальные — активные.

Графики реактивных и потенциальных моментов представлены на рисунке 4.1.

Реактивные моменты сопротивления нагрузочной машины всегда направлены встречно действию электромагнитного момента двигателя. Например, статические моменты сопротивления, возникающие в результате действия сил трения, препятствуют вращению электропривода и создают тормозной момент. Кроме того, реактивные моменты во время реверса рабочего органа исполнительного механизма меняют свой знак на противоположный.

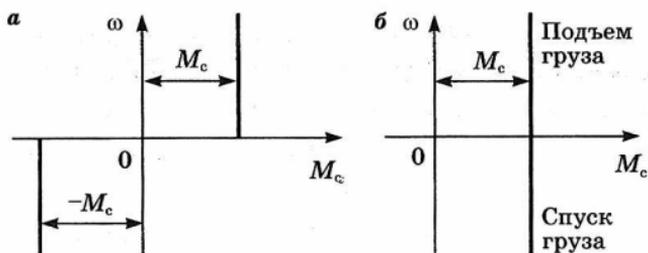


Рис. 4.1

Графики статических моментов сопротивления:

*а* — зависимость потенциального момента от направления вращения вала двигателя; *б* — зависимость реактивного момента сопротивления от направления вращения вала двигателя.

Активные моменты сопротивления сохраняют тенденцию своего действия в процессе изменения направления вращения рабочего органа и, следовательно, при одной направленности будут противодействовать движению, а при другой — способствовать ему.

В общем виде уравнение движения электропривода может быть записано как

$$\pm M_{\text{д}} \pm M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.9)$$

Динамический момент, обусловленный моментом инерции — правая часть уравнения (4.9), проявляется во время переходных режимов работы электропривода. Если электрический привод разгоняется, то действие инерционного момента направлено встречно движению, а при торможении — согласно.

В промышленности и агропромышленном комплексе наряду с динамическими системами вращательного типа имеются нагрузочные машины, у которых рабочий орган передвигается возвратно-поступательно. В этом случае вместо выражения моментов необходимо рассматривать уравнение сил, действующих на систему в процессе ее работы.

Динамическая мощность системы вычисляется по формуле

$$P_{\text{дин}} = m v \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt}, \quad (4.10)$$

где *m* — масса всех подвижных частей системы; *v* — линейная скорость движения рабочего органа.

На прямолинейных участках движения линейная скорость рассчитывается как

$$v = \frac{dL}{dt}, \quad (4.11)$$

где  $L$  — длина прямолинейного участка движения рабочего органа динамической системы.

Подставляя уравнение (4.11) в (4.10), можно переписать математическое выражение для нахождения динамической мощности электропривода:

$$P_{\text{дин}} = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^3}{2} \frac{dm}{dL}. \quad (4.12)$$

Значение динамической силы определяется исходя из формулы

$$F_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{дин}}}{v} = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dL}. \quad (4.13)$$

Уравнение движения будет иметь вид

$$F_{\text{д}} - F_{\text{с}} = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dL}, \quad (4.14)$$

где  $F_{\text{д}}$  — движущая сила;  $F_{\text{с}}$  — усилие статических сопротивлений.

Для большинства электроприводов масса всех подвижных частей является величиной постоянной,  $m = \text{const}$ , тогда уравнение для возвратно-поступательного движения рабочего органа системы следует записать как

$$F_{\text{д}} - F_{\text{с}} = m \frac{dv}{dt}. \quad (4.15)$$

В динамическом режиме электропривода действуют одновременно и взаимосвязано переходные механические, электромагнитные и тепловые процессы.

Если процессы протекают быстро, то изменение теплового состояния ЭП в большинстве случаев не оказывает существенного влияния на другие режимы работы, поэтому часто переходные тепловые процессы не учитываются.

## 4.2. ПРИВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ И УСИЛИЙ

В промышленности и сельскохозяйственном производстве в настоящее время используются механические машины, сконструированные работать на невысоких скоростях вращения ( $100\text{--}300\text{ мин}^{-1}$ ), а электродвигатели, исходя из экономических соображений, изготавливают на более высокие угловые скорости вращения ( $750\text{--}3000\text{ мин}^{-1}$ ). Для сочленения электрических двигателей с нагрузочными агрегатами применяют передаточные механизмы.

На рисунке 4.2 изображен электропривод лебедки, состоящий из электродвигателя, редуктора и рабочей машины в виде вращательного барабана.

В процессе изучения подобной системы необходимо рассмотреть совместное движение как рабочего механизма, так и двигателя, учесть влияние устройств друг на друга и составить уравнения

движения для каждого элемента по отдельности. Данный подход слишком затруднителен и не представляется возможным для сложных кинематических схем.

С целью упрощения математических выкладок в динамическом режиме работы электропривода конструкцию, содержащую электродвигатель, рабочую машину и передаточное устройство, заменяют некоторой простейшей энергосистемой — приведенной системой. Обычно приведенная система состоит из электрического двигателя и рабочего органа нагрузочной машины, совершающего либо вращательное, либо возвратно-поступательное движение.

Для получения приведенной системы все статические и динамические моменты или усилия должны быть пересчитаны таким образом, чтобы сохранились кинетические и движущие свойства исходного устройства.

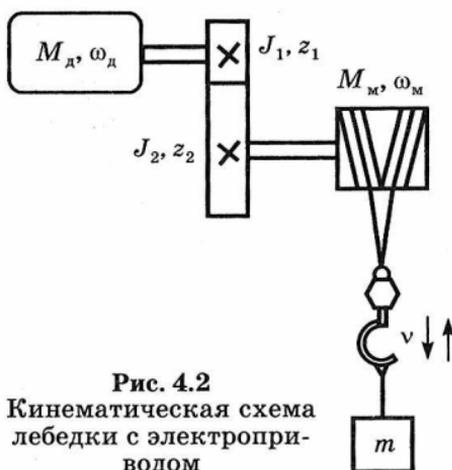


Рис. 4.2  
Кинематическая схема лебедки с электроприводом

Уравнение движения ЭП справедливо только в том случае, если входящие в него моменты или усилия взяты для одной какой-либо скорости. Иначе говоря, моменты должны быть приведены — пересчитаны к одной угловой скорости вращения. Обычно моменты приводят к скорости электродвигателя.

Приведение момента сопротивления исполнительного органа нагрузочной машины через одноступенчатую зубчатую передачу к валу электродвигателя выглядит следующим образом:

$$M_c \omega_d = M_m \omega_m, \quad (4.16)$$

где  $M_c$  — статический момент сопротивления механизма, приведенный к скорости вращения вала электродвигателя;  $M_m$  — статический момент сопротивления на валу нагрузочной машины;  $\omega_d, \omega_m$  — угловые скорости вращения электродвигателя и рабочего механизма.

Из выражения (4.16) приведенный статический момент рассчитывается как

$$M_c = M_m \frac{\omega_m}{\omega_d} = \frac{M_m}{i}, \quad (4.17)$$

где  $i = \frac{\omega_d}{\omega_m}$  — передаточное отношение между угловыми скоростями вращения двигателя и рабочей машиной.

С учетом наличия нескольких промежуточных передач между двигателем и рабочей машиной момент сопротивления вычисляется по формуле

$$M_c = M_m \frac{1}{i_1 i_2 \dots i_n}. \quad (4.18)$$

Если же необходимо выполнить приведение возвратно-поступательного движения электродвигателя к линейному перемещению рабочего органа механической машины, то достаточно воспользоваться уравнением

$$F_c = F_m \frac{v_m}{v_d}, \quad (4.19)$$

где  $v_d, v_m$  — линейные скорости движения двигателя и рабочего органа нагрузочной машины.

Приведение статического момента энергетической системы, состоящей из электродвигателя вращательного типа и исполнительного механизма поступательного движения, выполняется по уравнениям

$$M_c \omega_d = F_M v_M;$$

$$M_c = \frac{F_M v_M}{\omega_d} = \frac{30 F_M v_M}{\pi n_d}, \quad (4.20)$$

где  $n_d$  — обороты вращения электродвигателя.

### 4.3. ПРИВЕДЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА К ВАЛУ ДВИГАТЕЛЯ

В инженерных расчетах в большинстве случаев момент инерции геометрических тел выражается как произведение массы тела на квадрат радиуса инерции:

$$J = mr^2, \quad (4.21)$$

где  $m$  — масса геометрического тела;  $r$  — радиус инерции.

Под радиусом инерции понимают расстояние от оси вращения, проходящее через центр тяжести, на котором помещается масса рассматриваемого тела, сосредоточенная в одной точке (рис. 4.3).

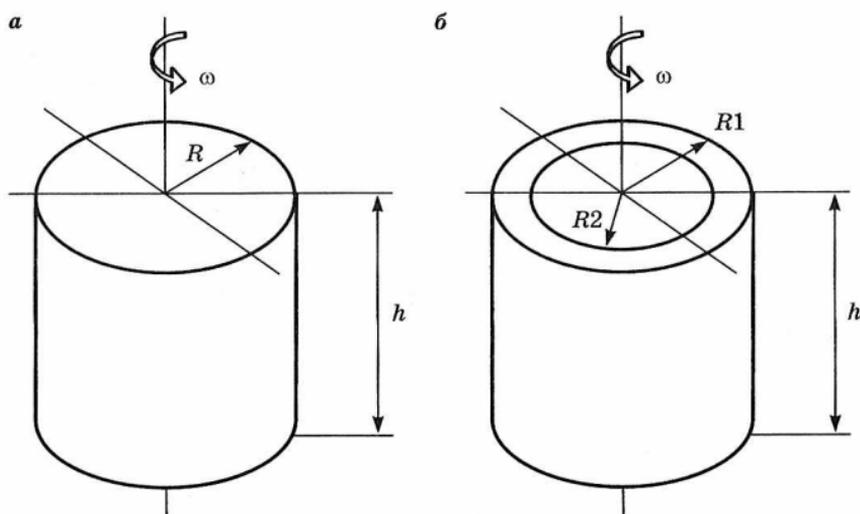


Рис. 4.3

Геометрические фигуры, наиболее часто используемые в виде описания маховых масс электропривода:

а — цилиндр; б — полый цилиндр.

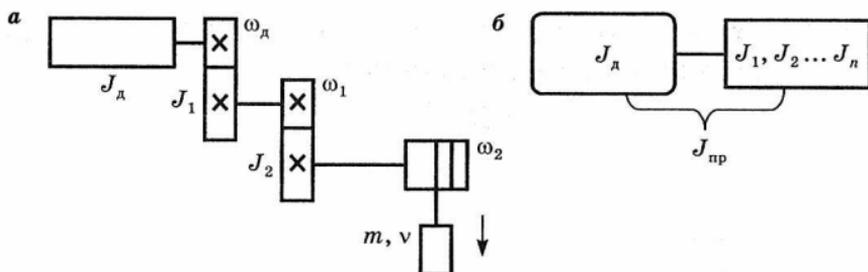


Рис. 4.4

Приведение моментов инерции электропривода к валу двигателя:  
 а — кинематическая схема исходной системы; б — система, приведенная к валу электродвигателя.

Для тел цилиндрической формы ось, относительно которой определяется момент инерции, проходит через центр тяжести параллельно линии, образующей фигуру.

Радиус инерции маховой массы в виде цилиндра рассчитывается из выражения

$$r = \sqrt{\frac{R^2}{2}}, \quad (4.22)$$

где  $R$  — радиус цилиндра.

Радиус инерции геометрического тела вращения в форме полого цилиндра находится по уравнению

$$r = \sqrt{\frac{R_2^2 + R_1^2}{2}}, \quad (4.23)$$

где  $R_1, R_2$  — внутренний и внешний радиусы полого цилиндра.

Для несложных маховых масс, состоящих из нескольких геометрических тел, момент инерции может быть приближенно определен как сумма моментов инерции отдельных элементов, взятых относительно оси вращения.

В уравнение движения электропривода входит приведенный момент инерции системы  $J_{пр}$ . На рисунке 4.4а изображена реальная система, на рисунке 4.4б — приведенная.

Запас кинетической энергии для электропривода, представленного схематично на рисунке 4.4а, вычисляется из выражения

$$J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{д}}^2}{2} = J_{\text{д}} \frac{\omega_{\text{д}}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + m \frac{v^2}{2}, \quad (4.24)$$

где  $J_{\text{пр}}$  — приведенный к валу двигателя момент инерции системы;  $J_1, J_2$  — моменты инерции частей рабочей машины или передач;  $\omega_1, \omega_2$  — угловые скорости вращения передач;  $J_{\text{д}}, \omega_{\text{д}}$  — момент инерции и угловая скорость вращающихся частей электродвигателя.

Из выражения (4.24) можно найти приведенный момент инерции динамической системы, умножив на  $\frac{2}{\omega^2}$  левую и правую части:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega_{\text{д}}^2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{\omega_{\text{д}}^2} + m \frac{v^2}{\omega_{\text{д}}^2}. \quad (4.25)$$

Заменяя в уравнении (4.25)  $\frac{\omega_1^2}{\omega_{\text{д}}^2} = i_1^2$  и  $\frac{\omega_2^2}{\omega_{\text{д}}^2} = i_2^2$ , а отношение  $\frac{v^2}{\omega_{\text{д}}^2} = r^2$ , получим

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + mr^2. \quad (4.26)$$

Из (4.26) следует, что для расчета приведенного момента инерции системы необходимо все моменты  $J_i$  вращающихся элементов разделить на квадрат передаточного числа  $i_j$  между скоростями вращения звеньев передачи и вала электродвигателя, а геометрические массы возвратно-поступательно движущихся частей умножить на квадрат радиуса инерции и сложить с моментом инерции электрического двигателя.

В теории электропривода очень часто оперируют не моментами инерции, а маховыми моментами, обозначаемыми  $GD^2$ .

В практических расчетах момент инерции тела выражается в  $\text{кгм}^2$  и рассчитывается по формуле

$$J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g}, \quad (4.27)$$

где  $G$  — вес тела;  $D$  — диаметр инерции тела вращения;  $g$  — ускорение свободного падения.

Приведенный маховый момент энергетической системы находится по уравнению

$$GD_{\text{пр}}^2 = GD_{\text{д}}^2 + GD_1^2 i_1^{-2} + GD_2^2 i_2^{-2} + \dots + GD_{\text{п}}^2 i_{\text{п}}^{-2}. \quad (4.28)$$

Уравнение (4.28) более удобно для практического использования, поскольку при введении приведенного махового момента в уравнение движения электропривода угловая скорость вращения обычно выражается в  $\text{мин}^{-1}$ .

#### 4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Динамические процессы пуска и торможения являются неотъемлемыми периодами рабочего цикла электропривода. Изучение переходных процессов привода в составе производственного механизма требует знания длительности и характера протекания периодов пуска и торможения, с целью выявления их влияния на режим работы передаточного механизма, исполнительного органа рабочей машины и соблюдения продолжительности операций технологического процесса.

Уравнение движения электропривода (4.8) для  $m = \text{const}$  дает возможность найти продолжительность переходного процесса запуска:

$$dt = J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}. \quad (4.29)$$

Время, необходимое для изменения скорости привода от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ :

$$t = J_{\text{пр}} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}. \quad (4.30)$$

Решение выражения (4.28) невозможно без знания графических зависимостей  $M_{\text{д}}$ ,  $M_{\text{с}} = f(\omega)$ .

Уравнение (4.30) дает общее решение нахождения времени пуска электропривода. В ряде случаев позволено отказать от общего решения и перейти к частному. Например, если предположить, что развиваемый двигателем

электромагнитный момент и ток во время запуска остаются постоянными и равны средним значениям  $M_{\text{ср}} = \lambda M_{\text{НОМ}}$  и  $I_{\text{ср}} = \lambda I_{\text{НОМ}}$ , то для приближенного расчета времени пуска при  $\lambda = 1,2-2$  можно рассмотреть два частных случая, связанных с изменением момента сопротивления.

При пуске электропривода вхолостую статический момент сопротивления на валу двигателя принимается равным нулю,  $M_c = 0$ , тогда уравнение для определения времени запуска имеет вид

$$t_{\text{п0}} = J_{\text{д}} \int_0^{\omega_0} \frac{d\omega}{\lambda M_{\text{НОМ}}} = J_{\text{д}} \frac{\omega_0}{\lambda M_{\text{НОМ}}}. \quad (4.31)$$

Если на валу электродвигателя действует постоянный момент сопротивления,  $M_c = \text{const}$ , то время пуска находится по уравнению

$$t_{\text{п}} = J_{\text{пр}} \int_0^{\omega_{\text{н}}} \frac{d\omega}{\lambda M_{\text{НОМ}} - M_c} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{н}}}{\lambda M_{\text{НОМ}} - M_c}. \quad (4.32)$$

Во время торможения механизма под действием статического момента сопротивления время переходного процесса рассчитывается из выражения

$$t_{\text{т}} = J_{\text{пр}} \int_{\omega_{\text{н}}}^0 \frac{d\omega}{-M_c} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{н}}}{M_c}. \quad (4.33)$$

В случае использования махового момента вместо момента инерции системы уравнение для расчета времени перехода от одной угловой скорости вращения к другой запишется в виде

$$t = \frac{GD_{\text{пр}}^2}{375} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{\lambda M_{\text{НОМ}} - M_c} = \frac{GD_{\text{пр}}^2}{375} \left( \frac{n_2 - n_1}{\lambda M_{\text{НОМ}} - M_c} \right). \quad (4.34)$$

Кроме аналитических методов расчета времени переходного процесса в теории электропривода имеются и графоаналитические способы, например метод пропорций и метод конечных площадей.

Сущность методов заключается в замене производных по скорости  $d\omega$  и времени  $dt$  малыми конечными приращениями  $\Delta\omega$  и  $\Delta t$ , которые подставляются вместе со средними значениями электромагнитного момента и момента



для первого участка моментов. Из точки  $C$  начинается отрезок  $[C, C_1]$ , проходящий параллельно  $[A, B_1]$ , который соответствует второму участку моментов и т. д.

При построении следует учитывать масштабы электромагнитного и инерционного моментов, угловой скорости вращения и времени переходного периода, которые связаны между собой равенством

$$\frac{M_m}{M_J} = \frac{M_\omega}{M_t}. \quad (4.35)$$

Если, например, заданы масштабы трех величин — электромагнитного момента, скорости вращения и времени, то можно найти масштаб момента инерции с целью определения координаты точки  $A$ :

$$M_J = \frac{M_m M_t}{M_\omega}. \quad (4.36)$$

Предложенный метод расчета времени пуска электродвигателя приемлем для приводов не только переменного тока, но и постоянного. Данный способ применим и для определения времени остановки в тормозных режимах работы электропривода.

Во втором графоаналитическом методе — методе площадей, как и в методе пропорций, динамический момент  $M_{дин}$  разбивается на определенное количество участков, на каждом из которых предполагается  $M = \text{const}$  и равно среднему значению.

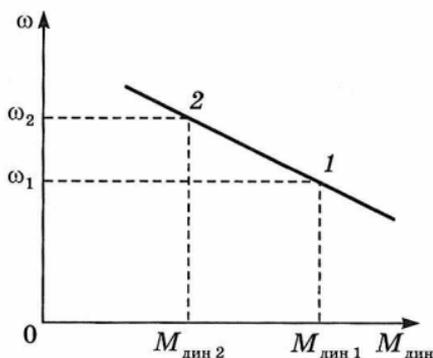
Значение времени для каждого из участков рассчитывается по формуле

$$\Delta t = J \frac{\Delta \omega}{\Delta M}. \quad (4.37)$$

На основании графических функции  $\omega = f(t)$  и  $M_{дв} = f(\omega)$  строится характеристика изменения электромагнитного момента во время запуска электродвигателя  $M_{дв} = f(t)$ .

В случае линейного закона изменения динамического момента (см. рис. 4.6) время переходного процесса определяется из выражения

$$t = J_{np} \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{дин1} - M_{дин2}} \ln \frac{M_{дин1}}{M_{дин2}}. \quad (4.38)$$



**Рис. 4.6**  
Линейная зависимость динамического момента электропривода от скорости вращения

С учетом махового момента уравнение (4.36) переписывается как

$$t = \frac{GD_{\text{пр}}^2}{375} \left( \frac{n_2 - n_1}{M_{\text{дин1}} - M_{\text{дин2}}} \ln \frac{M_{\text{дин1}}}{M_{\text{дин2}}} \right). \quad (4.39)$$

Выражения (4.38) и (4.39) применяются и для определения длительности переходных процессов, когда динамический момент не является линейной функцией скорости вращения. Для нахождения времени пуска кривая динамического момента разбивается на ряд участков — заменяется ломанной, и на каждом из участков вычисляется время переходного процесса. Просуммировав полученные результаты, можно найти длительность периода разгона электропривода.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой режим работы электрического привода называется динамическим?
2. Приведите формулу для расчета динамической мощности.
3. Что понимается под статическим моментом сопротивления?
4. По какому выражению вычисляется динамический момент?
5. Дайте понятие приведенной системы электропривода.
6. Для какой цели рассчитывается приведенный момент инерции ЭП?
7. Перечислите способы определения времени переходного периода электропривода.
8. Для какой цели динамическая кривая разбивается на отрезки?
9. Приведите равенство отношений моментов.
10. Как рассчитать время переходного периода с учетом махового момента электропривода?

## ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**В** процессе проектирования и эксплуатации электроприводов необходимо учитывать потребление и потери электроэнергии, а также влияние электропривода на сеть и на работу других электрических приемников. Оценка этих свойств осуществляется с помощью энергетических показателей: коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, потерь мощности и энергии.

Потери мощности и энергии в ЭП складываются из потерь в электродвигателе, механической передаче, преобразователе, системы управления, однако основными являются потери в двигателе, которым и уделяется основное внимание.

### 5.1. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В установившемся режиме работы потери мощности  $\Delta P$  в электродвигателе являются суммой двух составляющих — постоянных ( $K$ ) и переменных ( $V$ ) потерь:

$$\Delta P = K + V. \quad (5.1)$$

Под постоянными подразумеваются потери мощности, не зависящие от нагрузки двигателя. К ним относятся потери в стали магнитопровода, механические потери от трения и вентиляционные потери.

Переменными считаются потери, выделяемые в обмотках при протекании по проводникам токов, величина которых определяется механической нагрузкой ЭП.

Для двигателей постоянного тока переменные потери находятся как

$$V = I^2 R, \quad (5.2)$$

где  $I$ ,  $R$  — ток и сопротивление цепи якоря электродвигателя.

В трехфазном асинхронном электродвигателе переменные потери мощности определяются по уравнению

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2', \quad (5.3)$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  — потери мощности в цепях обмоток статора и ротора.

Потери мощности при работе в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} (1 - \eta_{\text{НОМ}}). \quad (5.4)$$

Из выражения (5.1) находятся постоянные потери мощности:

$$K = \Delta P_{\text{НОМ}} - V_{\text{НОМ}}. \quad (5.5)$$

Потери энергии в двигателе за время работы  $t_p$ :

$$\Delta A = \Delta P t_p. \quad (5.6)$$

При работе с циклически изменяющейся нагрузкой полные потери энергии за весь цикл рассчитываются по уравнению

$$\Delta A = \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i, \quad (5.7)$$

где  $m$  — число отдельных участков цикла.

## 5.2. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В момент запуска двигатель потребляет из сети ток, значительно превосходящий номинальный, что приводит к ускоренному нагреву обмоток статора и ротора. Для оценки эффективности энергетических преобразований,

происходящих в электродвигателе в переходном режиме работы без нагрузки ( $M_c = 0$ ), необходимо знать количественное распределение потерь мощности и энергии в проводниках и магнитопроводе.

Потери в электродвигателе при пуске, реверсе, торможении, изменении скорости могут быть значительными и существенно влиять на энергетические показатели. Особенно важным является нахождение потерь в электрических двигателях, входящих в состав приводов, у которых динамический режим является основным, например электропривод крановых механизмов, станочного и лифтового оборудования и т. д.

Переходные режимы могут протекать под нагрузкой или без нее. Рассмотрим энергетические соотношения в переходном периоде в момент запуска двигателя в режиме холостого хода  $M_c = 0$ .

Переменные потери в якоре ДПТ и роторе АД определяются как

$$\Delta A_2 = \int_0^{t_{\text{п}}} M(\omega_0 - \omega) dt, \quad (5.8)$$

где  $t_{\text{п}}$  — время переходного режима.

Преобразовав (5.8), получим выражение для расчета переменных потерь с учетом изменения скольжения:

$$\Delta A_2 = \frac{J\omega_0^2}{2} (S_{\text{нач}}^2 - S_{\text{кон}}^2). \quad (5.9)$$

Данное выражение очень удобно для практических расчетов.

Для определения полных переменных потерь энергии в АД воспользуемся формулой

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2. \quad (5.10)$$

Потери энергии в цепи статора электрической машины рассчитываются из выражения

$$\Delta A_1 = \Delta A_2 \frac{R_1}{R'_2}. \quad (5.11)$$

**Оценка работы электропривода под нагрузкой ( $M_c \neq 0$ ) во время запуска и перехода от одной угловой скорости**

вращения к другой несколько отличается от выявления эффективности его функционирования в режиме холостого хода, поскольку необходимо знать две графические зависимости,  $w = f(t)$  и  $M = f(t)$ . Очень часто для проведения оценочных расчетов энергетических показателей выполняют упрощенный расчет потерь энергии. Реализация данной методики основывается на предположении, что момент двигателя в переходных процессах не изменяется и равен некоторому среднему моменту.

Проведя ряд преобразований над выражением (5,8), получим уравнение для нахождения потерь во вращательном элементе двигателя в переходном режиме работы под нагрузкой:

$$\Delta A_{2н} = \frac{M_{ср}}{M_{ср} \pm M_c} \Delta A_2, \quad (5.12)$$

где  $M_{ср}$  — средний, неизменный момент за время переходного процесса, «+» — соответствует торможению, «-» — пуску двигателя.

Выражение (5.12) определяет потери энергии в переходных процессах в роторе АД и якоре ДПТ. Для нахождения потерь в статоре  $\Delta A_{1н}$  и полных потерь в АД используются формулы (5.10) и (5.11).

Необходимо отметить, что в соответствии с (5.12) выделяемые в двигателе потери энергии при его работе под нагрузкой по сравнению с потерями при работе вхолостую увеличиваются в режиме пуска и уменьшаются в режиме торможения.

### 5.3. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

С целью уменьшения потерь энергии в период пуска или торможения электродвигатели к рабочим машинам подбирают таким образом, чтобы приведенный момент инерции привода при одной и той же скорости был наименьшим. Реализация требования выполняется за счет применения малогабаритных двигателей, имеющих пониженный  $J$  (двигатели с повышенным отношением длины

якоря к его диаметру, с полым или дисковым якорем). Целесообразно использование двух электрических машин половинной мощности. Расчеты показывают, что суммарный момент инерции двух двигателей 50% мощности оказывается меньше инерционного момента одного электродвигателя полной мощности. Например, двигатели серии 4А мощностью до 45 кВт имеют суммарный момент инерции на 30% меньше по сравнению с электродвигателями этого же типа, но рассчитанные на номинальную мощность до 90 кВт.

К снижению потерь электрической энергии следует отнести и выбор электрических машин, имеющих максимально возможные коэффициенты полезного действия и мощности.

Другой способ уменьшения потерь в электроприводе — регулирование скорости идеального холостого хода, что хорошо реализуется в ступенчатом пуске ЭП (для АД — регулирование оборотов вращения с помощью частоты питающего тока или числа пар полюсов; для ДПТ — изменение угловой скорости с помощью напряжения).

Если принять для первой ступени разгона значения угловой скорости  $\omega_{02} = \frac{\omega_{01}}{2}$ , а скольжений  $S_{\text{нач}} = 1$ ,  $S_{\text{кон}} = 0$ , то переменные потери в роторе или якоре можно найти по уравнению

$$A_{2c1} = J \frac{\omega_{02}^2}{2} = J \frac{\omega_{01}^2}{8}. \quad (5.13)$$

Для второй ступени разгона  $S_{\text{нач}} = 0,5$ ;  $S_{\text{кон}} = 0$ , тогда

$$A_{2c2} = J \frac{\omega_{01}^2}{8}. \quad (5.14)$$

Суммарные потери при ступенчатом запуске

$$\Delta A = \Delta A_{2c1} + \Delta A_{2c2} = J \frac{\omega_{01}^2}{4}, \quad (5.15)$$

а при прямом пуске равны  $A_{2п} = J \frac{\omega_{01}^2}{2}$ .

При ступенчатом пуске отмечается снижение потерь электрической энергии в 2 раза по сравнению с прямым запуском электродвигателя.

За счет изменения в переходном процессе  $\omega_0$  снижаются потери энергии в роторе асинхронного электродвигателя. Уменьшение потерь энергии в роторе приводит к минимизации потерь в статоре, а также суммарных потерь в АД. Приведенный момент инерции ЭП зависит не только от  $J$  двигателя или рабочей машины, но и от передаточного механизма. Для уменьшения потерь энергии при пуске передаточное отношение  $i$ , например, редуктора следует выбирать, исходя из получения минимального приведенного момента инерции всего электропривода, а правильность выбора проверять экономическим расчетом.

#### 5.4. РАСЧЕТ КПД ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

В общем случае, когда электропривод работает с различными скоростями и нагрузками на валу:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{потр}}} = \frac{A_{\text{пол}}}{(A_{\text{пол}} + \Delta A)} = \frac{\sum_1^n P_{\text{пол}i} t_i}{\sum_1^n P_{\text{пол}i} t_i + \sum_1^n \Delta P_i t_i}, \quad (5.16)$$

где  $A_{\text{пол}}$ ,  $A_{\text{потр}}$  — полезная и потребляемая энергия;  $\Delta A$  — потери энергии в электрическом приводе;  $P_{\text{пол}i}$  — полезная механическая мощность ЭП на  $i$  участке цикла;  $\Delta P$  — потери мощности в приводе на  $i$  отрезке;  $n$  — число участков работы.

Полученный в результате расчета по формуле (5.16) КПД называется цикловым или средневзвешенным.

Если электрический привод работает в неизменном режиме с постоянной мощностью, то КПД вычисляется по уравнению

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P}. \quad (5.17)$$

КПД электропривода рассматривается как коэффициент полезного действия электромеханической системы и находится в результате произведения КПД электродвигателя, управляющего устройства, преобразователя и механической передачи,  $\eta_{\text{эп}} = \eta_{\text{д}} \eta_{\text{уу}} \eta_{\text{п}} \eta_{\text{мп}}$ .

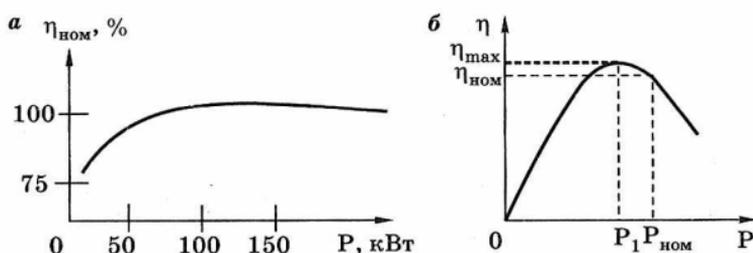


Рис. 5.1

Графики КПД электродвигателя:

а — КПД в функции мощности; б — зависимость КПД от величины нагрузки на выходном валу двигателя.

Наиболее значимой величиной является коэффициент полезного действия электродвигателя, который растет с увеличением мощности и оборотов вращения (рис. 5.1а) КПД зависит также от развиваемой двигателем полезной механической мощности на валу (рис. 5.1б).

В пусковых и тормозных режимах работы электродвигателя постоянные потери мощности изменяются пропорционально скорости вращения двигателя, а переменные — пропорционально квадрату силы тока.

В номинальном режиме работы КПД электродвигателя имеет максимальное значение, когда переменные потери мощности равны постоянным.

При малых нагрузках КПД двигателя растет незначительно, но по мере увеличения момента сопротивления на валу электрической машины коэффициент полезного действия увеличивается и достигает максимального значения в момент мощности  $P_1$  (рис. 5.1б), которая по величине несколько меньше  $P_{\text{ном}}$  ( $P_1 < P_{\text{ном}}$ ).

Способы повышения коэффициента полезного действия:

- ограничение времени работы электропривода на холостом ходу;
- обеспечение нагрузки на валу электродвигателя, близкой к номинальной, например в результате замены малонагруженного электродвигателя на двигатель меньшей мощности;
- снижение потерь энергии в переходных режимах;
- использование частотных способов регулирования оборотов вращения;
- выбор высокоскоростных электродвигателей.

## 5.5. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Электрический привод, подключаемый к сети переменного тока, потребляет активную  $P$  и реактивную  $Q$  мощности. Активная мощность расходуется на осуществление электроприводом полезной работы и покрытие потерь в нем, а реактивная мощность обеспечивает создание электромагнитного поля двигателя и непосредственно полезной работы не производит.

Работа ЭП, как и любого другого потребителя, характеризуется коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (5.18)$$

где  $S$  — полная мощность.

Если  $Q$  не потребляется, то  $\cos \varphi = 1$  (сдвиг между фазами  $\varphi = 0$ ). Потребляя реактивную мощность, электропривод загружает систему электроснабжения, вызывая дополнительные потери напряжения и энергии в проводах. С целью снижения потерь мощности  $\cos \varphi$  необходимо приближать к единице. Достаточно часто коэффициент мощности повышается в результате компенсации реактивной мощности статическими конденсаторами, которые устанавливаются либо на трансформаторной подстанции, либо на самом электродвигателе.

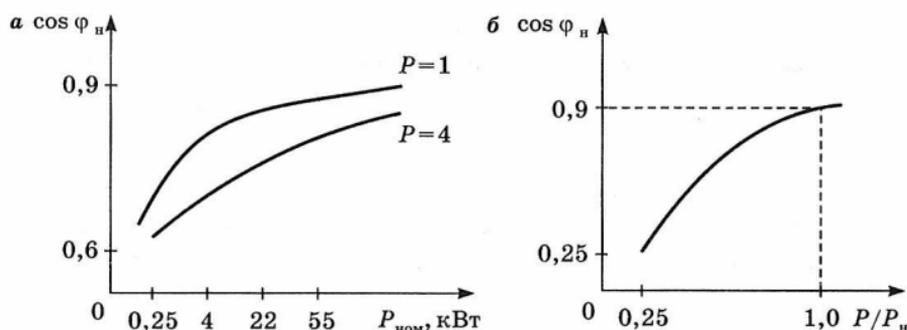


Рис. 5.2

Изменение  $\cos \varphi$  электродвигателей:

$a$  — график  $\cos \varphi$  в функции мощности;  $b$  — зависимость  $\cos \varphi$  от величины загрузки электродвигателя.

Величина коэффициента мощности в значительной степени зависит от мощности, числа пар полюсов, оборотов вращения и загрузки электрической машины (рис. 5.2).

**Основные мероприятия по повышению коэффициента мощности.** Мероприятия по повышению коэффициента мощности подразделяются на естественные и искусственные.

Естественные способы:

- подбор электродвигателя в строгом соответствии с потребляемой мощностью рабочей машины;
- при выборе двигателей предпочтение необходимо отдавать высокоскоростным электрическим машинам;
- в процессе эксплуатации необходимо добиваться снижения времени работы в режиме холостого хода.

Искусственные методы:

- использование статических конденсаторов;
- применение синхронных компенсаторов.

## **5.6. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

В последние 20 лет энергосбережение стало одним из основных приоритетных направлений стратегической технической политики во всех развитых странах мира. Интенсивная компьютеризация передовых стран, внедрение современных радио и телевизионных систем, широкое распространение бытовой электротехники, расширение промышленного производства, потребляющего значительную часть энергоресурсов, непрерывно возрастающие сложности добычи газа и углеводородного топлива, приводящие к повышению их стоимости, ухудшение экологической среды требует либо искать новые источники энергии, либо экономить и приоритетно распределять производимые объемы.

Очевидно, что основные усилия по энергосбережению должны быть сконцентрированы именно в сфере потребления электроэнергии.

Учитывая, что более 60% всей вырабатываемой электроэнергии потребляют электроприводы, можно сделать

вывод о высокой актуальности задач энергосбережения при проектировании, эксплуатации, а также модернизации систем электропривода.

Основными способами энергосбережения в электроприводах как в промышленности, так и в сельском хозяйстве являются:

- повышение равномерности работы и увеличение загрузки электропривода до номинальной мощности;
- снижение или полная ликвидация режима холостого хода;
- замена малонагруженных электродвигателей электрическими машинами меньшей мощности (замена выполняется, если средняя нагрузка составляет менее 45%, при нагрузке более 70% замена электродвигателей нецелесообразна);
- переключение обмотки статора с треугольника на звезду;
- подбор приводных электродвигателей по конструктивному исполнению;
- правильная настройка аппаратуры защиты;
- снижение интервалов действия повышенного напряжения питания;
- искусственная компенсация коэффициента мощности электродвигателя;
- переход на энергосберегающие электрические двигатели;
- регулирование оборотов вращения или электромагнитного момента электроприводов;
- сокращение потребления электрической энергии во время переходных режимов работы приводов;
- правильный подбор электродвигателей для рабочих машин.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные энергетические показатели электропривода.
2. Какие потери мощности в электродвигателе называются переменными, а какие постоянными?

3. Какие способы используются для снижения потерь энергии в ЭП?
4. Перечислите мероприятия по повышению КПД электрического привода.
5. Какие методы применяются для повышения коэффициента мощности?
6. Приведите уравнение для расчета КПД электропривода.
7. Когда КПД электродвигателя достигает максимального значения?
8. По какой формуле рассчитывается коэффициент мощности?
9. Почему задача экономии электрической энергии в электроприводе очень актуальна?
10. Перечислите способы энергосбережения в электроприводах.
11. Для чего необходимо повышать коэффициент мощности электродвигателя?
12. Приведите формулы для нахождения переменных потерь мощности в электрических двигателях постоянного и переменного тока?
13. Когда в знаменателе уравнения для определения потерь электрической энергии в роторе учитывается «+», а когда «-»?
14. Во сколько раз снижаются потери электрической энергии при ступенчатом запуске электропривода?
15. От каких параметров электрического привода зависит коэффициент полезного действия?

# ЭЛЕКТРОПРИВОД В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

## 6.1. ПРИВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧИХ МАШИН

**П**риводными характеристиками нагрузочных машин считаются технологические, кинематические, энергетические, механические, нагрузочные и инерционные. Характеристики используются для проектирования электропривода и правильного подбора электрической машины к рабочему органу исполнительного устройства.

**Технологические характеристики** определяют требования к электроприводу со стороны рабочих машин и поточных линий. Они характеризуют перепады скорости, удельные расходы энергии, способы регулирования оборотов вращения или линейной скорости перемещения рабочего органа, необходимость автоматизации, а также условия работы электропривода в зависимости от условий окружающей среды.

**Кинематические характеристики** показывают траектории движения и скоростные режимы работы всех элементов машин и агрегатов и дают информацию о возможных направлениях распределения энергетических потоков.

**Энергетические характеристики** предназначены для выявления общего и удельного расхода электрической мощности и энергии, затрачиваемой на выполнение всего технологического процесса или отдельной операции.

**Механические характеристики** выполняют функциональную связь между угловой скоростью вращения рабочего органа машины и статическим моментом сопротивления,  $\omega = f(M_c)$  или  $M_c = f(\omega)$ .

Аналитически механические характеристики рассчитываются из уравнения

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left( \frac{\omega_i}{\omega_n} \right)^x, \quad (6.1)$$

где  $M_c$  — статический момент сопротивления производственного механизма;  $M_0$  — момент сопротивления рабочей машине в режиме холостого хода;  $M_{сн}$  — момент сопротивления в номинальном режиме работы;  $\omega_i$  — угловая скорость вращения в определенный момент времени;  $\omega_n$  — угловая скорость вращения в номинальном режиме работы;  $x$  — показатель степени, от численного значения которого зависит вид механической характеристики.

Если  $x = 0$ , момент сопротивления не зависит от угловой скорости вращения и характеризуется усилиями трения. Подобной характеристикой обладают подъемно-транспортные механизмы, поршневые и вакуум насосы и механизмы подачи металлорежущих станков.

Когда  $x = 1$ , статический момент сопротивления линейно возрастает с увеличением скорости рабочей машины. Указанная характеристика принадлежит льномялкам, зерноочистительным машинам, корнеклубномойкам на холостом ходу и генератору независимого возбуждения, работающему на постоянную нагрузку.

При  $x = 2$  момент сопротивления пропорционален квадрату изменения угловой скорости вращения. Характеристика называется вентиляторной и относится к центробежным насосам, вентиляционным установкам, сепараторам и молотильным барабанам.

Снижение момента сопротивления у рабочих машин обратно пропорционально угловой скорости и возникает, если в уравнении (6.1) показатель степени  $x$  принимает значение  $-1$  ( $x = -1$ ). Такой характеристикой обладают металлообрабатывающие станки и зерновые нории, работающие под нагрузкой.

Механические характеристики используются для правильного подбора электрического двигателя к рабочей машине, экономической эксплуатации электропривода, при анализе переходных процессов, построении нагрузочных

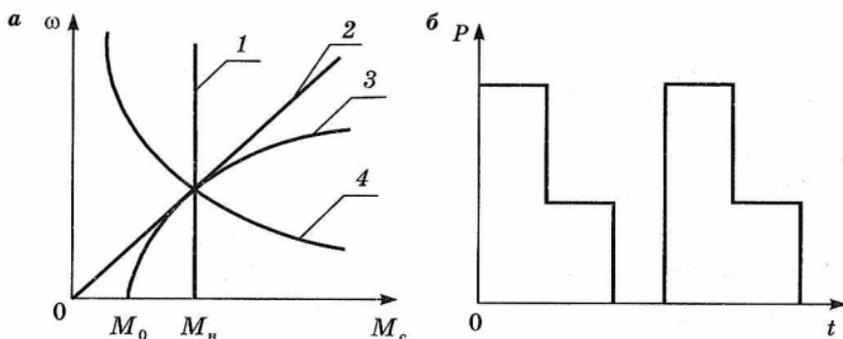


Рис. 6.1

Приводные характеристики рабочих машин:

*а* — механические характеристики: 1 — характеристика подъемно-транспортных механизмов; 2 — характеристика зерноочистительных машин; 3 — характеристика вентиляционных установок; 4 — характеристика металлообрабатывающих станков; *б* — нагрузочная диаграмма транспортера.

диаграмм и определении возможности пуска и устойчивой работы электропривода.

**Нагрузочные диаграммы** рабочих машин показывают зависимость момента сопротивления, механической мощности, угловой скорости вращения в функции времени и отражают характер и режим работы электропривода.

На рисунке 6.1 представлены механические и нагрузочные характеристики рабочих машин.

**Инерционные характеристики** определяют степень изменения количественного значения и характер варьирования суммарного момента инерции, а также величину инерционности всех подвижных элементов нагрузочной машины.

## 6.2. ЭЛЕКТРОПРИВОД ВОДОСНАБЖАЮЩИХ УСТАНОВОК

### 6.2.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В сельскохозяйственном производстве вода расходуется на хозяйственно-бытовые и санитарно-гигиенические нужды населения, поение животных и птицы, приготовление кормов, полив растений в сооружениях защищенного грунта и на поливное земледелие.

Подача воды, например, на животноводческих объектах осуществляется через водонапорные установки, осна-

ценные центробежными насосами, работающими от регулируемого и нерегулируемого асинхронного электропривода. Выбор насосных установок производится, исходя из принятой схемы водоснабжения, расчета суточной нормы воды, приходящейся на одного потребителя и учета количества потребителей одного вида.

Норма водопотребления в сутки на одну голову крупного рогатого скота — 50–80 л, лошадей — 60–80 л, свиней — 15–25 л, овец и коз — 10 л. На фермах крупного рогатого скота, оснащенных доильными залами, нормы водопотребления увеличиваются на 20%. Коэффициент часовой неравномерности принимается равным 2,5.

При расчете водоснабжения в зависимости от размера хозяйства учитывается пожарный расход воды 5–20 л/с и длительность процесса горения 2–3 ч. Необходимый расход воды обязаны обеспечить насосный агрегат, водопроводная сеть и резервный источник водоснабжения.

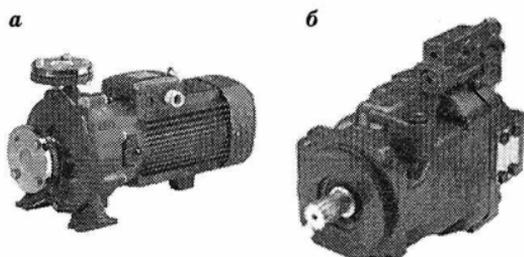
Рекомендуемая температура воды для поения животных — 5–15°C. Слишком теплая вода плохо утоляет жажду и не освежает животных. Холодная вода уменьшает продуктивность скота и вызывает повышенный расход кормов.

Одна из наиболее распространенных схем водоснабжения животноводческих ферм включает следующий комплекс сооружений: водоприемник с насосной станцией, разводящую сеть трубопроводов, водонапорную башню и резервуар или специальный водоем для хранения противопожарного запаса воды. Для улучшения качества воды очень часто в предложенную схему водоснабжения вводят системы по очистки и обеззараживанию жидкости.

### 6.2.2. ВОДОПОДЪЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

Насосные установки в сельскохозяйственном производстве применяются для перекачивания жидких сред, вязких жидкостей и технологической, охлаждающей и питьевой воды.

Основным элементом рассматриваемых устройств для подачи воды являются насосы, которые подразделяются на центробежные и поршневые.



**Рис. 6.2**  
Насосные установки:  
*а* — центробежный насос;  
*б* — аксиально-поршневой насос.

На рисунке 6.2 представлены насосные агрегаты центробежного и поршневого типов.

В центробежном насосе рабочее колесо с лопатками расположено на валу внутри корпуса. Лопатки изогнуты в сторону противоположную направлению вращения колеса. Корпус насоса соединен со всасывающим и нагнетательным трубопроводами. При вращении жидкость, находящаяся в корпусе между лопатками, под действием центробежной силы отжимается к периферии, переходит в спиральную камеру и далее в напорный трубопровод. В центре насоса перед входом в рабочее колесо создается пониженное давление, и вода под действием атмосферного давления поступает из всасывающего трубопровода в насос. В настоящее время выпускаются следующие серии центробежных насосных агрегатов: К, КМ, ЭЦВ, НМШ, АХ, Х, ЦГ, ЦНС, *Grundfos, Wilo, Pedrollo* и т. д.

Поршневой насос простого действия состоит из рабочей камеры, имеющей всасывающий и напорный клапаны и цилиндр с поршнем. На конце всасывающей трубы устанавливают предохранительную сетку с обратным клапаном. В поршневом насосе всасывание и нагнетание жидкости происходит при возвратно-поступательном движении поршня в цилиндре насоса. При движении поршня вправо в замкнутом пространстве между крышкой цилиндра и поршнем создается разрежение и в камеру поступает определенный объем жидкости. При ходе поршня влево имеющийся объем воды выталкивается в напорный трубопровод. Подача поршневого насоса пропорциональна числу ходов поршня и не зависит от напора. На текущий момент выпускаются следующие серии поршневых насосов: НГС-420, *VVS/VVP, PVB, PVQ, PVH, PVXS, PVE, PVM, PVWS, PLATA, LVP, MVP* и т. д.

### 6.2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУТОЧНОГО РАСХОДА ВОДЫ

Нормы водопотребления позволяют определить общую расчетную потребность в воде объекта, для которого проектируется водопровод. Эта потребность определяется отдельно для каждой категории водопотребителей.

Основным показателем требуемого количества воды для водоснабжения сельскохозяйственного объекта принимается среднесуточный расход.

Суточный расход воды на хозяйственно-питьевые нужды животноводческой фермы рассчитывается по формуле

$$Q = qN, \quad (6.2)$$

где  $q$  — расчетная норма воды на одного потребителя;  $N$  — количество потребителей одного вида.

Расчетная норма водопотребления определяется из уравнения

$$q = q_n K_{\text{сут}} K_{\text{ч}}, \quad (6.3)$$

где  $q_n$  — норма водопотребления, приходящаяся на одного потребителя;  $K_{\text{сут}}$  — коэффициент суточной неравномерности водопотребления,  $K_{\text{сут}} = 1,1-1,3$ ;  $K_{\text{ч}}$  — коэффициент часовой неравномерности водопотребления,  $K_{\text{ч}} = 2-5$ .

Найденный по формуле (6.2) среднесуточный расход воды изменяется по сезонам года и в зависимости от вида и количества содержащихся на ферме животных.

Для обеспечения бесперебойной подачи воды на животноводческие объекты используют центробежные насосы, которые отличаются повышенной надежностью и простотой в эксплуатации. Насосы выбираются по двум основным параметрам — производительности и напору.

### 6.2.4. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НАСОСА

Центробежные насосы относятся к числу механизмов с продолжительным режимом работы и постоянной нагрузкой. В большинстве случаев агрегаты изготавливаются в виде быстроходных устройств, соединяемые напрямую с валом электродвигателя. Выпускаемые в настоящее время насосы рассчитаны на угловые скорости вращения от 15 до 300 рад/с.

При отсутствии электрического регулирования скорости в насосных агрегатах небольшой мощности наиболее часто применяются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, подключаемые к переменному трехфазному напряжению 380 В. Для привода насосов мощностью свыше 100 кВт устанавливают асинхронные и синхронные двигатели 6 и 10 кВт с прямым запуском.

Подача насоса определяется из выражения

$$Q_H = \frac{Q}{24\eta_H}, \quad (6.4)$$

где  $\eta_H$  — номинальный КПД насоса.

Напор насоса выбирается исходя из того, чтобы он мог подавать воду при необходимом давлении в заданную точку. Требуемый напор определяется геометрическими высотами всасывания и нагнетания, потерями напоров во всасывающем и напорном трубопроводах и разностями скоростных напоров на входе и выходе из насоса:

$$H = H_{ГВ} + h_{ПВ} + H_{ГН} + h_{ПН} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}, \quad (6.5)$$

где  $H_{ГВ}$ ,  $H_{ГН}$  — геометрическая высота всасывания и нагнетания;  $h_{ПВ}$ ,  $h_{ПН}$  — потери напора во всасывающем и напорном трубопроводах;  $v_1$ ,  $v_2$  — скорости движения жидкости в местах присоединения вакуумметра и манометра (на входе и выходе насоса).

Мощность электродвигателя центробежного насоса определяется по формуле

$$P_H = k_3 \frac{\rho g Q_H (H + \Delta H)}{1000 \eta_H \eta_{П}}, \quad (6.6)$$

где  $k_3$  — коэффициент запаса;  $\Delta H$  — потери напора в трубопроводах насосной установки;  $\rho$  — плотность воды;  $\eta_H$ ,  $\eta_{П}$  — КПД насоса и передачи.

Для центробежных насосов установлена связь между производительностью, напором, электромагнитным моментом, мощностью на валу двигателя и угловой скоростью вращения, которая вытекает из выражений

$$Q_1 = Q_H \left( \frac{\omega_1}{\omega_H} \right); \quad H_1 = H_H \left( \frac{\omega_1}{\omega_H} \right)^2;$$

$$M_1 = M_n \left( \frac{\omega_1}{\omega_n} \right)^2; \quad P_1 = P_n \left( \frac{\omega_1}{\omega_n} \right)^3, \quad (6.7)$$

где  $Q_n, H_n, M_n, P_n$  — номинальные параметры электропривода насоса;  $Q_1, H_1, M_1, P_1$  — измененные параметры электропривода насосного агрегата.

Из соотношений вытекает, что в процессе завышения скорости электродвигателя потребляемая им мощность резко возрастает, а это приводит к росту тока, протекающего по обмоткам, и перегреву электрической машины. Если скорость электропривода будет занижена, то создаваемый им напор может оказаться недостаточным для расчетной подачи.

Тип электродвигателя выбирают исходя из условий окружающей среды и особенностей монтажа. Механическая характеристика центробежного насоса имеет вентиляторный вид (рис. 6.1а, 3) с начальным моментом сопротивления  $M_0 = 0,1 M_n$ .

Подачу насосных установок регулируют включением и отключением одного или нескольких насосных агрегатов, дросселированием задвижки, изменением оборотов вращения электропривода. Наиболее рациональным считается последний способ.

Частоту вращения асинхронного электродвигателя можно изменять варьированием подводимого напряжения, переключением числа пар полюсов, снижением или увеличением сопротивления в роторной цепи или частоты тока в питающей сети. Скорость вращения насосных агрегатов возможно регулировать электромагнитной муфтой скольжения, клиноременной передачей с вариатором и применением многоскоростных электродвигателей.

### **6.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК**

#### **6.3.1. НАЗНАЧЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК**

Вентиляторы предназначены для поддержания качественного состава воздуха в производственных и административных помещениях за счет обеспечения притока чи-

стого и удаления отработанного воздуха, отсасывания газов, поддержания микроклимата, а также подачи кислорода или газа в камеры электропечей, в котельных и других установках. Вентиляторы способны создавать перепад давления в диапазоне  $(0,01-0,1) \cdot 10^5$  Па.

В животноводческих помещениях воздух загрязняется в результате выделения животными различного рода экскрементов, углекислого газа, сероводорода, водяных паров, избыточной теплоты, аммиака и метана, а также за счет механических примесей. Неудовлетворительное поддержание параметров микроклимата в помещениях с содержанием животных приводит к падению молочной продуктивности коров на 10–15%, уменьшению привесов свиней на 20–30%, снижению яйценоскости кур до 20% и эпидемии простудных заболеваний.

Наибольшее негативное воздействие на физиологическое состояние биологических объектов и их продуктивность оказывают два основных фактора — температура и влажность воздуха в помещении.

Различают вентиляционные установки с естественной тягой, с механическим побуждением воздухообмена и комбинированного действия. Вентиляционные системы подразделяются на приточные, вытяжные и смешанные, с подогревом и без подогрева воздушных масс. Приточные системы вентиляции с естественной тягой работают за счет скоростного напора ветра, а вытяжные — за счет разности температур внутри здания и снаружи.

### **6.3.2. КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРОВ**

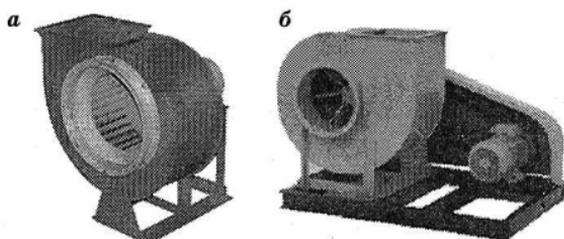
По конструкции вентиляторы делятся на центробежные и осевые. Установки находят широкое применение в промышленности, АПК и в бытовой сфере.

Центробежные вентиляторы выпускаются низкого (не больше 1000 Па), среднего (1000–3000 Па) и высокого (3000–12 000 Па) давления серий ВР, ВЦ, ЦП и Ц. На рисунке 6.3 представлены принципиальные конструкции центробежных вентиляторов.

**Рис. 6.3**

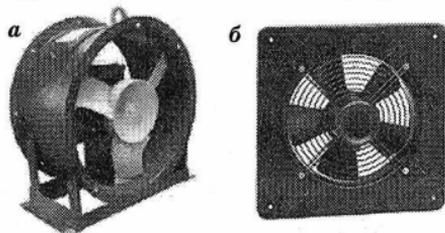
Центробежные вентиляторы:

*а* — низкого и среднего давления;  
*б* — высокого давления.

**Рис. 6.4**

Конструкции осевых вентиляторов:

*а* — вентилятор осевой для охлаждения промышленного оборудования;  
*б* — вентилятор вытяжной настенный.



Рабочее колесо центробежного вентилятора вращается в кожухе. Воздух засасывается через боковое отверстие и выбрасывается в систему воздуховодов через верхний выходной раструб. Конструктивно центробежные вентиляционные установки низкого и среднего давления выпускаются без передаточного механизма, а агрегаты высокого давления изготавливаются с ременной передачей.

Осевые вентиляторы выпускаются следующих марок: *ВО*, *ВОЭ*, *ЕСW*, *AR*, *AW*. На рисунке 6.4 даны конструкции осевых вентиляторов. Осевой вентилятор имеет рабочее колесо с несколькими лопатками. Крыльчатка вращается электродвигателем, укрепленным внутри корпуса, в результате создается тяга воздуха через раструб вентилятора. Осевые вентиляторы являются составной частью приточно-вытяжных установок и устанавливаются на стенах и крышах производственных помещений. В комплексе с различными нагревательными устройствами они применяются для обогрева и сушки помещений и в механизмах тепловых завес.

Механическая характеристика вентиляторов имеет вид параболы (рис. 6.1*а,з*).

### 6.3.3. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Вентилятор — один из самых важных элементов искусственной системы вентиляции. При подборе вентилятора стоит обратить внимание на два основных параметра —

объем подаваемого воздуха (производительность) и давление создаваемого воздушного потока.

Осевые вентиляторы позволяют создавать большое давление на прямолинейных участках воздухопроводов, но не способны обеспечивать высокую производительность.

Если необходимо оснастить вентиляторами разветвленные сети воздухопроводов, то лучше всего подойдут радиальные (центробежные) вентиляторы, которые обладают и достаточным давлением воздушного потока, и значительной производительностью. В свою очередь, для монтажа в приточно-вытяжных системах вентиляции используют канальные вентиляторы. Установка производится непосредственно в вентиляционную систему, так как вентиляторы обладают низкими шумовыми характеристиками. Для систем с механическим побуждением вентиляции промышленных, сельскохозяйственных и общественных зданий используют осевые и центробежные, так называемые крышные вентиляторы.

Крышные вентиляторы устанавливаются на кровле зданий, чтобы они не занимали полезную площадь сооружений. Подача и удаление воздуха происходит через предусмотренные потолочные отверстия, поскольку технологический процесс воздухообмена не предусматривает наличие воздухопроводов.

При выборе осевых и центробежных вентиляторов используется критерий быстроходности

$$m = \frac{53Q^{0,5}\omega}{H^{0,75}}, \quad (6.8)$$

где  $Q$  — производительность вентилятора;  $H$  — расчетное давление (напор).

Если критерий  $m$ , рассчитанный для стандартных синхронных угловых частот вращения ( $\omega = 75, 100, 150, 300$  рад/с), составляет 100 и более, то предпочтительнее укомплектовать вентиляционную установку осевым вентилятором. Комплектация механической системы центробежным вентилятором предусматривается, когда  $m < 100$ .

Мощность на валу электродвигателя вентилятора, потребляемая из сети, находится из выражения

$$P_B = k_3 \frac{QH}{1000\eta_B\eta_{\Pi}}, \quad (6.9)$$

где  $k_3$  — коэффициент запаса по мощности;  $\eta_B$ ,  $\eta_{\Pi}$  — КПД вентилятора и механической передачи.

В зависимости от величины  $P_B$  по каталогу выбирают электродвигатель с номинальной мощностью, равной или ближайшей большей по отношению к расчетной.

Подачу электровентиляционных установок можно регулировать изменением числа подключаемых вентиляторов, площадью сечения воздуховода, частотой вращения двигателя.

Для большинства вентиляционных установок производственных помещений не требуется регулирования скорости приводных двигателей, исходя из этого механические агрегаты укомплектовывают асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями.

## 6.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД СТАЦИОНАРНЫХ ТРАНСПОРТЕРОВ

### 6.4.1. СКРЕБКОВЫЕ ТРАНСПОРТЕРЫ

Скребковые транспортеры входят в состав транспортирующих машин, в которых груз перемещается при помощи движущихся скребков по неподвижному желобу или трубе. В сельскохозяйственном производстве применяются для перемещения зерна, корнеклубнеплодов, силосной массы, грубых кормов и навоза.

Наиболее широкое распространение скребковые транспортеры нашли в технологическом процессе уборки навоза на животноводческих фермах. Навозоудаление является одним из самых трудоемких технологических процессов в животноводстве — в среднем на него приходится 30–50% от всех трудовых затрат в хозяйстве. Одна корова, в зависимости от вида содержания, выделяет в сутки примерно 35–40 кг навоза, причем в период стойлового содержания 85% выделений приходится на поверхность пола. Очистка животноводческих помещений в большинстве средних и мелких российских хозяйств осуществляется вручную.

С помощью технических средств навоз из животноводческих помещений удаляют механическим, гидравлическим и пневматическим способами.

Механический способ предусматривает применение транспортеров навозоудаления. Эффективными средствами механизации уборки навоза в коровниках при привязной системе содержания скота служат скребковые, цепные (ТСН-2,0Б, ТСН-30Б, ТСН-160А, Б), штанговые (ТШ-30-А, ТШПН-4, ШТУ и др.) и шнековые транспортеры, а также скреперные установки.

Скреперные установки УС-10, УС-15 используют при беспривязном, боксовом содержании скота на сплошных бетонных или щелевых полах.

Убирают навоз рассматриваемыми установками за счет возвратно-поступательного движения скребка, который имеется на каждой ветви контура. Для каждой фермы в зависимости от ее размеров, осуществляется подгонка ветвей путем укорачивания длины цепного контура.

Производительность скребкового транспортера рассчитывается по уравнению

$$Q = K_{\alpha} \varphi \gamma B H v, \quad (6.10)$$

где  $K_{\alpha}$  — коэффициент, учитывающий степень заполнения скребков в зависимости от угла наклона;  $\varphi$  — коэффициент заполнения;  $\gamma$  — плотность груза;  $B$  — ширина

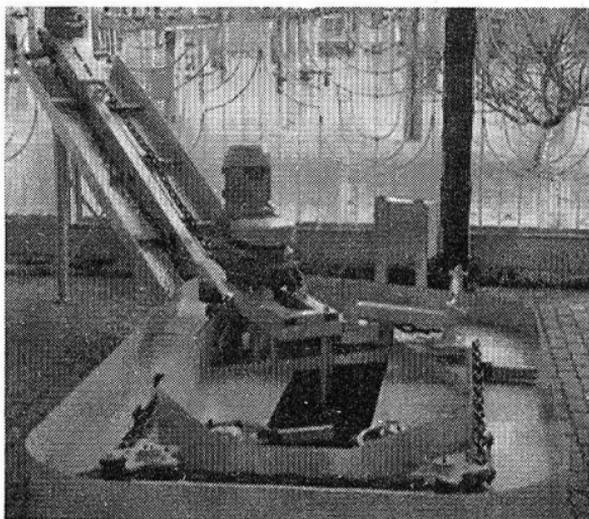


Рис. 6.5  
Общий вид навозоуборочного транспортера ТСН-160

скребка;  $H$  — высота скребка;  $v$  — скорость движения скребков.

На рисунке 6.5 представлен общий вид скребкового транспортера для уборки навоза марки ТСН-160.

Мощность двигателя для скребковых транспортеров определяется по формуле

$$P_c = \frac{k_3 Q}{A \eta_T} (k_c L + H), \quad (6.11)$$

где  $k_c$  — коэффициент сопротивления материала;  $A$  — работа, затрачиваемая на перемещение  $1 \text{ м}^3$  груза;  $L$  — длина ветви;  $H$  — высота подъема;  $\eta_T$  — КПД транспортера.

#### 6.4.2. ШНЕКОВЫЕ ТРАНСПОРТЕРЫ

Шнековые цилиндрические транспортеры — горизонтальные, наклонные, вертикальные — используются для выгрузки, дозирования и транспортировки различных материалов. Передвижные мобильные шнековые конвейеры, изготовленные для сельскохозяйственного производства, применяются в зернохранилищах, силосовых и других складах хранения гранулированных компонентов, а также для перемещения пищевых продуктов, например сахара, муки, картофеля, корнеплодов и т. п. Шнек состоит из привода, корпуса (трубчатого или желобчатого) и транспортировочного винта, находящего внутри корпуса. Сцепление цилиндрических модулей корпуса осуществляется путем скрепления промежуточных фланцев, а возможность удлинения спирали шнека достигается установкой промежуточных опор. При попадании сыпучего или гранулированного вещества через отверстие, расположенное в начале корпуса, вовнутрь продукт при помощи винта перемещается в противоположный конец транспортера и выходит наружу через специальное отверстие. Благодаря использованию модульной структуры предлагаемые шнеки могут быть практически любой длины.



Рис. 6.6  
Внешний вид шнекового цилиндрического транспортера

На рисунке 6.6 представлена конструкция шнекового транспортера.

Производительность шнека рассчитывается из выражения

$$Q = 0,25\pi(D^2 - d^2)sn\gamma\kappa_v\psi k_c, \quad (6.12)$$

где  $D$  — наружный диаметр винта;  $d$  — диаметр вала винта;  $s$  — шаг винта;  $n$  — обороты вращения шнека;  $\gamma$  — насыпная плотность;  $\kappa_v$  — коэффициент отставания осевой скорости материала от осевой скорости образующей шнека;  $\psi$  — коэффициент заполнения винта;  $k_c$  — коэффициент снижения производительности с увеличением угла наклона транспортера к горизонту.

Мощность электродвигателя привода шнекового транспортера:

$$P_{ш} = \frac{9,81kQ}{\eta_{ш}}(fL + H), \quad (6.13)$$

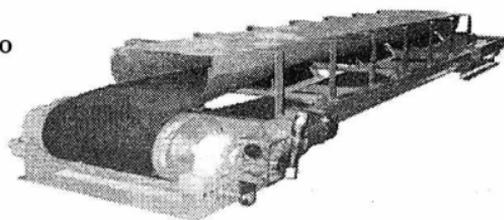
где  $k$  — коэффициент, учитывающий угол наклона транспортера;  $f$  — коэффициент сопротивления перемещения материала о кожух;  $L$  — длина транспортера;  $H$  — высота транспортера;  $\eta_{ш}$  — КПД передачи.

### 6.4.3. ЛЕНТОЧНЫЕ ТРАНСПОРТЕРЫ

Ленточные транспортеры предназначены для перемещения сыпучих, кусковых, штучных грузов, а также падающего горизонтального и полого-наклонного до  $15^\circ$  транспортирования зерна и продуктов его переработки. Широко используются на зерноперерабатывающих предприятиях, в приемных отделениях железнодорожного и автомобильного транспорта, а также в надсилосных и подсилосных галереях элеваторов, мельниц, крупяных, комбикормовых, маслоэкстракционных заводов и других предприятиях, связанных с приемом, хранением и переработкой зерна, масличных культур и приготовлением различного вида кормов.

Конвейеры предназначены для работы на открытом воздухе, под навесом, а также в неотопливаемых помеще-

**Рис. 6.7**  
Конструкция ленточного  
транспортера



ниях. Изготавливаются как в открытом, так и в закрытом исполнении.

Основной характеристикой ленточного транспортера является его производительность, на которую влияет множество факторов, но основной из них — это скорость движения ленты. Производят конвейеры со скоростью ленты от 0,2 до 3 м/с и с производительностью до 4000 м<sup>3</sup>/ч. Длина выпускаемых устройств составляет от 3 до 800 м.

На рисунке 6.7 представлен общий вид ленточного транспортера.

Приводная система ленточного транспортера состоит из электродвигателя, редуктора, ведущего барабана и натяжной станции.

Лента поддерживается равномерно расположенными по длине транспортера роликовыми опорами.

Производительность ленточного конвейера рассчитывается:

$$Q = \gamma v F, \quad (6.14)$$

где  $\gamma$  — насыпная плотность материала;  $v$  — скорость движения ленты;  $F$  — площадь поперечного сечения слоя материала на ленте.

Мощность электродвигателя ленточного транспортера находится:

$$P_{\text{л}} = \frac{k_3 Q}{1000 \eta_{\text{т}}} (CL + H), \quad (6.15)$$

где  $C$  — опытный коэффициент, зависящий от производительности транспортера и его длины.

Выпускают ленточные конвейеры легкого и нормального исполнения серии КЛ — стационарные; типа КЛ(Б) — стационарные, безроликовые; марки КЛ(П) — передвижные, для штучных грузов, комбикорма, зерна (ширина

ленты до 800 мм) на предприятиях агропромышленного комплекса. Специальное исполнение конвейеров КЛ(Ц) — ленточно-цепные для мусороперерабатывающих предприятий. Ленточные конвейеры тяжелого исполнения типа УКЛС — стационарные, УКЛС(М) — модульные, передвижные с шириной ленты от 500 до 2000 мм для перемещения кусковых и сыпучих грузов с насыпной плотностью до 3,5 т/м<sup>3</sup>.

#### 6.4.4. НОРИИ — КОВШОВЫЕ ЭЛЕВАТОРЫ

Нории (ковшовые элеваторы) предназначены для подъема сыпучих материалов в вертикальном направлении.

Нории зерновые могут использоваться для перемещения зерна и продуктов его переработки. Нория — простой по конструкции унифицированный транспортер, представляющий собой ковшовый элеватор, основная функция которого — перемещение сыпучих материалов, применяемых на различных промышленных производствах и в сельском хозяйстве. Нории входят в состав технологических линий зерносушилок, элеваторов и маслозаводов, используются при погрузке судов в портах.

Отечественные предприятия производят нории типа Н (ленточные) и нории типа НЦ (цепные), тяговым органом которых является лента или цепь с закрепленными на ней ковшами.

Выпускаемые производителями нории имеют следующие технические характеристики: максимальная высота подъема от 6 до 20 м; производительность по зерну при насыпной плотности ( $\gamma = 750$  кг/м<sup>3</sup>) и влажности 14% не менее 50–100 т/ч; скорость перемещения ленты 1–2 м/с; максимальная установленная мощность мотор-редуктора не более 4 кВт.

Элеватор состоит из замкнутого гибкого тягового органа (цепи или прорезиненной ленты), огибающего верхние приводные и нижние натяжные звездочки или барабаны. Рабочие органы — ковши прикреплены болтами к цепям или ленте. Натяжение тягового органа регулируют винтовым устройством. Ковши загружаются в башмаке и раз-

гружаются в головке. Нории чувствительны к перегрузкам и требуют равномерной загрузки, приводятся в действие электродвигателем.

На рисунке 6.8 даны конструкции зерновых норий.

Производительность ковшового элеватора определяется по формуле

$$Q = \frac{\varphi}{l} i v \gamma, \quad (6.16)$$

где  $\varphi$  — коэффициент наполнения ковшей;  $l$  — расстояние между ковшами;  $i$  — вместимость одного ковша;  $\gamma$  — насыпная плотность материала;  $v$  — скорость движения ковшей.

Мощность электродвигателя, входящего в состав привода нории:

$$P_n = \frac{9,81QH}{\eta_n \eta_{\text{п}}}, \quad (6.17)$$

где  $H$  — высота подъема материала.

Производительность нории возрастает с увеличением оборотов вращения двигателя до определенного предела. Превышение необходимого предела снижает коэффициент заполнения ковшей. Момент сопротивления трогания под нагрузкой может превышать номинальный электромагнитный момент до 35%. Для облегчения пуска перед остановкой закрывают заслонку загрузочного окна, а затем после схода продукта останавливают привод.

## 6.5. ЭЛЕКТРОПРИВОД КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

### 6.5.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Широкое внедрение в народное хозяйство крановых механизмов с энергосберегающим электроприводом — один из рациональных методов проведения современной комп-

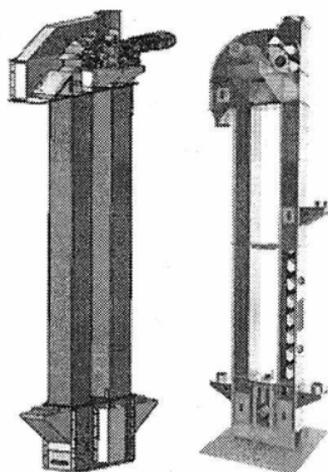


Рис. 6.8  
Разновидности конструкций зерновой нории

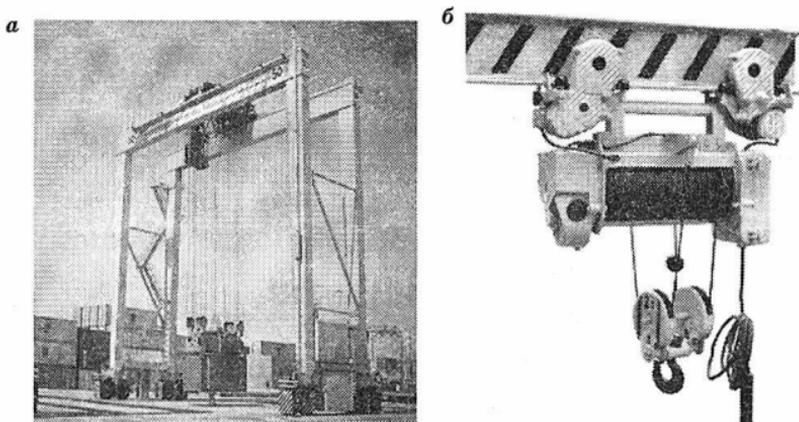
лексной механизации, автоматизации, электрификации и роботизации всех отраслей промышленности, коммерческой, торговой деятельности и сельского хозяйства.

Дальнейшее развитие агропромышленного комплекса страны не представляется без интенсивного повышения производительности труда и ухода от выполнения грубых и физически тяжелых видов работ. Улучшение условий труда возможно с помощью использования большого многообразия грузоподъемных агрегатов, выполняющих перемещение грузов в самых разнообразных сельскохозяйственных отраслях, а также на железнодорожном и автомобильном транспорте. Автоматизированные механизмы для подъема выполняют погрузочно-разгрузочные работы, передвижение материалов на территории производства, строительства, складских помещений и ремонтных мастерских.

Электрические подъемные краны по особенностям конструкции, назначению и условиям работы разделяются на мостовые, порталные, козловые, башенные, кран-балки, тали и др.

На рисунке 6.9 представлены наиболее распространенные крановые механизмы, используемые в сельскохозяйственном производстве.

С помощью подъемных механизмов выполняются вертикальные и горизонтальные перемещения различных



**Рис. 6.9**  
Примеры конструкций крановых механизмов:  
*а* — козловой кран; *б* — электрическая таль.

грузов. Главным элементом электрического крана является подвижная металлическая конструкция, оснащенная подъемной лебедкой, приводящаяся в движение от электропривода на основе постоянного или переменного тока.

Подъемный механизм является машиной циклической работы, предназначенной для подъема и перемещения грузов и разнообразных материалов. Груз удерживается с помощью грузозахватного механизма, называемого крюком или грейфером. Такой тип грузоподъемного механизма получил очень широкое распространение и в зависимости от требований технических условий выполняется в самых разнообразных конструктивных исполнениях.

#### **6.5.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАНИЗМОВ КРАНОВ**

Согласно действующим стандартам, в зависимости от условий эксплуатации, характера нагрузки и степени использования все крановые механизмы по режиму работы механического и электрического оборудования делятся на четыре категории: Л — легкий режим работы, С — средний, Т — тяжелый, ВТ — весьма тяжелый.

Основными показателями, по которым судят о режиме работы, является продолжительность включения двигателя механизмов, число включений электродвигателя в час, количество дней работы устройств в течение года и продолжительность работы грузоподъемных машин за одни сутки.

Характерно для кранов, что все их механизмы работают в повторно-кратковременном режиме, когда относительно непродолжительные периоды работы, связанные с перемещением грузов, чередуются с паузами, возникающими из-за процессов загрузки и разгрузки грейферов. Нагрузка элементов подъема изменяется от 0,12 до 1, а устройств передвижения — от 0,5 до 1 номинальных значений.

Для качественного выполнения подъема, спуска и перемещения грузов электропривод крановых механизмов должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- регулирование угловой скорости электропривода в сравнительно широких диапазонах в связи с тем, что тяжелые грузы необходимо перемещать с меньшей скоростью, а пустой крюк — с высокой;
- обеспечение необходимой жесткости механических характеристик привода, чтобы работа на низких скоростях не зависела от груза;
- ограничение ускорений до допустимых пределов при минимальной длительности переходных процессов;
- реверсирование электропривода и обеспечение работы, как в двигательном, так и тормозном режимах.

### 6.5.3. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОПРИВОДА КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Для привода крановых механизмов возможно применение различных двигателей и систем электропривода. Выбор привода определяется грузоподъемностью, номинальной скоростью движения, требуемым диапазоном регулирования угловой скорости вращения, жесткостью механических характеристик, числом включений в час и т. д.

Наибольшее распространение на кранах получил электропривод с асинхронными двигателями с короткозамкнутым и фазным ротором.

Перегрузочная способность крановых электродвигателей с контактными кольцами при продолжительности включения ПВ = 25% изменяется от 2,5 до 3,4.

Привод с фазным ротором позволяет регулировать угловую скорость за счет изменения сопротивления, вводимого в электрические цепи обмотки ротора. Однако при всем многообразии положительных достоинств рассматриваемого вида электропривода он не обеспечивает необходимую жесткость регулировочных характеристик и устойчивую работу на пониженных скоростях вращения.

Если требуется обеспечить повышенный диапазон регулирования скорости вращения всех элементов электропривода, ограничение стопорного момента и плавное протекание переходных процессов, то применяют электропривод по системе ГД.

Когда возникает необходимость обеспечить низкие устойчивые угловые скорости вращения в различных режимах работы крановых устройств, то применяются электродвигатели постоянного тока, несмотря на сложность их устройства, ограниченный срок службы и отсутствие широко разветвленных сетей с источником постоянного тока.

С интенсивным развитием полупроводниковой техники в последнее время для регулирования оборотов вращения ротора используют асинхронные электроприводы с частотными или тиристорными преобразователями электрической энергии. Оборудование устанавливается непосредственно на крановом механизме и подключается к сети трехфазного переменного напряжения с частотой питающего тока 50 Гц. Преобразователи имеют высокие энергетические и экономические показатели, повышенную механическую прочность, высокую надежность и длительный срок эксплуатации.

#### **6.5.4. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Для привода крановых механизмов выпускаются специальные электрические двигатели, рассчитанные на работу в повторно-кратковременном режиме. Такие электродвигатели отличаются от общепромышленных серий повышенной прочностью конструкции, высокой перегрузочной способностью, более нагревостойкой изоляцией и меньшим моментом инерции ротора.

Основным режимом работы крановых двигателей является режим при  $PВ = 25\%$ .

Режим работы крановых механизмов — важный фактор при выборе мощности приводных электродвигателей, аппаратуры и системы управления. От него зависит и конструктивное исполнение механизмов.

Выбор мощности двигателя механизма, например кранбалки, производят, исходя из нагрузочной диаграммы за один цикл работы. В ряде случаев построение точной нагрузочной диаграммы вызывает большое затруднение из-за часто меняющихся операций. Исходя из этого основой для выбора мощности электрического двигателя может

служить расчетный цикл, в состав которого входят четыре наиболее часто выполняющиеся операции: подъем и спуск груза и пустого грузозахватывающего приспособления, а для устройства передвижения тележки — две операции: передвижение с грузом в прямом и без груза в обратном направлениях.

Расчет мощности начинают с определения времени работы электропривода на каждой операции.

Продолжительность любой операции рассчитывается по формуле

$$t_i = \frac{L}{v_n}, \quad (6.18)$$

где  $L$  — длина пути;  $v_n$  — номинальная скорость движения.

Суммарное время работы механизма за один цикл определяется из уравнения

$$t_{\Sigma} = nt_i, \quad (6.19)$$

где  $n$  — количество операций.

Суммарное время пауз находится из выражения

$$\Sigma t_{\Pi} = \frac{t_{\Sigma}(100 - \text{ПВ}_p)}{\text{ПВ}_p}, \quad (6.20)$$

где  $\text{ПВ}_p$  — расчетная продолжительность включения.

Время работы кранового механизма за полный цикл:

$$t_{\Pi} = t_{\Sigma} + \Sigma t_{\Pi}. \quad (6.21)$$

Расчет мощности электродвигателя привода кранового механизма невозможен без нахождения статической мощности, связанной с возникновением момента сопротивления под действием сил тяжести и трения при работе кранового устройства.

Статическая мощность на валу двигателя в установившемся режиме при подъеме затрачивается на перемещение груза и на преодоление сил трения:

$$P_c = \frac{(G + G_0)v_{\Pi}}{1000\eta}, \quad (6.22)$$

где  $G$ ,  $G_0$  — силы тяжести поднимаемого груза и грейфера;  $v_{\Pi}$  — скорость подъема груза;  $\eta$  — КПД подъемного механизма.

При подъеме пустого крюка статическая мощность рассчитывается:

$$P_{c0} = \frac{G_0 v_{п0}}{1000 \eta_0}, \quad (6.23)$$

где  $v_{п0}$  — скорость подъема пустого крюка;  $\eta_0$  — КПД механизма при работе без нагрузки.

В установившемся режиме спуска статическая мощность на валу двигателя равна разности мощностей, обусловленных действием силы тяжести опускаемого груза и сил трения, возникающих в механизме:

$$P_c = P_{гр} - P_{тр}, \quad (6.24)$$

где  $P_{гр}$  — мощность, обусловленная действием груза;  $P_{тр}$  — мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения.

Входящие в уравнение (6.24) значения статических мощностей рассчитываются из выражений

$$P_{гр} = \frac{(G + G_0) v_c}{1000};$$

$$P_{тр} = \frac{(G + G_0) v_c}{1000 \eta} (1 - \eta), \quad (6.25)$$

где  $v_c$  — скорость спуска.

Статическая мощность на валу электродвигателя передвижения тележки в установившемся режиме работы:

$$P_c = k_1 \frac{(G + G_0 + G_{гр})(k_2 R_1 + f)}{1000 R_2 \eta_T} v_T, \quad (6.26)$$

где  $k_1, k_2$  — коэффициенты, учитывающие сопротивление, возникающее при движении ходовых колес о рельсы и в их опорах;  $G_{гр}$  — суммарная сила тяжести, возникающая при движении груза, захватывающего устройства и тележки;  $R_1, R_2$  — радиусы шейки оси ходового колеса и самого колеса;  $\eta_T$  — КПД механизма передвижения тележки кранбалки;  $v_T$  — скорость движения тележки;  $f$  — коэффициент трения качения ходовых колес о рельсы.

Зная время работы электропривода на каждой операции и статическую мощность, затрачиваемую на выполнение работы, можно построить нагрузочную диаграмму, например за один цикл  $P_c = f(t_i)$ .

Исходя из нагрузочной диаграммы, определяется эквивалентная статическая мощность на валу электрического двигателя:

$$P_{с экв} = \sqrt{\left(\frac{\sum P_{ci} t_i}{\sum t_{\Sigma}}\right) \left(\frac{ПВ_p}{ПВ_n}\right)}, \quad (6.27)$$

где  $\sum P_{ci}$  — суммарная статическая мощность;  $ПВ_n$  — стандартная продолжительность включения.

После расчета эквивалентной статической мощности по каталогу выбирается стандартная номинальная мощность электродвигателя с учетом неравенства

$$P_n \geq k_3 P_{с экв}, \quad (6.28)$$

где  $k_3$  — коэффициент запаса по мощности, учитывающий дополнительную загрузку двигателя в периоды пуска и электрического торможения.

Эквивалентный электромагнитный момент двигателя за суммарное время работы вычисляется по уравнению

$$M_{экв} = \sqrt{\left(\frac{\sum M_{ci}^2 t_i + \sum M_{п(m)cp_i}^2 t_{п(m)_i}}{t_{\Sigma} + 0,75 \sum t_{п(m)_i}}\right) \left(\frac{ПВ_{\phi}}{ПВ_n}\right)}, \quad (6.29)$$

где  $M_{ci}$  — статический момент двигателя в момент переходного процесса на каждой операции;  $M_{п(m)cp_i}$  — среднее значение момента двигателя при запуске или торможении;  $t_{п(m)_i}$  — время пуска или торможения;  $ПВ_{\phi}$  — фактическая продолжительность включения, найденная из нагрузочной диаграммы.

Эмпирический коэффициент 0,75 учитывает ухудшение условий охлаждения двигателя с самовентиляцией; для двигателя с независимой вентиляцией данный коэффициент равен 1.

Статический момент сопротивления находят из формулы

$$M_c = \frac{P_c R}{v i_p i_n} 10^3, \quad (6.30)$$

где  $R$  — радиус барабана подъемной лебедки или ходового колеса;  $i_p$ ,  $i_n$  — передаточные числа редуктора и полиспаста;  $v$  — скорость движения крюка или тележки.

Расчетная угловая скорость электродвигателя определяется как

$$\omega_p = \frac{v_n i_p i_{II}}{R}, \quad (6.31)$$

где  $v_n$  — номинальная скорость движения механизма.

Окончательную проверку выбранного двигателя по нагреву выполняют, исходя из неравенства моментов:

$$M_n \geq M_{\text{экр}}. \quad (6.32)$$

Выбранный по допустимой температуре нагрева электродвигатель проверяют по условиям возможной кратковременной перегрузки и надежности запуска.

Перегрузочная способность электродвигателя должна обеспечивать статическую и динамическую устойчивость работы привода при возникновении повышенного момента сопротивления нагрузки и снижении питающего напряжения на 7,5%.

## 6.6. ЭЛЕКТРОПРИВОД КОРМОПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

### 6.6.1. ВИДЫ КОРМОВ И МАШИНЫ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И ДРОБЛЕНИЯ

Различают корма растительного и животного происхождения, а также минеральные вещества и витаминные добавки. Корма растительного происхождения подразделяются на грубые: сено, солома, мякина, сенаж, стебли кукурузы, сочные и концентрированные. К сочным кормам относятся: корнеклубнеплоды, бахчевые культуры, ботва и силос. В состав группы концентрированных кормов входят, например, зерно, жмых и др.

Корма в естественном виде часто не соответствуют зоотехническим требованиям, поэтому для повышения их качества необходима предварительная подготовка механическим, химическим, тепловым и биологическим способами, которые применяют отдельно или в сочетании — соответственно выбранной технологии.

В технологиях подготовки кормов доминируют механические способы: резка, дробление, размалывание и др.,

которые создают предпосылки для осуществления последующих операций, например, дозирования и смешивания в определенных пропорциях размельченных компонентов.

Для измельчения кормов резанием применяют механические корморезки: ЭКР-1, ОРБ-2, КПИ-4, а также электрокорморезки: ЭКОР-1, ИКМ-5, ИКГ-30Б, «Волгарь-5М», ИСК-3, ИРТ-165, РСС-6Б. Основным элементом электрифицированных машин является электропривод. Мощность электродвигателей, входящих в состав рассматриваемых агрегатов, изменяется от 10 до 40 кВт.

### 6.6.2. МАШИНЫ ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ КОРМОВ

Машины данной группы применяются в технологических линиях для приготовления концентрированных кормов, но могут быть использованы и отдельно.

По назначению машины для дробления подразделяются на универсальные и специальные.

В сельском хозяйстве широко применяют дробилки марок КДУ-2,0, КДМ-2,0, и ДКМ-5, а также дробилки-измельчители ИРТ-Ф-80-1, Ф-1М.

По разновидности технологического процесса, протекающего в измельчительных установках, дробилки подразделяются на разомкнутого и замкнутого циклов.

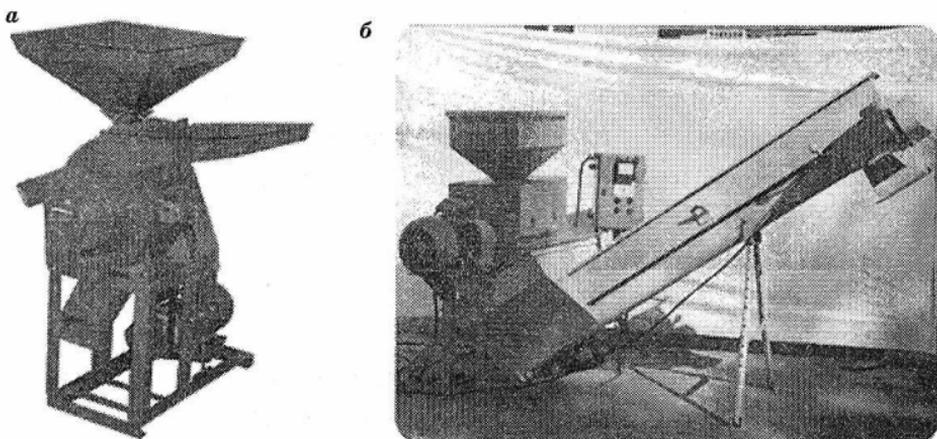


Рис. 6.10

Машины для дробления и измельчения кормов:

*a* — универсальная дробилка ДКУ-1,2М; *б* — агрегат для измельчения всех видов стебельных и зерновых кормов.

В устройствах разомкнутого вида засыпаемый в приемный бункер материал за один оборот вращения измельчается за счет удара молотильных устройств и выводится в емкость приемки. Машины замкнутого вида работают по принципу центрифуги. В этих установках продукты дробления циркулируют внутри барабана, подвергаясь механическому измельчению до необходимых размеров, и только после этого высыпаются в приемную тару.

На рисунке 6.10 представлены машины для дробления и измельчения кормов.

По конструкции дробилки делятся на одно- и двухбарабанные, с радиальным, тангенциальным или центральным подводом материала. Подача измельчаемых кормов может осуществляться принудительно или под действием силы тяжести. Отвод готового продукта выполняется либо вентилятором, либо самотеком.

Каждая дробилка имеет дробильную камеру с загрузочным устройством, которое может иметь очистители, сепараторы и другие механические элементы. По внутренней поверхности дробильной камеры расположены дека и решето.

Для измельчения концентрированных кормов системой ударного действия используется ротор с молотками, подвешенными на специальных шарнирах.

### 6.6.3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ КОРМОВ

Мощность электропривода находится из выражения

$$P = P_p + P_{\text{ц}} + P_{\text{хх}}, \quad (6.33)$$

где  $P_p$  — мощность, расходуемая на разрушение материала;  $P_{\text{ц}}$  — мощность, затрачиваемая на циркуляцию материала;  $P_{\text{хх}}$  — мощность холостого хода.

Мощность, расходуемая на разрушение продукта:

$$P_p = A_p Q_n, \quad (6.34)$$

где  $A_p$  — удельная работа, расходуемая на измельчение материала;  $Q_n$  — производительность дробилки.

Удельная работа на разрушение-измельчение материала:

$$A_p = C_1 \lg \lambda^3 + C_2 (\lambda - 1), \quad (6.35)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — экспериментальные коэффициенты для конкретных культур;  $\lambda$  — степень измельчения корма.

Мощность, расходуемая на циркуляцию материала:

$$P_{ц} = K_{в} (1 + K_{ц} \mu_{ц}) \omega_{м}^{-3}, \quad (6.36)$$

где  $K_{в}$  — коэффициент, учитывающий конструкцию и режим работы вентилятора дробилки;  $K_{ц}$  — коэффициент кратности циркуляции материала;  $\mu_{ц}$  — коэффициент концентрации материала;  $\omega_{м}$  — угловая скорость вращения ротора.

Мощность холостого хода:

$$P_{хх} = (1,15-1,2) P_p. \quad (6.37)$$

Удельный расход энергии необходимо определять, чтобы выяснить, насколько эффективно используется мощность электродвигателя:

$$W = \frac{P}{Q}, \quad (6.38)$$

где  $Q$  — производительность дробилки.

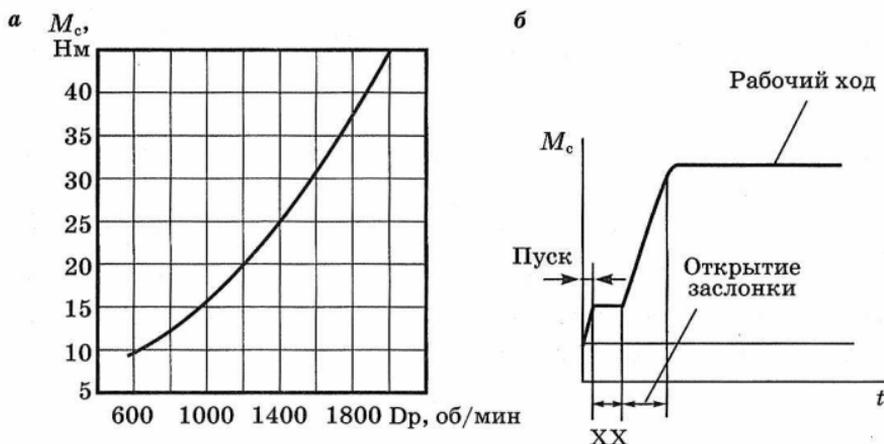


Рис. 6.11

Характеристики дробилки:

$a$  — механическая;  $b$  — нагрузочная.

Удельная производительность дробилки связана с общей эффективностью работы:

$$\varepsilon = \frac{Q}{P}. \quad (6.39)$$

Степень неравномерности вращения барабана:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{ср}}}, \quad (6.40)$$

где  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$ ,  $\omega_{\text{ср}}$  — соответственно максимальная, минимальная и средняя частота вращения барабана.

Механическая и нагрузочная характеристики рабочей машины представлены на рисунке 6.11.

#### 6.6.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ КОРМОВ

Для измельчения стебельных кормов используются агрегаты РСС-6 Б и ИГК-30 Б. В качестве оценочных критериев для определения характера нагрузки со стороны рабочего органа на привод приняты  $M_{\min}$ ,  $M_{\max}$ ,  $M_{\text{ср}}$  — соответственно минимальный, максимальный и средний моменты сопротивления.

Когда выполняется неравенство

$$\frac{M_{\text{ср}}}{2} \geq M_{\max} - M_{\min}, \quad (6.41)$$

то нагрузка считается равномерной, и мощность двигателя рассчитывают по среднему моменту сопротивления  $M_{\text{ср}}$ .

Если выполняется неравенство вида

$$\frac{M_{\text{ср}}}{2} < M_{\max} - M_{\min}, \quad (6.42)$$

то нагрузка считается неравномерной, и мощность электродвигателя необходимо рассчитывать по эквивалентному моменту сопротивления

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{(M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_n^2) \Delta\psi}{\psi_{\text{раб}}}}, \quad (6.43)$$

где  $M_1, M_2, \dots, M_n$  — текущие значения моментов сопротивления;  $\Delta\psi$  — интервал угла поворота диска;  $\psi_{\text{раб}}$  — рабочий угол поворота барабана.

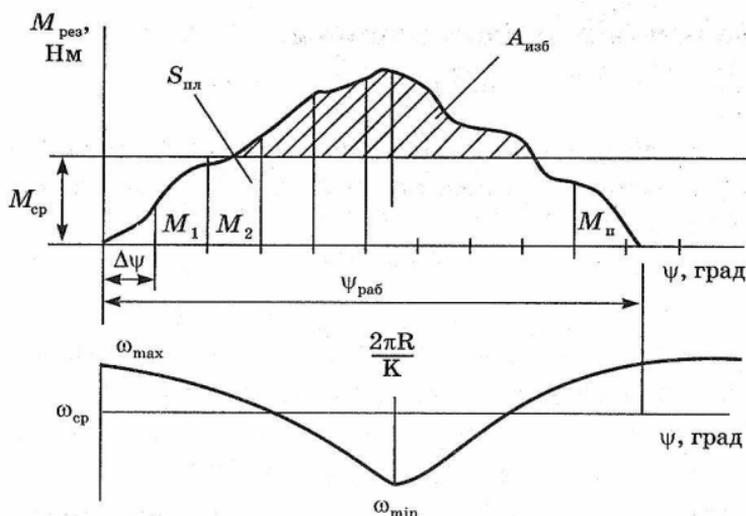


Рис. 6.12

Диаграмма моментов резания и угловой скорости рабочего барабана

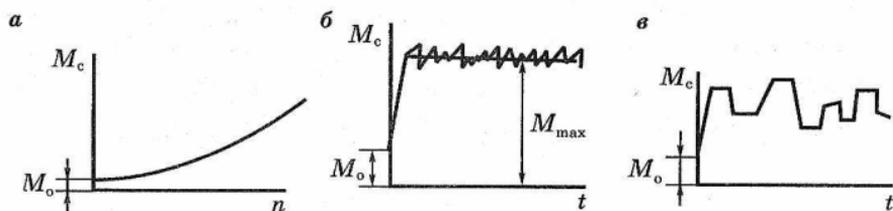


Рис. 6.13

Характеристики измельчителей:

*a* — механическая; *б* — нагрузочная при равномерной нагрузке; *в* — нагрузочная при неравномерной нагрузке.

Параметры  $M_1, M_2, \dots, M_n$  берутся из нагрузочной диаграммы, изображенной на рисунке 6.12, из которой видно, что максимальному значению момента резания соответствует минимальная величина угловой скорости вращения барабана.

Средний момент рассчитывается:

$$M_{\text{ср}} = \frac{SM_{\mu}M_{\psi}}{\pi}, \quad (6.44)$$

где  $S$  — площадь диаграммы;  $M_{\mu}, M_{\psi}$  — масштабы моментов по оси ординат и абсцисс.

Вращающий момент машины:

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{экв}} + M_{\text{под}} + M_{\text{хх}}, \quad (6.45)$$

где  $M_{\text{под}}$  — момент на валу измельчителей, обусловленный сопротивлением механизма подачи;  $M_{\text{хх}}$  — момент холостого хода.

Соотношение составляющих моментов:

$$M_{\text{экв}} : M_{\text{под}} : M_{\text{хх}} = 3 : 1 : 1. \quad (6.46)$$

Электромагнитный момент двигателя:

$$M_{\text{эл}} = 1,7 M_{\text{экв}}. \quad (6.47)$$

Мощность двигателя для привода измельчителя:

$$P = \omega M_{\text{эл}} = \frac{\pi n}{30} M_{\text{эл}}. \quad (6.48)$$

Для машин, использующихся в качестве измельчителей кормов, так же, как и для агрегатов дробления, вводится понятие степени неравномерности вращения барабана. Например, для соломосилосорезки степень неравномерности вращения должна быть в пределах 3–7%.

Степень неравномерности вращения барабана:

$$\delta = \frac{A_{\text{изб}}}{J \omega_{\text{ср}}^2}. \quad (6.49)$$

Момент инерции маховика рассчитывается по формуле

$$J = \frac{A_{\text{изб}}}{\delta \omega_{\text{ср}}^2}. \quad (6.50)$$

Механическая и нагрузочная характеристики показаны на рисунке 6.13.

## 6.7. ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

### 6.7.1. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Одним из важных вопросов электрооборудования металлорежущих станков является выбор типа электропривода для выполнения основных и вспомогательных дви-

жений. На правильный выбор электрического привода влияют следующие факторы: диапазон регулирования скорости вращения, характер нагрузки, частота включений привода, энергетические показатели работы электропривода, надежность и простота в эксплуатации.

Механические характеристики электродвигателей главных приводов должны быть жесткими. Перепад угловой скорости в процессе изменения нагрузки на валу двигателя не должен превышать 5–10% при переходе от режима холостого хода до номинальной нагрузки.

Электроприводы подачи характеризуются значительным изменением угловой скорости вращения (1000 : 1) при постоянном моменте сопротивления на валу двигателя.

В станках применяются следующие типы приводов подачи: от главного привода через механическую передачу; от отдельного электрического двигателя; от гидропривода.

Для главных приводов токарных, фрезерных, расточных и других металлообрабатывающих станков с нечастыми включениями и небольшим диапазоном регулирования угловых скоростей вращения используют трехфазные короткозамкнутые асинхронные электродвигатели или применяют многоскоростные двигатели. В тех случаях, когда требуется плавное изменение подачи, на металлорежущие станки устанавливают двигатели постоянного тока.

В последнее время в станках с программируемым управлением используют сервоприводы и линейные электрические машины.

#### **6.7.2. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ**

Современные токарные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) применяются для обработки наружных и внутренних заготовок и деталей типа тел вращения. На токарных станках с ЧПУ производят следующие токарные работы: точение, отрезка и торцевание, сверление, нарезание резьбы, растачивание отверстий, а также на токарно-фрезерных устройствах с ЧПУ (токарных обрабатывающих центрах): фрезерование, гравиро-

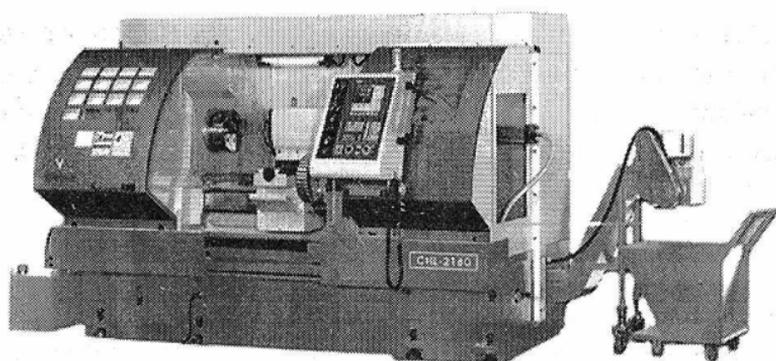


Рис. 6.14  
Общий вид токарного станка с ЧПУ

вание, маркировка и т. д. Станки с числовым программным управлением зарекомендовали себя как эффективное автоматизированное оборудование, позволяющее достигать высоких технических и экономических показателей. В настоящее время выпускаются станки с числовым программным управлением следующих марок: *L*, *SK*, *CAK*, *NL*, *LT* и т. д. На рисунке 6.14 представлен общий вид токарного станка с ЧПУ.

Каждый вид обработки на металлорежущих станках характеризуется оптимальными по производительности значениями скоростей, усилий и мощностей. Параметры процесса обработки деталей на токарных станках: скорость, усилие, мощность резания — определяются по специальным картам технологических нормативов или по теоретическим формулам с экспериментальными коэффициентами. Расчет начинают с выбора марки инструментального материала, геометрической формы режущей части инструмента, значения глубины резания и величины подачи.

Скорость резания при точении вычисляется из уравнения

$$v = \frac{C_1}{T^m t^x S^y}, \quad (6.51)$$

где  $C_1$  — коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал, вид токарной обработки;  $T$  — стойкость резца (время между двумя соседними заточками);  $t$  — глубина резания;  $S$  — подача;  $m$ ,  $x$ ,  $y$  — показатели степени

зависят от свойств обрабатываемого материала, материала резца и вида обработки ( $m = 0,1-0,2$ ;  $x = 0,15-0,2$ ;  $y = 0,35-0,8$ ).

Усилие резания при точении рассчитывается по формуле

$$F_z = 9,81 C_F t^{X_1} S^{Y_1} v^\chi, \quad (6.52)$$

где  $C_F$  — коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал, материал резца, вид токарной обработки;  $X_1, Y_1$  — показатели степени ( $X_1 = 1$ ;  $Y_1 = 0,75$ );  $\chi$  — показатель степени зависит от вида резцов.

Мощность резания подсчитывается по формуле

$$P_z = \frac{F_z v}{60 \cdot 10^3}. \quad (6.53)$$

Суммарное усилие подачи:

$$F_{\Pi} = k F_x + (F_z + F_y + G_c) f, \quad (6.54)$$

где  $k$  — коэффициент запаса, учитывающий перекосы;  $f$  — коэффициент трения при движении суппорта;  $G_c$  — вес суппорта;  $F_x, F_y, F_z$  — усилия: горизонтальное, радиальное, вертикальное.

Мощность подачи при резании находится из выражения

$$P_{\Pi} = \frac{F_{\Pi} v_{\Pi}}{60 \cdot 10^3}, \quad (6.55)$$

где  $v_{\Pi}$  — скорость подачи.

Так как скорость подачи во много раз меньше скорости резания, то и мощность подачи мала по сравнению с мощностью резания:  $P_{\Pi} \approx (0,001 - 0,01) P_z$ .

Расчет мощности электроприводов станков необходим для правильного выбора двигателей. Если мощность двигателя завышена, увеличиваются потери электропривода и ухудшаются энергетические показатели. В противном случае двигатель оказывается перегруженным, быстро выходит из строя и требует ремонта.

Мощность на валу главного привода в установившемся режиме работы с учетом потерь в передачах определяется по формуле

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_z}{\eta_{\text{ст}}}, \quad (6.56)$$

где  $\eta_{\text{ст}}$  — КПД станка.

В номинальном режиме работы мощность рассчитывается из уравнения

$$P_{\text{н}} = \frac{P_{z\text{н}}}{\eta_{\text{ст н}}}. \quad (6.57)$$

Для расчета мощности токарных станков в повторно-кратковременном режиме работы применяют метод средних потерь мощности с использованием нагрузочных диаграмм привода. Построение нагрузочных диаграмм производится с учетом технологических операций, которые наиболее часто выполняются на токарных станках.

### 6.7.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ СВЕРЛИЛЬНЫХ СТАНКОВ

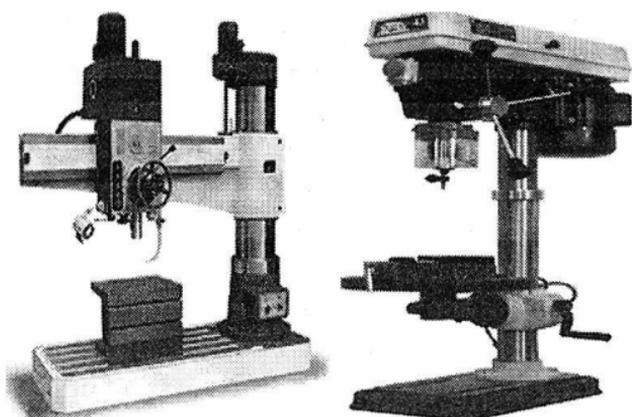
Сверлильные станки предназначены для сверления глухих и сквозных отверстий в сплошном материале, рас-сверливания, зенкерования, развертывания, нарезания внутренней резьбы и вырезания дисков из листового материала.

К электроприводу сверлильных станков предъявляются следующие требования: привод шпинделя должен быть реверсивным, схема управления обязана ограничивать перемещение траверсы, обеспечение блокировки электродвигателя перемещения траверсы, не допускается работа станка с незажатой колонной. Отечественная промышленность выпускает сверлильные станки типа 2М, ГС, СН, МН, 2К и т. д. На рисунке 6.15 представлены разновидности сверлильных станков.

Нормативная скорость резания определяется по формуле

$$v = \frac{C_v d^z}{T^m S^y}, \quad (6.58)$$

где  $C_v$  — коэффициент, зависящий от материала изделия и сверла;  $d$  — диаметр сверла;  $T$  — стойкость сверла;  $S$  — подача;  $z, y, m$  — показатели степени, зависящие от материала изделия и диаметра сверла.



**Рис. 6.15**  
Разновидности  
сверлильных станков  
с асинхронным  
электроприводом

Обороты вращения шпинделя сверлильного станка

$$n = \frac{v}{\pi d} 10^3. \quad (6.59)$$

Вращающий момент на шпинделе определяется по формуле

$$M = 9,81(C_v d^{1,9} S) 10^{-3}. \quad (6.60)$$

Мощность резания при сверлении материала

$$P_z = \frac{Mn}{9550}. \quad (6.61)$$

Определив мощность резания на каждой операции, можно построить нагрузочную диаграмму, и на основании графика рассчитать мощность электродвигателя привода станка.

#### 6.7.4. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ

Фрезерные станки — группа металлорежущих станков в классификации по виду обработки. Станки предназначены для обработки с помощью фрезы плоских и фасонных поверхностей, тел вращения, зубчатых колес, металлических и других заготовок.

Фреза, вставленная в шпиндель фрезерного станка, выполняет вращательное движение, а заготовка, закрепленная на столе, совершает движение подачи прямолинейное или криволинейное.

Управление может быть ручным, автоматизированным или осуществляться с помощью системы с программным обеспечением.

По назначению станки подразделяются на универсально-, горизонтально-, вертикально-, продольно-, копировально-, резьбо-, шпоночно-фрезерные и др.

Большинство моделей предназначены для выполнения фрезерных и сверлильных операций, а сами станки являются фрезерно-сверлильными. Жесткая конструкция обеспечивает высокое качество обработки деталей из металла, пластмассы и дерева. Широкий диапазон регулировки оборотов шпинделя позволяет использовать большой арсенал фрезерного и сверлильного инструмента.

В последнее время широкое использование находят фрезерные обрабатывающие центры с ЧПУ. Автоматизированные центры применяются во всех отраслях промышленности: автомобильной, энергетическом машиностроении, аэрокосмической, приборостроении и в том числе при производстве мобильной сельскохозяйственной техники и предназначены для выполнения большого диапазона фрезерных, сверлильных и растачивающих операций на деталях средних размеров в одиночном и небольшом серийном производстве.

Фрезерные обрабатывающие станки с ЧПУ отличаются высокими скоростями резания, точностью позиционирования инструмента и исключительной надежностью (благодаря применению прецизионных механических и электронных комплектующих таких фирм, как *THK, Timken, SKF, Star, Fanuc, Fagor, Heidenhain, Siemens, Mitsubishi*, современных средств контроля изготовления пресс-форм, высокоточным подшипникам), а также новыми решениями в конструкции и компоновке станков. Выпускаются фрезерные станки следующих марок: M218, L262, BX2016A, XK7124, XD40A, T210, ФСП-1А (К) и др. Фрезерные станки обычно работают в продолжительном режиме с постоянной нагрузкой, поэтому мощность электродвигателя рассчитывается, исходя из самой максимальной загрузки.

На рисунке 6.16 представлен общий вид фрезерных станков.

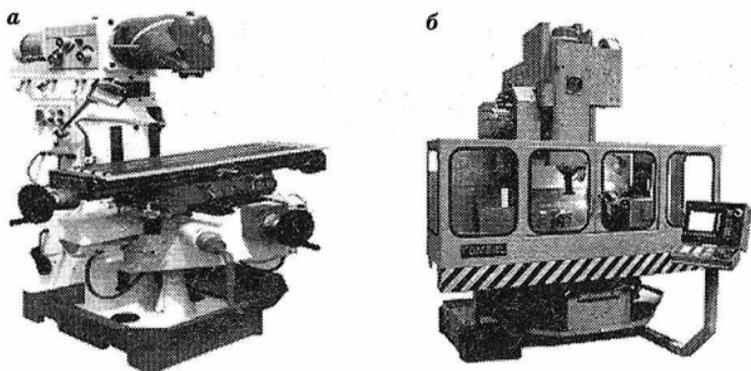


Рис. 6.16  
Фрезерно-обрабатывающие станки:

*a* — фрезерный станок с асинхронным приводом; *б* — автоматизированный фрезерный центр с ЧПУ.

Скорость резания в процессе фрезерования определяется по уравнению

$$v = \frac{C_v d^\lambda}{T^m S_y t^x B^k Z^x}, \quad (6.62)$$

где  $C_v$  — коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и типа фрезы и вида обработки;  $d$  — диаметр фрезы;  $Z$  — число зубьев фрезы;  $t$  — глубина фрезерования;  $T$  — стойкость фрезы;  $B$  — ширина фрезерования.

Усилие резания при фрезеровании материала:

$$F_z = 9,81 C_f t^x S_y Z d^i. \quad (6.63)$$

Мощность, затрачиваемая на процесс резания, находится как

$$P_z = \frac{F_z v_z}{60 \cdot 10^3}. \quad (6.64)$$

С учетом потерь в механических передачах мощность главного электродвигателя привода фрезерного станка определяется из выражения (6.57).

#### 6.7.5. ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

В последнее время для распиловки бревен применяют ленточные пилорамы и круглопильные станки марок «Ладога», «Зубр», «Мастер 2000», MAX, MASSIF и др.

Распиловка бревен на ленточной пилораме производится в горизонтальной плоскости относительно неподвижно расположенного обрабатываемого бревна. Пильный механизм ленточной пилорамы опускается и поднимается электромеханическим путем, что способствует продлению срока работы, а также повышению точности и сокращению времени пиления на пилораме.

Отличительные характеристики ленточных пилорам: малая толщина пропила, хорошее соотношение качества ценой, применение различных полотен, распил бревен большого диаметра, простота в обслуживании, мобильность, низкое энергопотребление.

Для деревообрабатывающих станков используют асинхронные короткозамкнутые электрические двигатели мощностью 7,5 и 11 кВт. С целью регулирования скорости вращения в состав электропривода добавляют многоступенчатые ременные передачи, редукторы, а также применяют двигатели с фазным ротором и частотным преобразователем.

На рисунке 6.17 изображен общий вид деревообрабатывающих станков.

При выборе методов технической обработки, типов станков и инструментов, при расчете мощностей и усилий необходимо учитывать основные свойства древесины: пластичность, делимость и прочность.

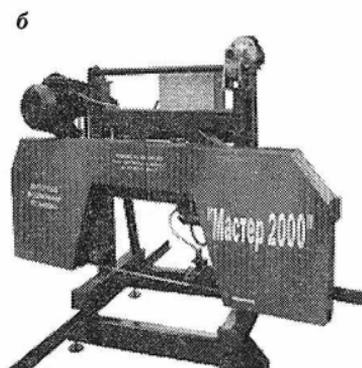
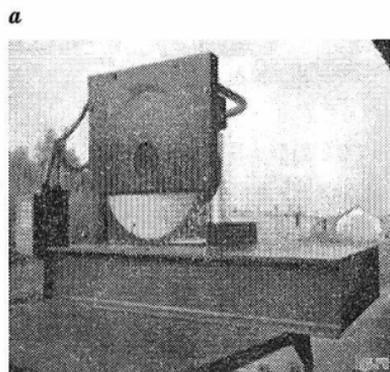


Рис. 6.17

Деревообрабатывающие станки для распила бревен и досок:

*a* — однодисковая установка для распиловки бревен; *б* — ленточная пилорама.

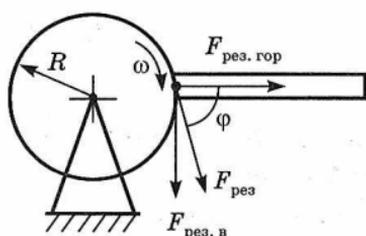


Рис. 6.18

Схема подачи и направления усилий в момент распиловки бревен

В процессе резания действуют силы, вызывающие внедрение реза в древесину, отделение стружки, а также силы трения (рис. 6.18).

Мощность, затрачиваемая на процесс резания, определяется как

$$P_{\text{рез}} = kbhv_1, \quad (6.65)$$

где  $b$  — ширина стружки;  $h$  — толщина стружки;  $v_1$  — скорость подачи;  $k$  — удельное сопротивление резанию.

Сила резания древесного материала находится по уравнению

$$F_{\text{рез}} = \frac{kbhv_1}{v}, \quad (6.66)$$

где  $v$  — скорость резания.

Скорость резания дисковой фрезы определяется из выражения

$$v = \omega R, \quad (6.67)$$

где  $R$  — радиус фрезы.

Скорость подачи зависит от допустимой подачи древесины на один зуб пилы:

$$v_1 = \frac{v_z Z \omega}{2\pi \cdot 10^3}, \quad (6.68)$$

где  $v_z$  — подача древесины на один зуб фрезы;  $Z$  — число зубьев пилы.

Усилие подачи рассчитывается по выражению

$$F_{\text{п}} = F_{\text{рез}} \cos \varphi + F_0 \sin \varphi + (G + F_{\text{рез}} \sin \varphi - F_0 \cos \varphi) f, \quad (6.69)$$

где  $F_0$  — усилие отжима;  $G$  — вес подаваемого материала;  $f$  — коэффициент трения древесины о стол.

Мощность подачи вычисляется по формуле

$$P_{\text{п}} = F_{\text{п}} v_1. \quad (6.70)$$

Мощность приводного двигателя электропривода деревообрабатывающего станка:

$$P_{\text{дв}} = \eta_{\text{п}}^{-1}(P_{\text{рез}} + P_{\text{п}}), \quad (6.71)$$

где  $\eta_{\text{п}}$  — КПД передачи.

Режим работы двигателя зависит от организации подачи: если брус поступает за брусом без перерыва, то режим работы длительный, в противном случае — перемежающийся.

Деревообработка является одной из самых перспективных и динамично развивающихся отраслей российской экономики. Использование современных деревообрабатывающих станков и оборудования является одним из основных направлений развития агропромышленного комплекса северных территорий страны.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите приводные характеристики рабочих машин.
2. Для какой цели служат нагрузочные диаграммы?
3. Какие водоподъемные устройства используются в агропромышленном производстве?
4. Где и с какой целью в сельскохозяйственном производстве применяются вентиляционные установки?
5. На основании каких характеристик выбираются вентиляционные и насосные установки?
6. Раскройте области использования стационарных транспортеров в АПК.
7. Приведите примеры конструкций крановых механизмов.
8. Какие установки применяются для дробления кормов?
9. Какие требования предъявляются к электроприводу кормораздаточных машин?
10. Какие параметры необходимо учитывать при расчете мощности деревообрабатывающих станков?

## РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ПРИВОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В СИСТЕМЕ MATHCAD

### 7.1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОННОЙ СРЕДЫ

Массовое внедрение компьютерной техники и программного обеспечения в образовательный процесс требует пересмотра учебных программ практически по всем изучаемым дисциплинам высшей школы, в том числе и по дисциплине «Электропривод». На практических занятиях необходимо уходить от решения монотонных и рутинных однотипных задач с помощью традиционных вычислительных средств, например, калькуляторов, и переходить на применение специализированных программных продуктов и компьютерной техники. Одним из наиболее приемлемых, на наш взгляд, программных комплексов для повышения производительности труда и сокращения времени вычислений является электронная среда *Mathcad*, которая прекрасно подходит для автоматизации математических расчетов и быстрого построения графических зависимостей при изучении студентами дисциплины «Электропривод». Предлагаемый математический редактор, разработанный американской фирмой *MathSoft Inc.* позволяет проводить научные и инженерные расчеты, а также выполнять описание и решение математических задач с помощью привычных математических формул и знаков.

К наиболее важным функциям новых версий *Mathcad* относятся настройка под любой известный тип печатающих устройств, большое разнообразие шрифтов, возможность использования всех инструментов *Windows*, прекрасная графика и современный многооконный интерфейс. В последних версиях системы имеются эффектные

средства оформления документов в цветном виде, что дает возможность использовать получаемые результаты в виде презентаций. Электронная среда содержит текстовый, формульный и графический редакторы, объединенные с мощным вычислительным потенциалом, что позволяет готовить статьи, книги, диссертации, научные отчеты, дипломные и курсовые работы не только с качественными текстами, но и с доступным набором самых сложных математических формул и изысканным представлением получаемых результатов.

Отличительной чертой рассматриваемого программного продукта является простота восприятия и быстрая усваиваемость изучаемого материала.

Разработчики сделали все возможное, чтобы пользователь, не обладающий специальными знаниями в программировании, мог в полной мере приобщиться к достижениям современной вычислительной науки и компьютерных технологий.

Возможности системы *Mathcad* легко показать на примерах решения традиционных задач электропривода с помощью 13-й и 14-й версий электронного продукта.

## 7.2. ОСНОВНЫЕ РЕДАКТОРЫ СИСТЕМЫ MATHCAD

Текстовый редактор *Mathcad* позволяет задавать текстовые комментарии, которые делают документ с формулами и графиками более понятным. Для ввода текстового редактора достаточно ввести символ «'» (одиночная кавычка). В появившемся прямоугольнике следует вводить текст.

В текстовом блоке курсор имеет вид красной вертикальной черточки и отмечает место ввода. Редактирование текста выполняется общепринятыми средствами — перемещением места ввода клавишами управления курсором, установки режима вставки или замещения символов (клавиша *Insert*), стиранием (клавиши *Del* и *Backspace*), выделением, копированием в буфер, вставкой из буфера и т. д. В редакторе имеется возможность выравнивать текст по левой его границе, правой границе или по контуру. Для англ-

лоязычных текстов предусмотрен орфографический контроль с применением встроенного словаря.

Правила ввода текста следующие:

- вводится знак кавычки на английской раскладке клавиатуры — появляется прямоугольник с маркером ввода;
- в панели форматирования устанавливается выбранный шрифт, используя типовые средства символического редактора (клавиша пробела, забор, стирания и т. д.), начинается набор текста;
- для перехода на новую строку нажимается клавиша *Enter*, после завершения ввода текста указатель отводится в сторону от текстового блока и выполняется щелчок левой кнопкой мыши.

Редактирование текста осуществляется следующим образом. Указатель мыши подводится к месту корректировки и производится щелчок левой кнопкой мыши. Появляются рамка текстового блока и маркер ввода, с помощью которого возможно дописывать или исправлять набранный текст.

**Формульный редактор** системы *Mathcad* предназначен для вычислений математических уравнений. Для запуска редактора достаточно установить указатель мыши в любом свободном месте окна редактирования и щелкнуть левой кнопкой. Появится курсор в виде красного крестика, который перемещается в место, где следует начинать набор формул. В зависимости от места расположения курсор может изменять свою форму. Например, в области формул он превращается в синий уголок, указывающий направление и место ввода.

Простейшие расчеты выполняются посимвольным набором левой части вычисляемого выражения и установкой оператора вывода — знак «=» (равно).

Подготовка вычислительных блоков облегчается благодаря выводу шаблона при задании того или иного оператора. Для этой цели в *Mathcad* введены палитры математических символов и операторов функций.

Использование шаблонов легко проиллюстрировать на примере вычисления определенного интеграла.

На экран выводится палитра операторов математического анализа, на которой выбирается изображение знака интеграла и производной. Нажатием курсора палитра появляется в окне программы. Определяется место экрана, куда необходимо ввести шаблон и выполняется щелчок на кнопке с изображением знака определенного интеграла.

Электронная среда *Mathcad* обладает множеством встроенных элементарных, специальных и статистических функций.

Для облегчения ввода математических функций на стандартной панели инструментов имеется кнопка  $f(x)$ , которая выводит окно с полным перечнем функций, разбитым на тематические разделы.

**Графический редактор** используется для построения разнообразных графиков.

В *Mathcad* встроено несколько различных типов графиков, которые можно разбить на две большие группы: двумерные и трехмерные.

Все графики создаются совершенно одинаково, с помощью панели инструментов *Graph* («график»), различия обусловлены отображаемыми данными.

Для создания, например, двумерного графика необходимо выполнить следующие операции:

- поместить курсор ввода в то место документа, куда требуется вставить график;
- вызвать панель *Graph* нажатием кнопки с изображением графиков на панели *Math* («математика»);
- нажать на панели *Graph* кнопку *X-Y Plot* для создания декартова графика или другую кнопку для построения выбранной графической зависимости, в обозначенном месте документа появится пустая область графика с одним или несколькими местозаполнителями, в которые вводятся имена переменных или функций.

Если все выполнено правильно, то выбранный график появится на экране.

Графическую зависимость легко корректировать изменением числовых данных или форматированием внешнего вида.

### 7.3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В ЭЛЕКТРОННОЙ СРЕДЕ МАТНСАД

**Пример 7.1.** Построить механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в двигательном и тормозных режимах работы. Тип двигателя 4ПН160МУ4. Номинальные данные:  $P_n = 4,5$  кВт,  $n_n = 1000$  мин<sup>-1</sup>,  $U_n = 220$  В,  $\eta_n = 0,79$ .

Рассчитать значения сопротивлений, которые необходимо ввести в цепь якоря, чтобы электродвигатель развивал тормозной момент, равный номинальному, и работал в следующих режимах:

- генераторном с оборотами вращения  $n_1 = 1350$  мин<sup>-1</sup>;
- динамическом торможении с частотой вращения  $n_2 = 250$  мин<sup>-1</sup>;
- торможения противовключением  $n_3 = -250$  мин<sup>-1</sup>.

**Алгоритм решения задачи.**

1. Номинальный момент электродвигателя:

$$M_n = \frac{9550 P_n}{n_n}.$$

2. Номинальный ток якоря электродвигателя:

$$I_{ян} = \frac{P_n}{U_n \eta_n} 10^3.$$

3. Сопротивление обмотки якоря двигателя:

$$R_я = \frac{0,5 U_n (1 - \eta_n)}{I_{ян}}.$$

4. Обороты вращения в режиме идеального холостого хода:

$$n_0 = \frac{n_n U_n}{U_n - I_{ян} R_я}.$$

5. Сопротивления ступеней добавочного резистора и ЭДС якоря:

$$R_{д1} = \frac{E_{я1} - U_n}{I_{ян} - R_я} - R_я, \quad E_{я1} = (U_n - I_{ян} R_я) \frac{n_1}{n_n};$$

$$R_{д2} = \frac{E_{я2}}{I_{ян} - R_{я}} - R_{я}, \quad E_{я2} = (U_{н} - I_{ян} R_{я}) \frac{n_2}{n_{н}};$$

$$R_{д3} = \frac{E_{я3} + U_{н}}{I_{ян} - R_{я}} - R_{я}, \quad E_{я3} = (U_{н} - I_{ян} R_{я}) \frac{n_3}{n_{н}}.$$

6. Механическая характеристика в двигательном режиме строится по координатам двух точек:

$$M = 0, n = n_0; \quad M = M_{н}, n = n_{н}.$$

7. Механическая характеристика в генераторном режиме работы строится по следующим координатам:

$$M = 0, n = n_0; \quad M = -M_{н}, n = n_1.$$

8. Механическую характеристику в режиме динамического торможения можно построить по известным точкам:

$$M = 0, n = 0; \quad M = -M_{н}, n = n_2.$$

9. В режиме торможения противовключением характеристика строится, исходя из следующих координат:

$$M = 0, n = n_0; \quad M = M_{н}, n = n_3.$$

Для расчета электромеханических величин ДПТ параллельного возбуждения в среде *Mathcad* и построения механических характеристик в двигательном и тормозных режимах работы, а также с целью визуализации полученных значений на экране компьютера необходимо разбить решение поставленной задачи на четыре этапа.

На первом составляется математический алгоритм расчета механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Предлагаемый набор формул набирается с помощью основных и математических панелей инструментов в электронном окне *Mathcad*.

После нахождения численных значений (номинального момента двигателя, тока якоря, сопротивления обмотки якоря, скорости вращения в режиме идеального холостого хода) строится механическая характеристика машины постоянного тока в двигательном режиме работы (см. рис. 7.1).

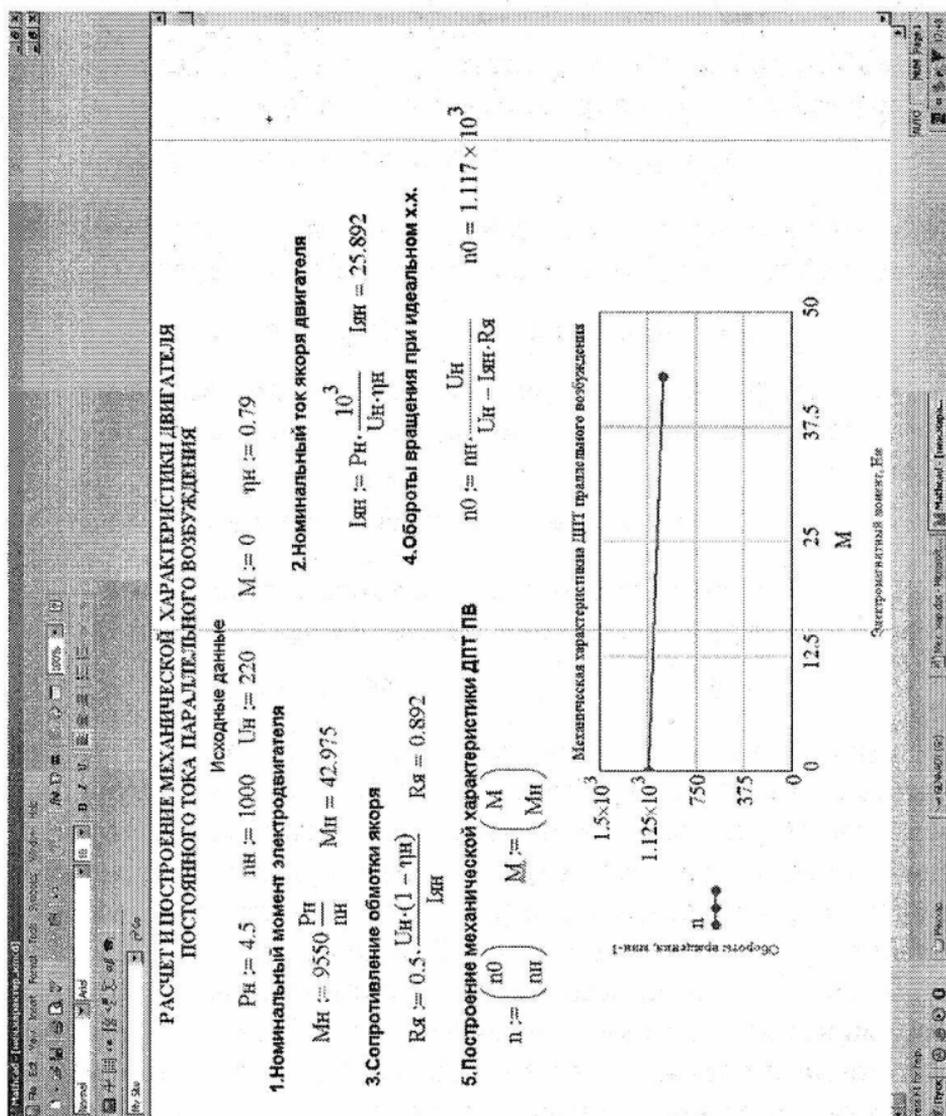
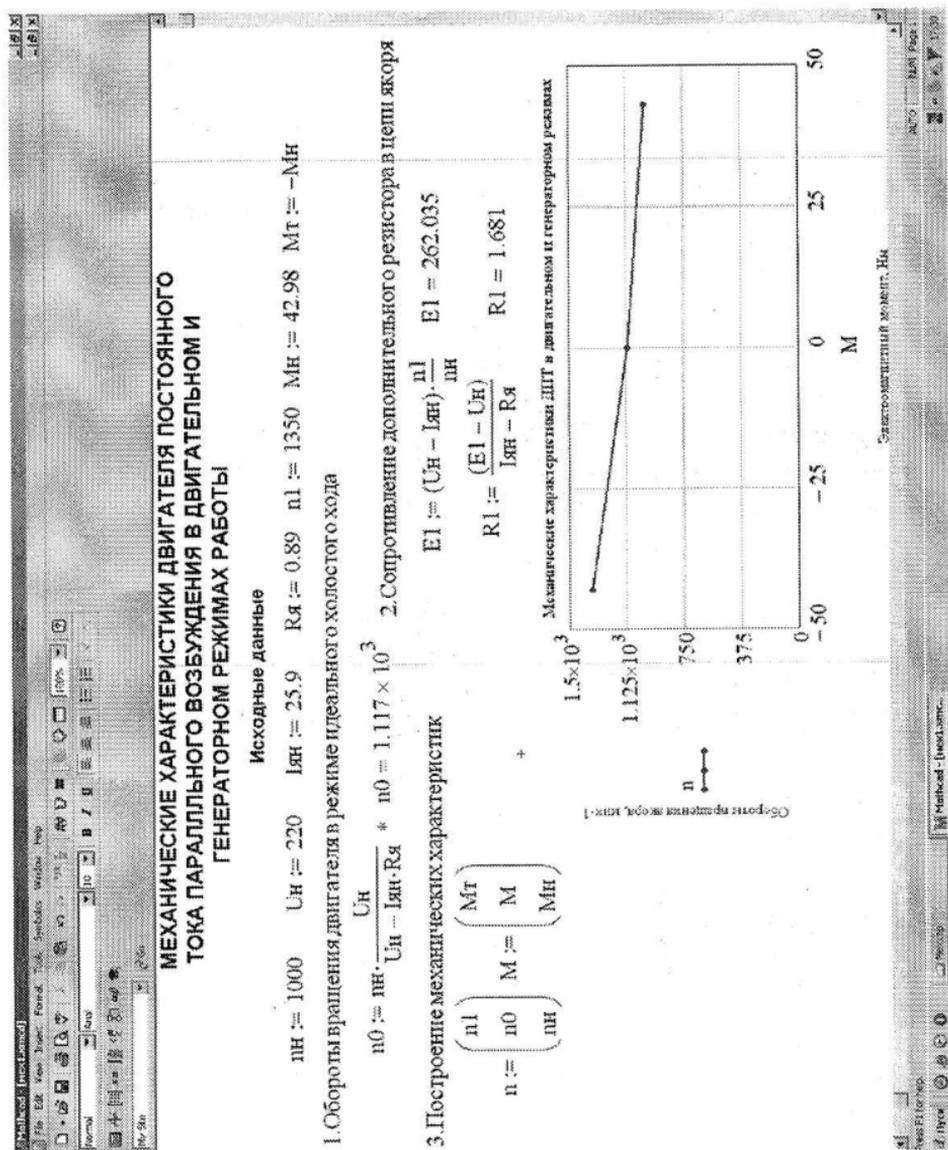


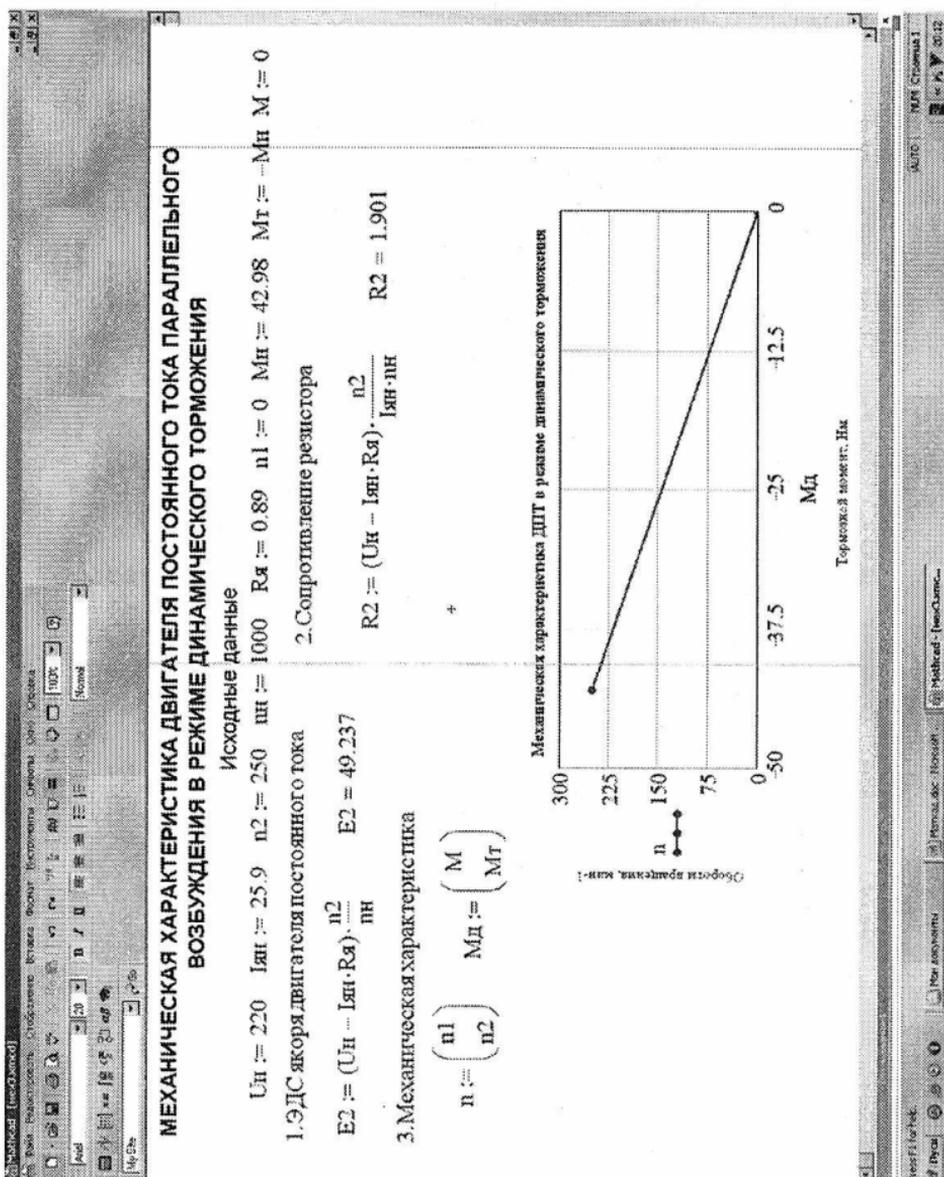
Рис. 7.1

Окно *Mathcad* с алгоритмом и результатами расчета механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

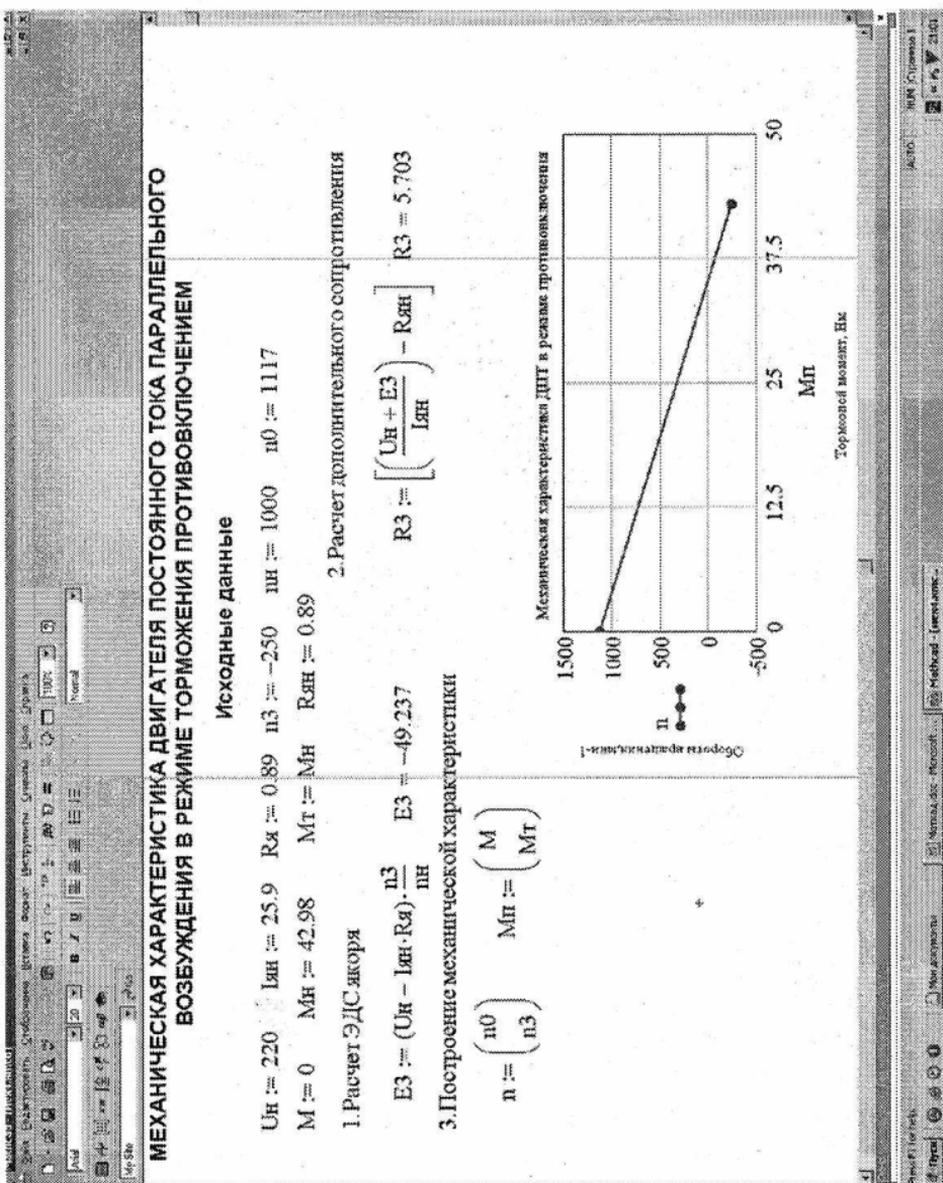


**Рис. 7.2**

Механические характеристики ДПТ параллельного возбуждения в двигательном и генераторном режимах работы



**Рис. 7.3**  
Механическая характеристика ДПТ  
в режиме динамического торможения



**Рис. 7.4**  
 Механическая характеристика двигателя постоянного тока в режиме торможения противозащелкиванием

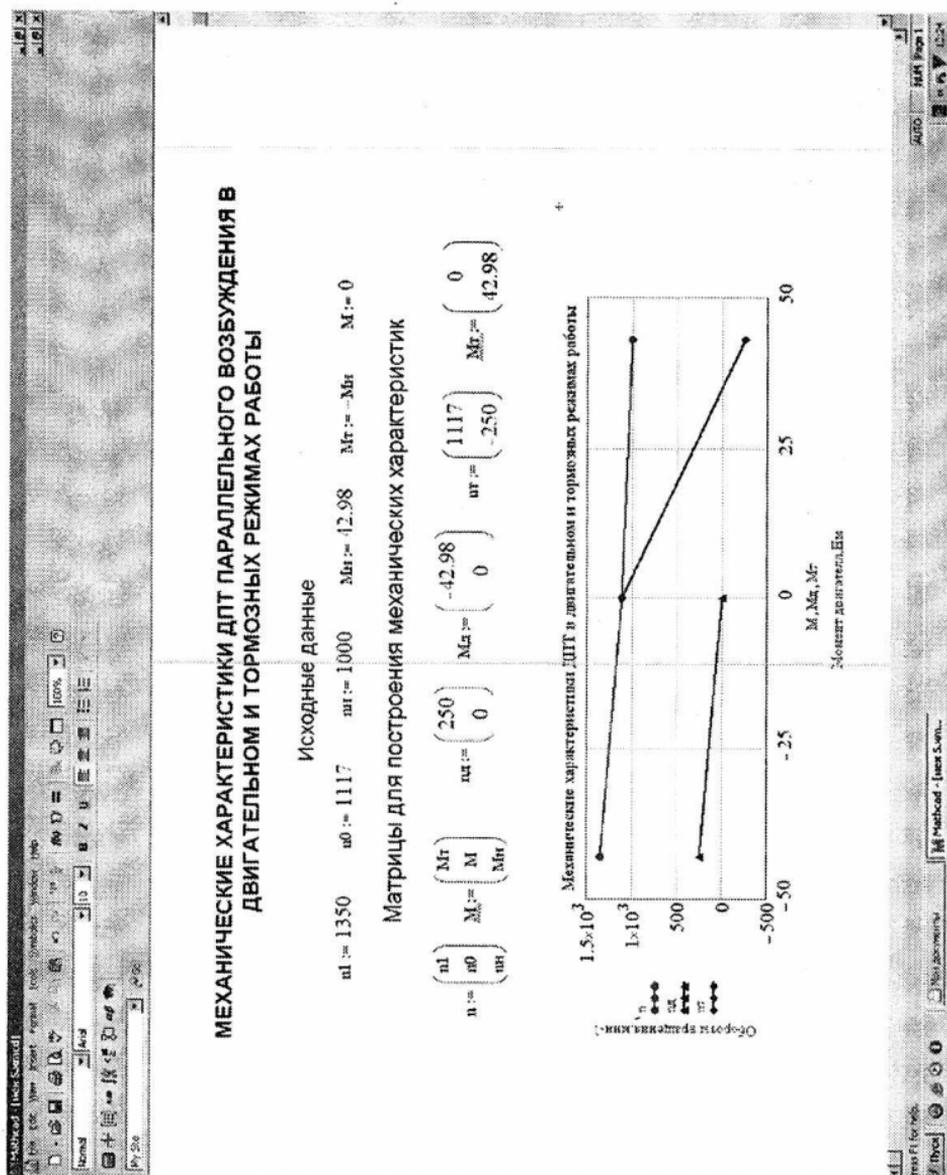


Рис. 7.5

Механические характеристики ДПТ с параллельным возбуждением в двигательном и тормозном режимах работы

На втором этапе с учетом полученных расчетных величин и исходных данных задания строится механическая характеристика электродвигателя в двигательном и генераторном режимах работы (см. рис 7.2). Для получения генераторной характеристики следует в обмотку якоря машины постоянного тока с параллельным возбуждением включить дополнительный резистор  $R_1$ .

На третьем этапе рассчитывается механическая характеристика в режиме динамического торможения. Характеристика получается, если обмотка якоря замыкается на тормозное сопротивление  $R_2$ . На рисунке 7.3 даны результаты вычисления и механическая характеристика в режиме динамического торможения машины постоянного тока.

Механическая характеристика в режиме торможения противовключением вычисляется на четвертом этапе компьютерного моделирования в результате подключения последовательно к обмотке якоря дополнительного сопротивления  $R_3$ . На рисунке 7.4 изображена характеристика ДПТ и расчет сопротивления в режиме торможения противовключением.

Результаты расчета: номинальный момент электродвигателя  $M_n = 42,98$  Нм; номинальный ток якоря  $I_{ян} = 25,9$  А; сопротивление обмотки якоря  $R_{ян} = 0,89$  Ом. Обороты вращения якоря в режиме идеального холостого хода  $n_0 = 1117$  мин<sup>-1</sup>; дополнительные сопротивления ступеней тормозного резистора  $R_1 = 1,68$  Ом,  $R_2 = 1,9$  Ом,  $R_3 = 5,7$  Ом.

Математический алгоритм для расчета и построения механических характеристик и результаты вычислений электромеханических параметров двигателя постоянного тока параллельного возбуждения можно набрать в одном электронном окне, а возможно, как представлено в рассматриваемом примере, в нескольких окнах.

Если необходимо рассчитать характеристики для двигателя постоянного тока, изготовленного на другие номинальные параметры, то необходимо в каждом электронном окне изменить значения исходных данных, и система *Mathcad* в автоматическом режиме выполнит пересчет интересующих результатов и выдаст на экран дисплея

новые числовые значения, а также самостоятельно осуществит перепостроение графиков.

В системе *Mathcad* имеется функция, которая позволяет строить в одних осях координат несколько графиков. На рисунке 7.5 представлены механические характеристики электродвигателя постоянного тока, работающего в двигательном и тормозном режимах.

Электродвигатель развивает тормозной момент в трех квадрантах декартовой системы координат. На рисунке прямая, характеризующая рекуперативный режим работы двигателя, пересекает ось ординат в точке идеального холостого хода  $\omega_0$  и переходит во второй квадрант. Характеристика динамического торможения выходит из нуля и проходит во втором квадранте. Торможение противовключением показано прямой линией, выходящей из точки  $n_0$  и пересекающей ось абсцисс между первым и четвертым квадрантами.

**Пример 7.2.** Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения марки 4ПН132МУ4 имеет номинальные параметры:  $P_n = 2,4$  кВт;  $U_n = 220$  В;  $n_n = 1600$  мин<sup>-1</sup>;  $\eta_n = 0,77$ . Рассчитать пусковой резистор, если нагрузочный момент  $M_c$  при пуске остается постоянным и равным  $0,75 M_{ном}$ . Число ступеней пускового резистора  $\alpha = 3$ .

Расчет пускового сопротивления для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения может быть произведен двумя способами: аналитическим и графоаналитическим методами.

**Расчет аналитическим методом.**

1. Номинальный ток якоря ДПТ ПВ:

$$I_{ян} = \frac{P_n}{U_n \eta_n} 10^3.$$

2. Определение силы тока якоря при статической нагрузке:

$$M_c = 0,75 M_{ном}, \quad I_c = 0,75 I_{ян}.$$

3. Сопротивление обмотки якоря электродвигателя:

$$R_{я} = \frac{0,5 U_n (1 - \eta_n)}{I_{я}}.$$

4. Кратность максимального пускового тока к переключаящему значению:

$$\lambda = \alpha + 1 \sqrt{\frac{U_H}{R_{яH} I_{яH}}}.$$

5. Сопротивления секций резистора рассчитывается по выражениям:

$$R_1 = \frac{U_H(\lambda - 1)}{I_1 \lambda}; \quad R_2 = \frac{U_H(\lambda - 1)}{I_1 \lambda^2}; \quad R_3 = \frac{U_H(\lambda - 1)}{I_1 \lambda^3}.$$

6. Обороты вращения якоря в режиме идеального холостого хода:

$$n_0 = \frac{n_H U_H}{U_H - I_{яH} R_{я}}.$$

На рисунке 7.6 представлен алгоритм и результаты расчета пускового резистора аналитическим методом.

В результате произведенных вычислений сопротивление первой ступени равно 3,78 Ом, второй — 2,2 Ом, третьей — 1,3 Ом. Суммарное сопротивление резистора составляет 7,26 Ом.

**Графоаналитический метод расчета пусковой диаграммы ДПТ ПВ.**

График пуска машины постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения строится на основе данных, полученных в результате аналитического расчета (рис. 7.7).

**Пример 7.3.** Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, имеющего паспортные данные:  $P_H = 3,8$  кВт; номинальное напряжение  $U_H = 220$  В; обороты вращения в номинальном режиме работы  $n_0 = 1500$  мин<sup>-1</sup>; КПД  $\eta_H = 0,81$ . Рассчитать и построить естественную и искусственные механические характеристики при дополнительных резисторах  $R_{доп1} = 5$  Ом,  $R_{доп2} = 7$  Ом.

**Алгоритм решения задачи.**

1. Номинальный ток якоря электродвигателя:

$$I_{я} = \frac{P_H}{U_H \eta_H}.$$

**РАСЧЕТ ПУСКОВОГО РЕЗИСТОРА ДЛЯ ДПТ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Аналитический метод	Исходные данные
1. Номинальный ток якоря двигателя $I_{я1} := \frac{P_{я} \cdot 10^3}{U_{я} \cdot \eta_{я}} \quad I_{я1} = 14.168$	$R_{я} := 2.4$ $U_{я} := 220$ $\eta_{я} := 1600$
3. Сопротивление обмотки якоря $R_{я} := 0.5 \cdot U_{я} \cdot \frac{(1 - \eta_{я})}{I_{я1}} \quad R_{я} = 1.786$	$\eta_{я} := 0.77$ $\alpha := 3$
4. Отношение максимального тока пускового резистора к переключающему $\lambda := \frac{\alpha + 1}{\sqrt{R_{я} \cdot I_{я1}}} \quad \lambda = 1.717$	2. Сила тока при статической нагрузке $I_{с} := 0.75 \cdot I_{я1} \quad I_{с} = 10.626$
6. Сопротивление секций резистора $R_1 := U_{я} \cdot \frac{(\lambda - 1)}{\lambda \cdot \Pi} \quad R_1 = 3.777$ $R_3 := U_{я} \cdot \frac{3}{\lambda \cdot \Pi} \quad R_3 = 1.281$	5. Ограничение пускового тока $\Pi := \lambda \cdot I_{я1}$ $R_2 := 2.199$
7. Суммарное сопротивление пускового резистора $R_{п} := R_1 + R_2 + R_3 \quad R_{п} = 7.257$	

Рис. 7.6

Аналитический метод расчета пускового трехступенчатого резистора для ДПТ параллельного возбуждения



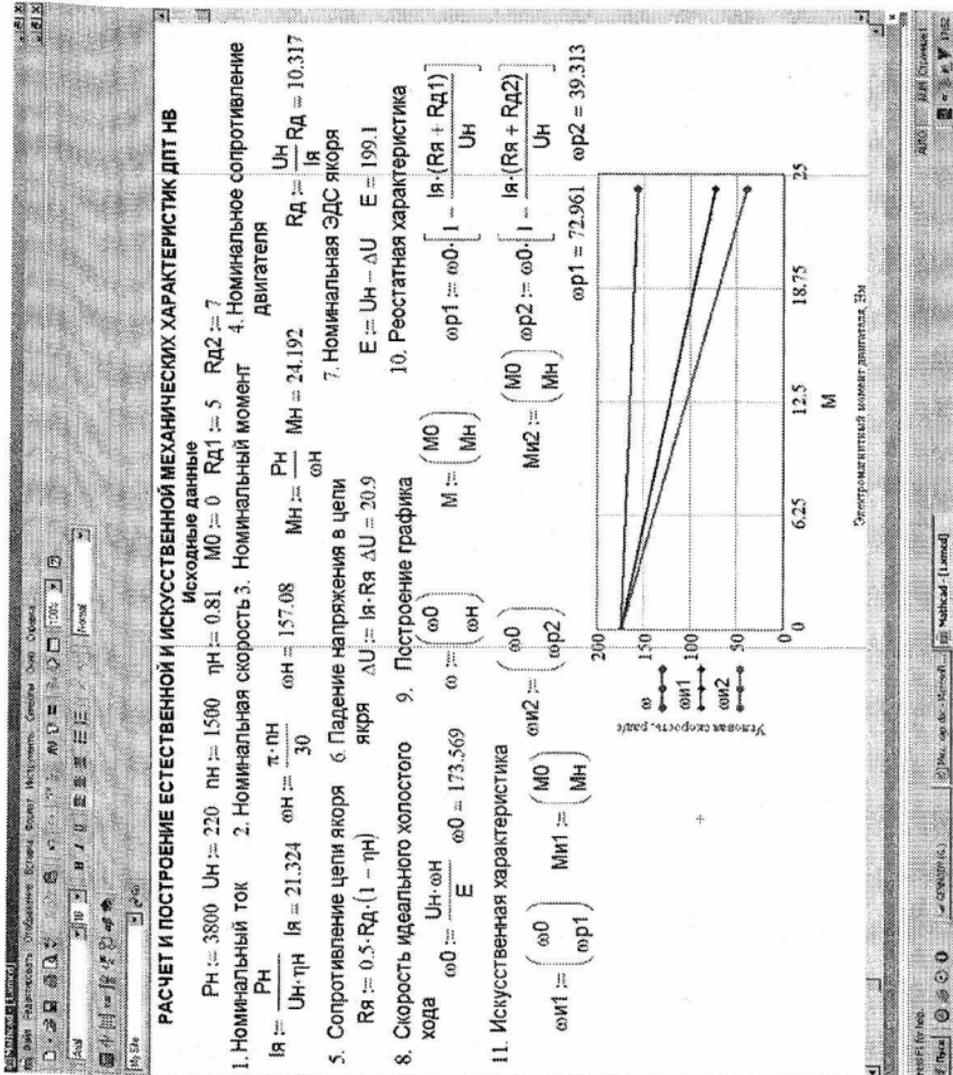


Рис. 7.8

Расчет и построение естественной и искусственных механических характеристик ДПТ НВ

2. Угловая скорость вращения в номинальном режиме:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi n}{30}.$$

3. Номинальный электромагнитный момент двигателя:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}.$$

4. Номинальное сопротивление двигателя:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{я}}}.$$

5. Сопротивление цепи якоря:

$$R_{\text{я}} = 0,5R_{\text{н}}(1 - \eta_{\text{н}}).$$

6. Падение напряжения в цепи якоря:

$$\Delta U = I_{\text{я}}R_{\text{я}}.$$

7. Номинальная ЭДС якоря:

$$E = U_{\text{н}} - U.$$

8. Скорость вращения идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}\omega_{\text{н}}}{E}.$$

9. Угловая частота вращения якоря при дополнительном резисторе:

$$\omega_{\text{р}} = \omega_0 \left[ 1 - \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{U_{\text{н}}} \right].$$

Расчет и построение механических характеристик представлены на рисунке 7.8.

**Пример 7.4.** Рассчитать и построить естественные характеристики ДПТ ПВ, с номинальными данными:  $P_{\text{н}} = 8$  кВт;  $n_{\text{н}} = 800$  мин<sup>-1</sup>;  $U_{\text{н}} = 220$  В;  $I_{\text{н}} = 46,5$  А;  $\eta_{\text{н}} = 0,78$ .

1. Номинальная скорость вращения двигателя:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi n_{\text{н}}}{30}.$$

2. Момент двигателя в номинальном режиме работы:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}.$$

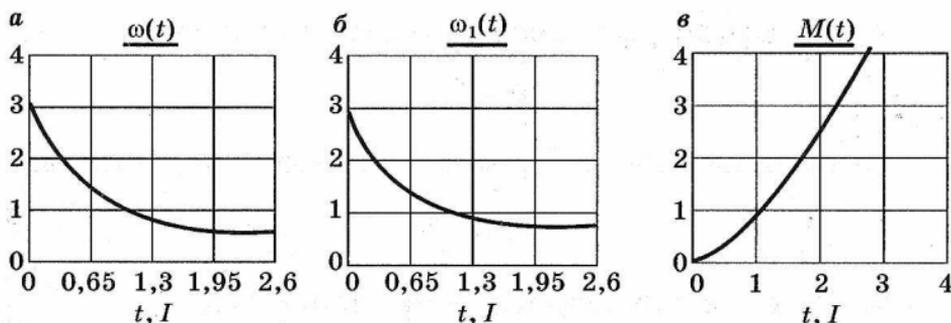


Рис. 7.9

Универсальные характеристики ДПТ ПВ в относительных единицах:

а — электромеханическая характеристика для двигателей мощностью до 10 кВт; б — электромеханическая характеристика для электродвигателей мощностью более 10 кВт; в — момент в функции силы тока ДПТ ПВ.

Задаваясь значениями тока, взятыми из универсальных характеристик ДПТ ПВ (рис. 7.9), находятся относительные значения электромагнитного момента и угловой скорости вращения. Для построения искомым характеристик относительные значения известных переменных умножаются на номинальные величины.

Электромагнитный момент, угловая скорость вращения и сила тока находятся из выражений:  $M = M^* \cdot M_H$ ;  $\omega = \omega^* \cdot \omega_H$ ;  $I = I^* \cdot I_H$ . По полученным данным строятся естественные электромеханическая и механическая характеристики ДПТ ПВ в системе *Mathcad* (рис. 7.10).

**Пример 7.5.** Для двигателя постоянного тока рассчитать сопротивление добавочного резистора, при включении которого искусственная электромеханическая характеристика пройдет через точку с координатами  $\omega_H = 50 \text{ с}^{-1}$ ,  $I_H = 40 \text{ А}$ . Паспортные данные электродвигателя:  $I_H = 46,8 \text{ А}$ ;  $U_H = 220 \text{ В}$ ;  $\eta_H = 0,8$ ;  $P_H = 8 \text{ кВт}$ .

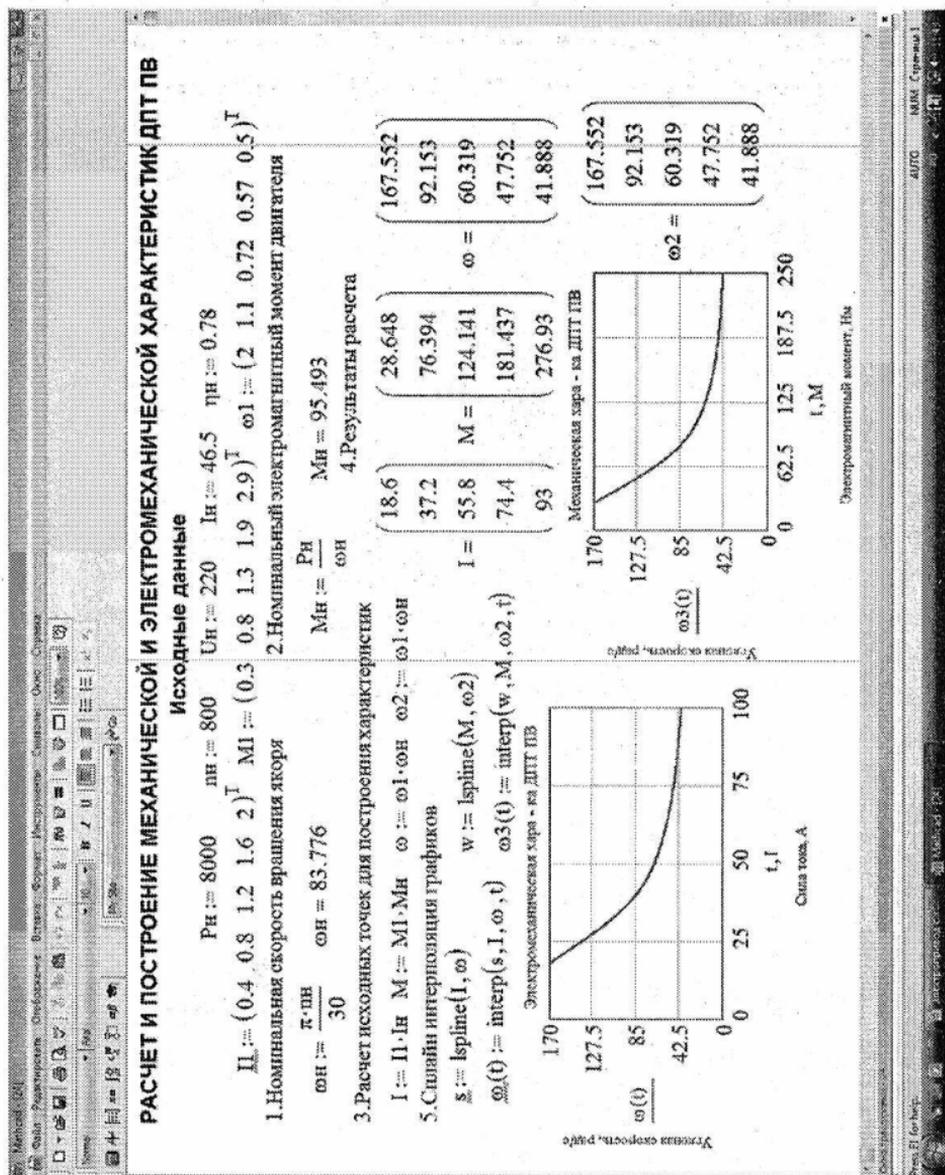
#### Алгоритм решения задачи

1. Суммарное сопротивление обмоток якоря:

$$\sum R = R_d + R_{об} = \frac{0,75 U_H (1 - \eta_H)}{I_H}.$$

2. Добавочное сопротивление электродвигателя:

$$R_d = \frac{1 - \frac{\omega_H}{\omega_e}}{\frac{U_H}{I_H} - R_{я} - R_{об}}.$$



**Рис. 7.10**  
 Алгоритм расчета, электро-механическая и механическая характеристики ДПТ ПВ



### 3. Расчет искусственной электромеханической характеристики:

$$\omega_{\text{и}} = \omega_{\text{е}} \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{и}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}} + R_{\text{ов}})}{U_{\text{н}} - I_{\text{и}}(R_{\text{я}} + R_{\text{ов}})}$$

Выражение для расчета  $\omega_{\text{и}}$  дает возможность выявить расположение искусственных электромеханических характеристик относительно естественной. Из полученной формулы видно, что если  $R_{\text{д}} > 0$ , то  $\omega_{\text{и}} < \omega_{\text{е}}$  и все кривые будут проходить ниже естественной электромеханической характеристики при включении в электрическую цепь якоря добавочного сопротивления.

Для ряда значений силы тока  $I_{\text{е}}$  по естественной характеристике (рис. 7.10) определяются величины угловой скорости  $\omega_{\text{е}}$ . Все данные заносятся на листинг электронной среды *Mathcad* в раздел «Исходные данные» (рис. 7.11). Из этой же характеристики для  $I_{\text{и}} = 40$  А находится  $\omega_{\text{е}} = 90$  рад/с. В результате произведенного расчета по математическим выражениям, представленным на электронном листинге, строится электромеханическая характеристика, которая проходит в первом и четвертом квадрантах, что говорит о переходе ДПТ ПВ от двигательного режима работы к режиму торможения противовключением.

**Пример 7.6.** Рассчитать и построить механическую характеристику АД с короткозамкнутым ротором. Двигатель имеет следующие паспортные данные:  $P_{\text{н}} = 2,2$  кВт;  $n_{\text{н}} = 1425$  мин<sup>-1</sup>;  $\eta_{\text{н}} = 0,8$ ;  $\cos\varphi = 0,83$ ;  $\lambda_{\text{max}} = 2,4$ ;  $p = 2$ ;  $f = 50$  Гц;  $\lambda_{\text{п}} = 2,1$ ;  $\lambda_{\text{min}} = 1,6$ ;  $\lambda_{\text{Г}} = 6$ .

#### Алгоритм решения задачи

1. Скорость вращения вала двигателя в режиме идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$$

2. Угловая скорость вращения электродвигателя при номинальном режиме работы:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi n}{30}$$

3. Номинальный момент двигателя рассчитывается из выражения

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}.$$

4. Номинальное скольжение определяется по формуле

$$S_{\text{н}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{н}}}{\omega_0}.$$

5. Критический момент двигателя:

$$M_{\text{к}} = \lambda_{\text{max}} M_{\text{н}}.$$

6. Критическое скольжение:

$$S_{\text{к}} = S_{\text{н}} \left( \lambda_{\text{max}} + \sqrt{\lambda_{\text{max}}^2 - 1} \right).$$

7. Промежуточные значения электромагнитного момента рассчитываются по уравнению

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S}}.$$

8. Угловая скорость вращения ротора вычисляется из выражения

$$\omega = \omega_0(1 - S).$$

Результаты расчета и механическая характеристика асинхронного электродвигателя приведены на рисунках 7.12 и 7.13.

**Пример 7.7.** Рассчитать и построить естественную и искусственную механические характеристики асинхронного двигателя серии АИ с номинальными параметрами:  $P_{\text{н}} = 11$  кВт;  $U_{\text{н}} = 380$  В;  $n_0 = 750$  мин<sup>-1</sup>;  $\omega_0 = 78,7$  рад/с;  $\omega_{\text{н}} = 75,4$  рад/с;  $\lambda_{\text{м}} = 3,5$ ;  $\lambda_{\text{п}} = 2,2$ . Построить искусственную характеристику, исходя из напряжения  $U = 0,8U_{\text{н}}$ .

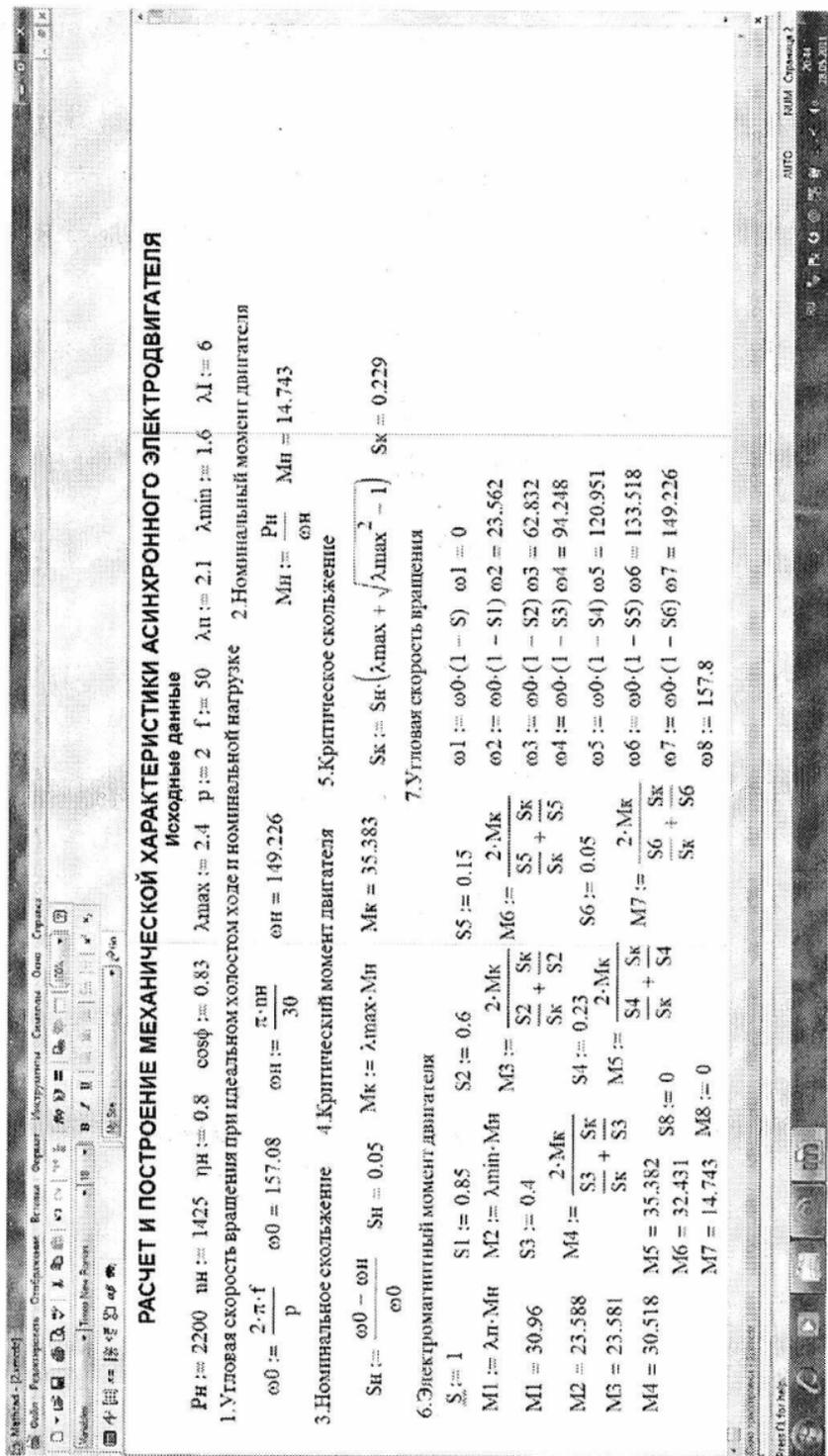
**Алгоритм решения задачи**

1. Номинальный момент электрического двигателя:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}.$$

2. Критический момент двигателя при  $U_{\text{н}}$ :

$$M_{\text{кр}} = \lambda_{\text{к}} M_{\text{н}}.$$



**Рис. 7.12**  
 Алгоритм расчета механической характеристики

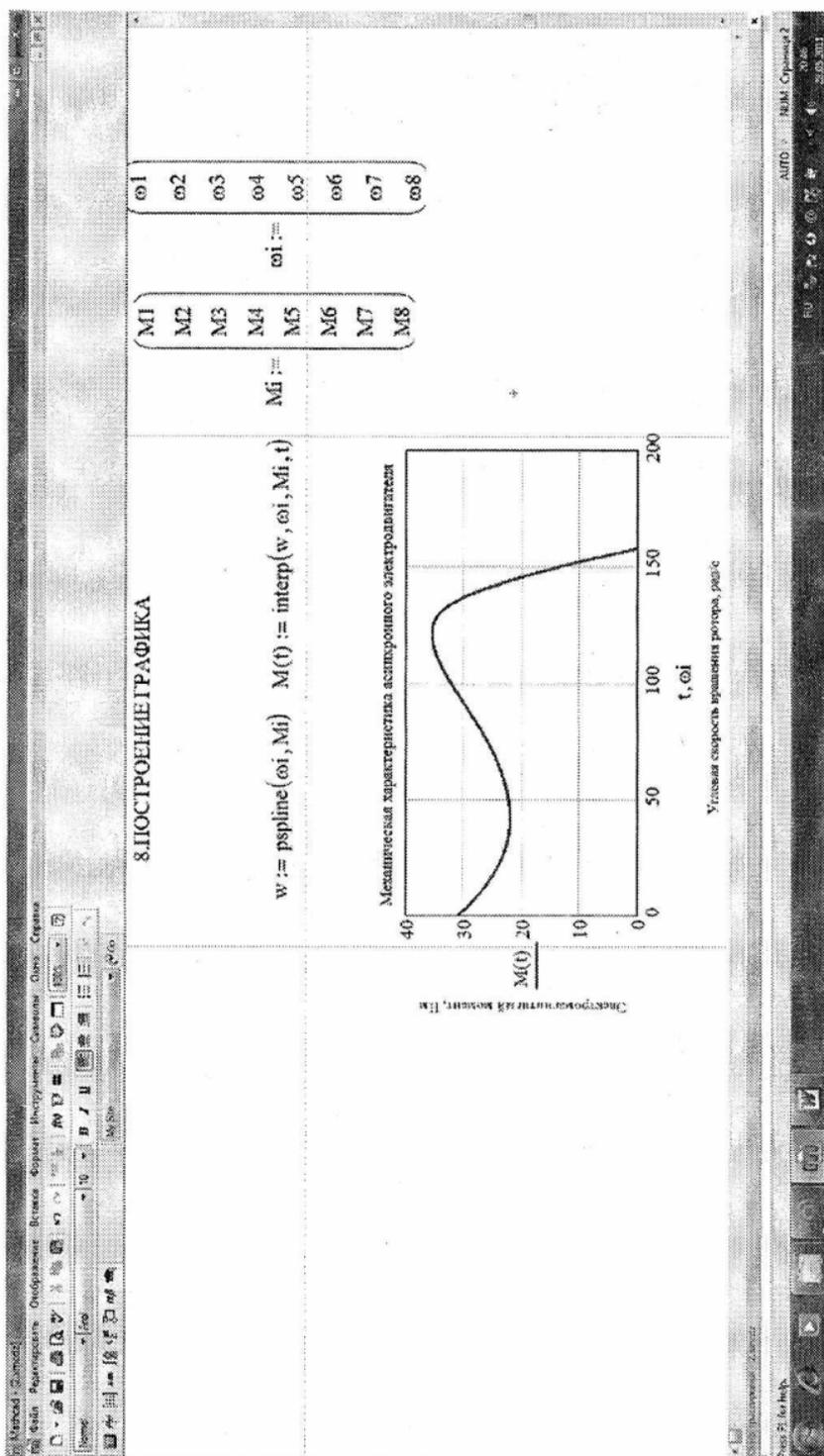
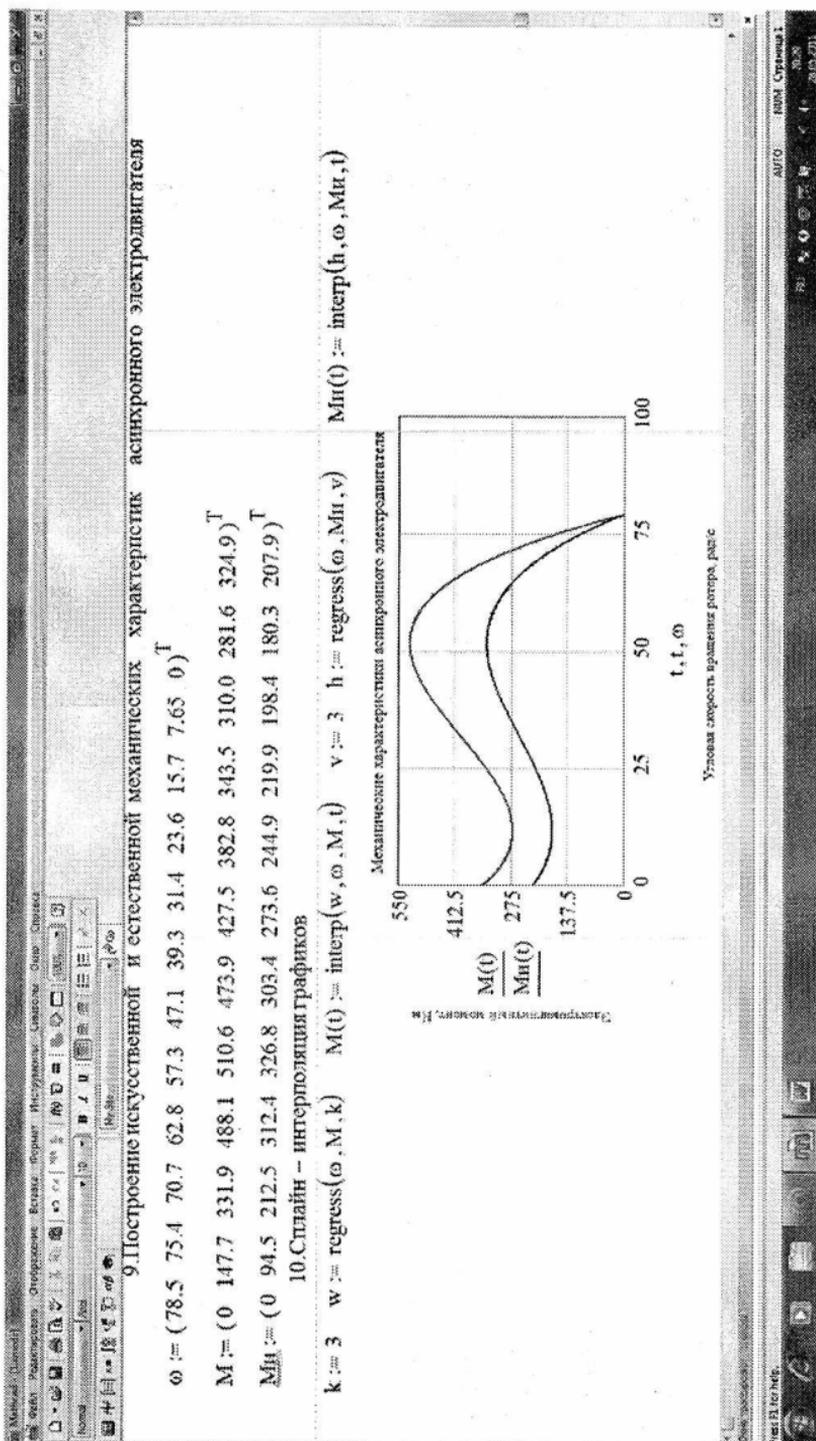


Рис. 7.13

Механическая характеристика асинхронного двигателя





**Рис. 7.15**  
 Построение естественной и искусственной механических характеристик асинхронного электродвигателя

3. Критический момент электродвигателя при  $U = 0,8U_H$ :

$$M_{кр и} = M_{кр} \left( \frac{U}{U_H} \right)^2.$$

4. Номинальное скольжение электрической машины:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}.$$

5. Критическое скольжение двигателя:

$$S_{кр} = S_H \left( \lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right).$$

6. Значения электромагнитного момента рассчитываются по уравнению

$$M = \frac{2M_{кр}(1 + \varepsilon)}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}} + 2\varepsilon}.$$

7. Момент электрического двигателя, работающего на искусственной механической характеристике, определяется из выражения

$$M_H = \left( \frac{U}{U_H} \right)^2 M_i.$$

Результаты расчета и механические характеристики представлены на рисунках 7.14 и 7.15.

По полученным результатам расчета: номинальный момент  $M_H = 145,9$  Нм; критический момент  $M_{кр} = 510,61$  Нм; критический момент на искусственной механической характеристике  $M_{кр и} = 326,79$  Нм; номинальное скольжение  $S_H = 0,039$ ; критическое скольжение  $S_{кр} = 0,27$ .

Графики функций построены в среде *Mathcad* с помощью сплайн-интерполяции.

**Пример 7.8.** Асинхронный двигатель серии АИ имеет паспортные данные:  $P_H = 11$  кВт;  $U_H = 380$  В;  $n_0 = 1500$  мин<sup>-1</sup>;  $\omega_0 = 157$  рад/с;  $\omega_H = 149,1$  рад/с;  $\lambda_M = 3$ ;  $I_{H1} = 22,6$  А;  $I_{H2} = 22$  А;  $E_{2к} = 305$  В;  $f = 50$  Гц;  $\cos\varphi = 0,86$ ;  $\eta_H = 0,86$ ;  $S_H = 0,86$ . Рассчитать номинальный и критический электромагнитный момент, величину пускового резистора, построить естественную и искусственную механические характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором.

**Алгоритм решения задачи**

1. Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}.$$

2. Критический момент двигателя:

$$M_{кр} = \lambda_K M_H.$$

3. Номинальное сопротивление роторной цепи:

$$R_{2H} = \frac{E_{2K}}{\sqrt{3}I_{2H}}.$$

4. Критическое скольжение:

$$S_{кр} = S_H (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}).$$

5. Активное сопротивление фазы ротора:

$$R_{2BH} = R_{2H} S_H.$$

6. Коэффициент трансформации:

$$K_e = 0,95 \frac{U_H}{E_{2K}}.$$

7. Сопротивление резистора в цепи ротора:

$$R_{д2} = 0,2R_{2H}.$$

8. Суммарное активное сопротивление роторной цепи:

$$R_{2\Sigma} = R_{д1} + R_{д2}.$$

9. Приведенное активное сопротивление обмотки ротора:

$$R'_{2BH} = K_e^2 R_{2BH}.$$

10. Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_{1BH} = \alpha R'_{2BH}.$$

11. Электромагнитный момент двигателя:

$$M = \frac{2M_{кр} (1 + \alpha \varepsilon_{крe})}{\frac{S_{кр}}{S_e} + \frac{S_e}{S_{кр}} + 2\alpha \varepsilon_{крe}}.$$

12. Скольжение на искусственной характеристике для значений электромагнитного момента, полученного с целью построения естественной механической характеристики:

$$S_{\text{и}} = S_{\text{е}} \frac{R_{2\Sigma}}{R_{2\text{ВН}}}.$$

13. Угловые скорости вращения для  $S_{\text{е}}$  и  $S_{\text{и}}$ :

$$\omega_{\text{е}} = \omega_0(1 - S_{\text{е}}); \quad \omega_{\text{и}} = \omega_0(1 - S_{\text{и}}).$$

Результаты расчета и механические характеристики представлены на рисунках 7.16–7.18.

**Пример 7.9.** Определить мощность, потребляемую электродвигателем подъемного механизма крана при подъеме и спуске груза, если номинальная масса груза  $G = 7,5$  т, скорость груза  $v = 0,7$  м/с, КПД передачи лебедки  $\eta_{\text{н}} = 0,96$ , высота  $H = 46$  м, масса крана  $G_0 = 0,32$  т, время между подъемом и спуском, а также спуском и подъемом  $t_0 = 98$  с. Выбрать по каталогу двигатель, если передаточное число редуктора лебедки  $k = 36$ , а диаметр ее барабана, на который наматывается трос,  $D = 0,5$  м, коэффициент, учитывающий ухудшение теплоотдачи электродвигателя во время паузы  $\alpha = 0,5$ , коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжения сети  $\beta = 0,85$ .

**Алгоритм решения задачи**

1. Мощность, необходимая при подъеме груза:

$$P_1 = \frac{(G_{\text{н}} + G_0)v}{102\eta_{\text{н}}}.$$

2. Мощность, потребляемая двигателем при опускании крюка:

$$P_2 = \frac{G_0 v}{102\eta_{\text{н}}}.$$

3. Время подъема груза или спуска крюка:

$$t_1 = t_2 = \frac{H}{v}.$$

4. Эквивалентная мощность с учетом нагрузочной диаграммы рассчитывается из уравнения

$$P_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2}{t_1 + 2\alpha t_0 + t_2}}.$$

Расчет механических характеристик асинхронного двигателя

Исходные данные

$R_n := 11000 \text{ нм}$   $n_0 := 1500 \text{ об/м}$   $\omega_0 := 157 \text{ Сн}$   $S_n := 0.0515$   $\omega_n := 149.1 \text{ об/м}$   $E_{k2} := 380$   $E_{k1} := 305$   $\lambda_m := 3$   $I_{n2} := 22$   $I_{n1} := 22.6$   $\alpha := 0.6$   $S_{кр1} := 1.4$

Решение	Исходные данные
1. Номинальный момент двигателя	3. Номинальное сопротивление роторной цепи
$M_n := \frac{P_n}{\omega_n}$ $M_n := 73.776$	$R_{n2} := \frac{E_{k2}}{\sqrt{3} \cdot I_{n2}}$ $R_{n2} := 8.004$
2. Критический момент двигателя	6. Коэффициент трансформации ЭДС
$M_{кр} := \lambda_m \cdot M_n$ $M_{кр} = 221.328$	$K_e := 0.95 \cdot \frac{U_n}{E_{k2}}$ $K_e = 1.184$
4. Критическое скольжение	9. Приведенное сопротивление обмотки ротора
$S_{кр} := S_n \cdot \left( \lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right)$ $S_{кр} = 0.3$	$R_{рп} := K_e^2 \cdot R_{н2}$ $R_{рп} = 0.577$
5. Активное сопротивление фазы ротора	11. Матрица скольжений
$R_{фн2} := R_{н2} \cdot S_n$ $R_{фн2} = 0.412$	$S := (0.0001 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.25 \ 0.3 \ 0.35 \ 0.5 \ 0.75 \ 1)^T$ $S_n := (0.00049 \ 0.24 \ 0.49 \ 1 \ 1.22 \ 1.5 \ 1.71 \ 2.44 \ 3.66 \ 4.8)^T$
7. Сопротивление резистора цепи ротора	
$R_{д2} := 0.2 \cdot R_{н2}$ $R_{д2} = 1.601$	
8. Суммарное сопротивление роторной цепи	
$\Sigma R_2 := R_{фн2} + R_{д2}$ $\Sigma R_2 = 2.013$	
10. Активное сопротивление обмотки статора	
$R_{ст} := \alpha \cdot R_{рп}$ $R_{ст} = 0.346$	

Рис. 7.16

Исходные данные и начало расчета механических характеристик

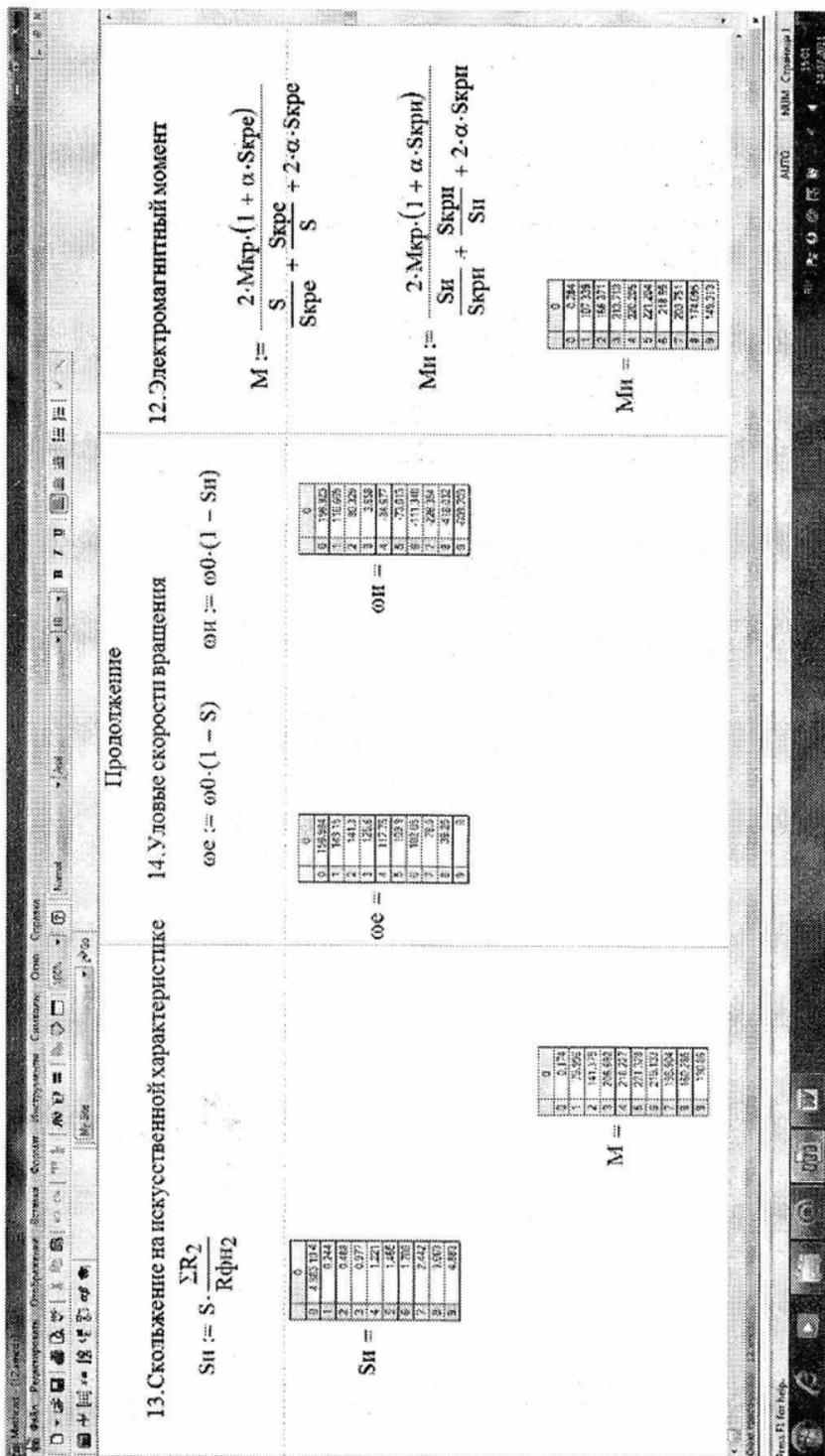


Рис. 7.17

Алгоритм расчета механических характеристик АД с фазным ротором

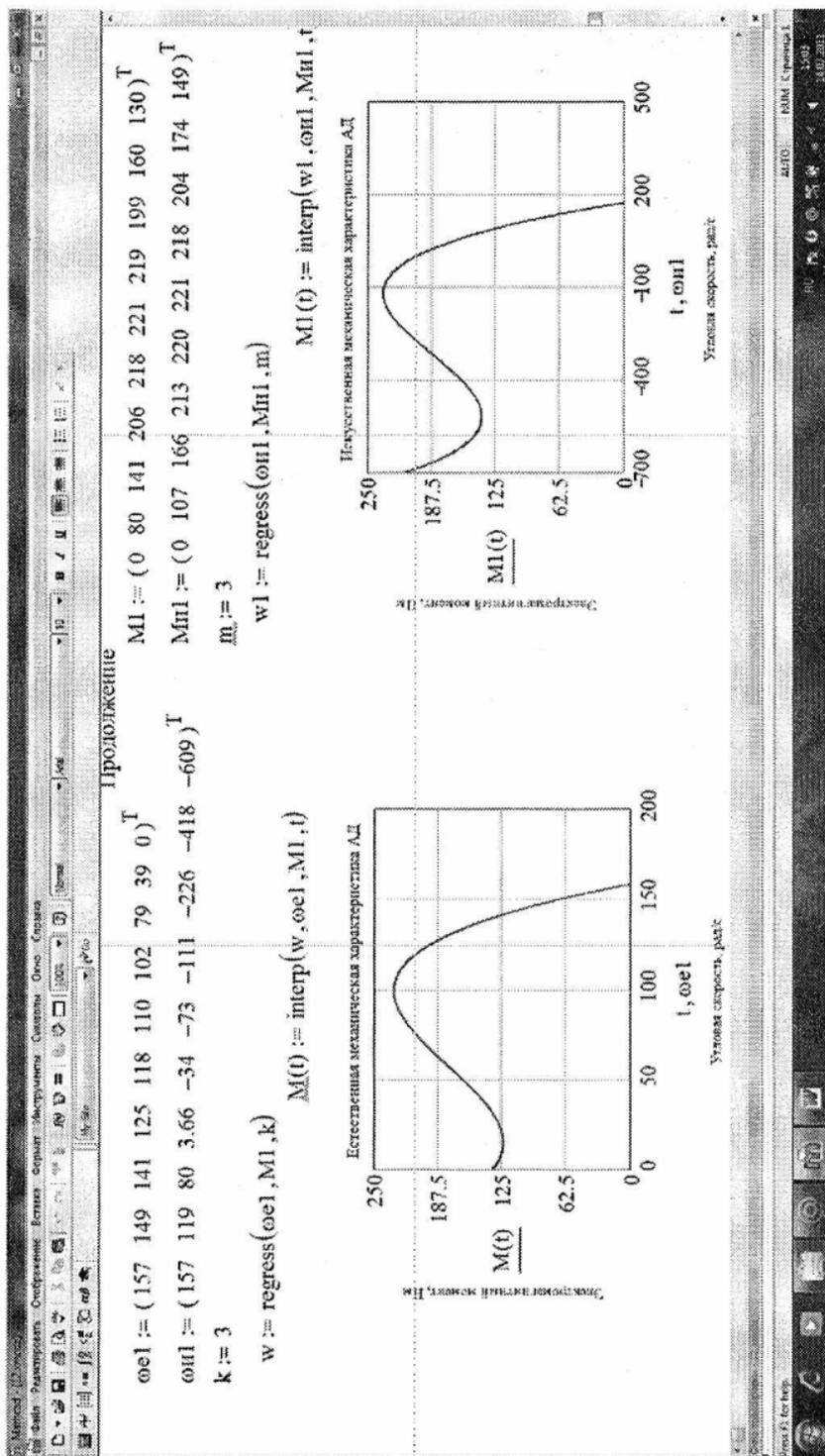


Рис. 7.18  
Построение механических характеристик АД



5. Обороты вращения электродвигателя:

$$n = \frac{60vk}{\pi D}.$$

6. Проверка выбранного электродвигателя на перегрузочную способность:

$$M_{\text{наиб}} < \beta M_{\text{max}}.$$

7. Максимальный момент электродвигателя кранового механизма:

$$M_{\text{наиб}} = \frac{9,55P_1}{n}.$$

Результаты расчета по представленному алгоритму и нагрузочная диаграмма графика работы кранового устройства даны на рисунке 7.19.

Наибольший электромагнитный момент меньше максимального момента ( $554,6 \text{ Н}_M < 792,2 \text{ Н}_M$ ), следовательно, выбранный электродвигатель проходит по перегрузочной способности.

**Пример 7.10.** Рассчитать мощность электродвигателя поршневого насоса, подающего холодную воду на высоту  $H = 34 \text{ м}$ , с производительностью  $Q = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ , если горизонтальная длина магистрали  $l = 1200 \text{ м}$ , диаметр подающих воду труб  $d = 135 \text{ мм}$ . Магистраль подачи жидкости содержит 2 заслонки, 2 вентилятора и 4 колена в  $90^\circ$  с радиусом закругления  $R = 500 \text{ мм}$ . КПД насоса  $\eta_n = 0,79\%$ , КПД передачи  $\eta_{\text{п}} = 0,9$ . Коэффициент  $\alpha$  берется для чугунных труб: бывших в употреблении  $\alpha = 9,2 \cdot 10^{-4}$ ; для новых  $\alpha = 7,4 \cdot 10^{-4}$ . Коэффициент  $k$  зависит от типа арматуры: для колен  $k = 0,155$ ; для вентиля  $k = 0,062$ ; для заслонок  $k = 0,063$ .

**Алгоритм решения задачи**

1. Потери напора определяются по формуле

$$H = H_M + H_K + H_3 + H_B.$$

2. Скорость движения воды в магистрали:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2}.$$

3. Потери напора в магистрали:

$$\Delta H_M = \frac{\alpha v^{1,75}}{d^{1,25}}.$$

Матисад - [Демонстр.]  
 Адрес: Редактировать... Отобразить... Вставить... Формат... Листовые... Свойства... Окан... Сервис...

### Расчет мощности АД для электропривода поршневого насоса

#### Исходные данные

$H := 34$      $l := 1200$      $\eta_n := 0.79$      $\alpha := 0.00092$      $k_k := 0.155$      $k_{зс} := 0.063$      $n_1 := 4$      $g := 9.81$   
 $Q := 0.02$      $d := 0.135$      $\eta_p := 0.9$      $R := 0.5$      $\rho := 1000$      $k_v := 0.49$      $k_{з2} := 1.3$      $n_2 := 2$      $n_3 := 2$

Решение

#### 1. Скорость движения воды

$$v := \frac{4Q}{\pi \cdot d^2}$$

$v = 1.397$

#### 3.1. В вентилях

$$\Delta H_v := k_v \cdot \frac{v \cdot n_2}{2 \cdot g}$$

$\Delta H_v = 0.098$

#### 3.2. Потери напора в остальных элементах

$$\Delta H_m := \frac{\alpha \cdot l \cdot v^{1.75}}{d^{1.25}}$$

$\Delta H_m = 24.226$

#### 3.3. В коленах

$$\Delta H_k := k_k \cdot \frac{v \cdot n_1}{2 \cdot g}$$

$\Delta H_k = 0.062$

#### 3. Потери напора в магистрали

$$P := \frac{k_{з} \cdot \rho \cdot Q \cdot (H + \Delta H)}{1000 \cdot \eta_n \cdot \eta_p}$$

$P = 20.949$

#### 3.2. В заслонках

$$\Delta H_{з} := k_{зс} \cdot \frac{v \cdot n_3}{2 \cdot g}$$

$\Delta H_{з} = 0.013$

#### 5. Мощность электродвигателя

$P = 20.949$

#### 4. Потери напора

$$\Delta H := \Delta H_m + \Delta H_k + \Delta H_v + \Delta H_{з}$$

$\Delta H = 24.398$

АВТО    ИМ    Страница 1  
15:45    19.07.2011

**Рис. 7.20**  
 Расчет мощности электродвигателя поршневого насоса

## 4. Мощность приводного электродвигателя насоса:

$$P = \frac{k_3 \rho g Q (H + \Delta H)}{1000 \eta_{\text{п}} \eta_{\text{н}}}.$$

Реализация рассматриваемого алгоритма решения задачи в электронной среде *Mathcad* представлена на рисунке 7.20.

По результатам расчета мощность электродвигателя поршневого насоса равна  $P = 20,95$  кВт, суммарные потери напора составляют  $H = 24,4$  м.

**Пример 7.11.** Рассчитать продолжительность запуска электропривода сепаратора молока, если входящий в его состав электродвигатель серии АИ имеет следующие паспортные данные:  $P_{\text{н}} = 2,2$  кВт;  $n_{\text{н}} = 1428$  мин<sup>-1</sup>;  $\lambda_{\text{п}} = 2,1$ ;  $\lambda_{\text{мин}} = 1,6$ ;  $\lambda_{\text{к}} = 2,4$ ;  $J_{\text{рот}} = 0,006$  кг·м<sup>2</sup>;  $m_{\text{б}} = 20$  кг;  $r_{\text{б}} = 0,25$  м;  $\eta_1 = 0,94$ ;  $\eta_2 = 0,96$ ;  $J_{\text{пер}} = 0,2 J_{\text{рот}}$ .

**Алгоритм решения задачи**

## 1. Момент инерции барабана сепаратора:

$$J_2 = \frac{m_{\text{б}} r_{\text{б}}^2}{2}.$$

## 2. Приведенный момент инерции барабана сепаратора:

$$J = J_{\text{рот}} + J_{\text{пер}} + \frac{J_2}{i^2}.$$

## 3. Приведенный статический момент сопротивления:

$$M_{\text{сн}} = \frac{P_{\text{м}}}{\omega_{\text{н}} \eta_2}.$$

## 4. Начальный момент сопротивления:

$$M_{\text{со}} = 0,1 M_{\text{сн}}.$$

## 5. Средняя кратность моментов определяется из уравнения

$$\lambda_{1\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{мин}} + \lambda_{\text{к}}}{3}.$$

## 6. Номинальный момент АД:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}.$$

## 7. Средний момент асинхронного электродвигателя при запуске:

$$M_{\text{ср}} = \lambda_{1\text{п}} M_{\text{н}}.$$

8. Средний статический момент во время запуска:

$$M_c \approx 0,5M_H.$$

9. Продолжительность запуска электропривода:

$$t_{\text{п}} = \frac{J\omega_H}{M_{1\text{п}} - M_c}.$$

На рисунке 7.21 приведена методика расчета продолжительности запуска электропривода сепаратора молока.

**Пример 7.12.** Определить мощность электродвигателя для пилорамы при следующих данных:  $d = 25$  мм;  $z = 6$ ;  $r = 200$  мм;  $s = 2$  мм;  $\Delta = 6$  мм/с;  $k = 110$ ;  $n = 250$  мин<sup>-1</sup>;  $\eta = 0,8$ .

**Алгоритм решения задачи**

1. Общая высота пропила рассчитывается:

$$\Sigma h = 0,75zd.$$

2. Усилие резания определяется:

$$F = ks\Sigma h \frac{\Delta}{2H}.$$

3. Средняя скорость пилы рассчитывается из уравнения

$$v = \frac{Hn}{30}.$$

4. Мощность электродвигателя находится по формуле

$$P = \frac{Fv}{1000\eta}.$$

По результатам расчета, представленного на рисунке 7.22, мощность электродвигателя пилорамы равна  $P = 7,73$  кВт.

**Пример 7.13.** Рассчитать и построить кривую разгона электропривода вентиляционной установки, если входящий в ее состав электродвигатель серии АИ имеет следующие номинальные данные:  $P_H = 11$  кВт;  $n = 975$  мин<sup>-1</sup>;  $I_H = 22,6$  А;  $\eta_H = 0,86$ ;  $\cos\varphi = 0,83$ ;  $\lambda_{\text{п}} = 2$ ;  $\lambda_{\text{max}} = 2,2$ ;  $\lambda_{\text{min}} = 1,6$ ;  $J = 0,55$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_B = 5,8$  кг·м<sup>2</sup>;  $p = 3$ .

**Алгоритм решения задачи**

1. Угловая скорость вращения ротора при номинальном режиме работы:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30}.$$

**РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕПАРАТОРА МОЛОКА**  
Исходные данные

$R_n := 2.2$   $\Omega_n := 1428$   $\lambda_n := 2.1$   $\lambda_{\text{min}} := 1.6$   $\lambda_k := 2.4$   $J_{\text{rot}} := 0.006$   $m_b := 20$   $\tau_b := 0.25$   $\eta_1 := 0.94$   $\eta_2 := 0.96$   $f := 0.18$   
 1. Момент инерции барабана сепаратора  
 $J_2 := \frac{m_b \cdot r_b^2}{2}$   $J_{\text{пер}} := 0.2 \cdot J_{\text{rot}}$   
 $J_2 = 0.625$   $J_{\text{пер}} = 1.2 \times 10^{-3}$   
 2. Приведенный момент инерции  
 $J := J_{\text{rot}} + J_{\text{пер}} + \frac{J_2}{i^2}$   $J = 19.297$   
 3. Угловая скорость вращения  
 $\omega_n := 0.105 \cdot \pi n$   $\omega_n = 149.94$   
 4. Момент сопротивления  
 $M_{\text{ср}} := \frac{R_n \cdot 10^3}{\omega_n \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}$   $M_{\text{ср}} = 16.259$   
 5. Начальный момент сопротивления  
 $M_{\text{с0}} := 0.1 \cdot M_{\text{ср}}$   $M_{\text{с0}} = 1.626$   
 6. Усредненная кратность моментов  
 $\lambda_{\text{ср}} := \frac{\lambda_n + \lambda_k + \lambda_{\text{min}}}{3}$   $\lambda_{\text{ср}} = 2.033$   
 7. Номинальный момент двигателя  
 $M_n := \frac{R_n \cdot 10^3}{\omega_n}$   $M_n = 14.673$   
 8. Средний момент двигателя при запуске  
 $M_{\text{спр}} := \lambda_{\text{ср}} \cdot M_n$   $M_{\text{спр}} = 29.834$   
 9. Средний момент сопротивления при запуске  
 $M_{\text{с}} := 0.5 \cdot M_n$   $M_{\text{с}} = 7.336$   
 10. Продолжительность запуска  
 $t_{\text{п}} := \frac{J \cdot \omega_n}{M_{\text{спр}} - M_{\text{с}}}$   $t_{\text{п}} = 128.609$

АПС  
 НИИ Станков  
 1411  
 1800311

Рис. 7.21

Алгоритм расчета времени разгона электропривода сепаратора молока

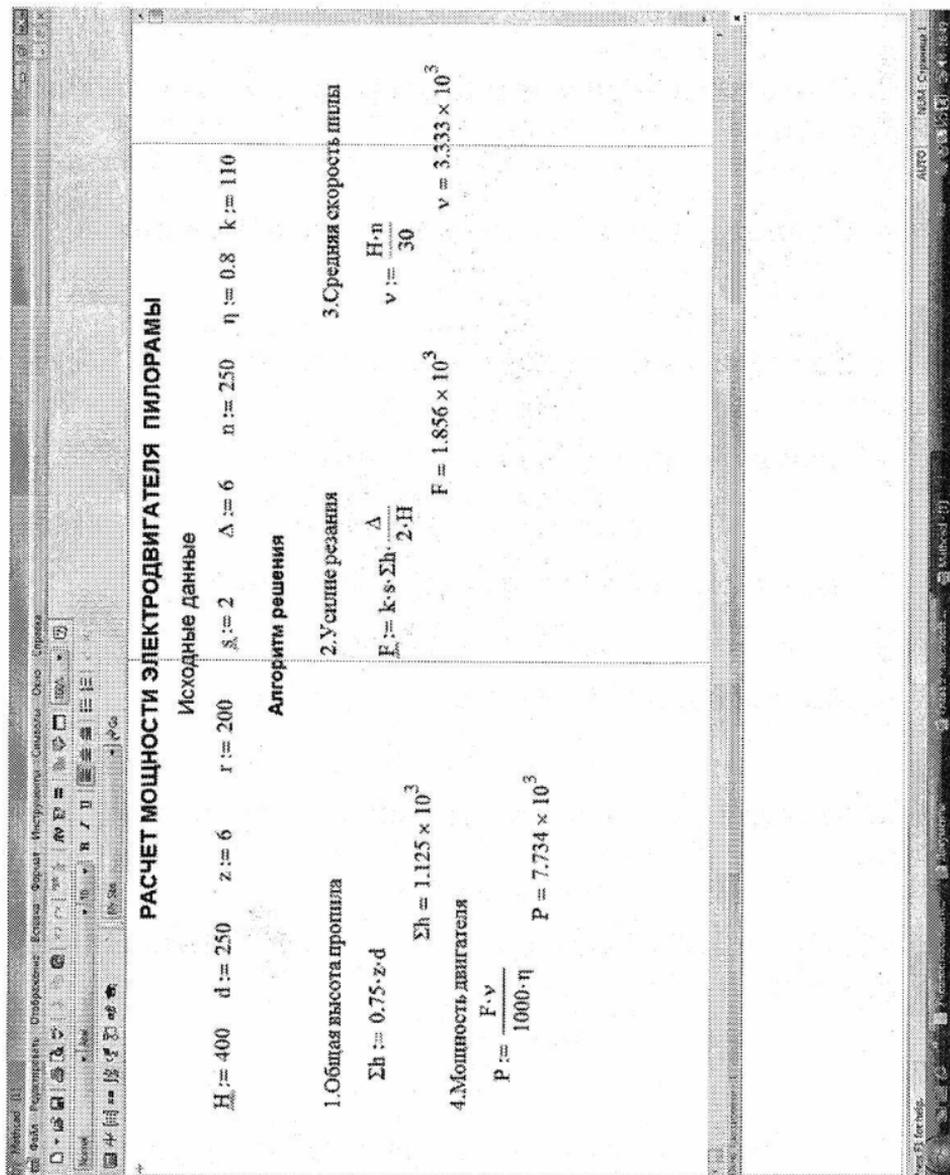


Рис. 7.22

Расчет мощности двигателя электропривода пилорамы

2. Угловая скорость вращения ротора при идеальном холостом ходе:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p},$$

где  $f$  — частота питающей сети;  $p$  — количество пар полюсов.

3. Скольжение при номинальном режиме работы электропривода:

$$S_H = \frac{(\omega_0 - \omega_H)}{\omega_0}.$$

4. Номинальный момент электрической машины:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}.$$

5. Критический момент электродвигателя:

$$M_K = \lambda_K M_H.$$

6. Критическое скольжение двигателя:

$$S_K = S_H (\lambda_K + \sqrt{\lambda_K^2 - 1}).$$

7. Пусковой момент электрической машины:

$$M_{II} = \lambda_{II} M_H.$$

8. Минимальный момент при  $S_{\min} = 0,85$ :

$$M_{\min} = \lambda_{\min} M_H.$$

9. Угловая скорость для нескольких значений скольжения:

$$\omega_i = \omega_0(1 - S_i).$$

10. Промежуточные значения момента вычисляются по формуле

$$M_i = \frac{2M_K}{\frac{S_i}{S_K} + \frac{S_K}{S_i}}.$$

11. Момент сопротивления вентилятора определяется из выражения

$$M_{ci} = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left( \frac{\omega_i}{\omega_H} \right)^2,$$

где  $M_0$  — начальный момент сопротивления вентилятора;  $M_{сн}$  — момент сопротивления при номинальном режи-

ме работы. Начальный момент сопротивления вентилятора ориентировочно принимается  $M_0 = (0,1-0,3) M_{сн}$ .

12. Приращение времени по участкам динамической кривой:

$$\Delta t = J \frac{\Delta \omega_i}{\Delta M_i}.$$

Исходные данные и алгоритм расчета заносятся на листинг электронной среды *Mathcad*, и производится расчет механических характеристик двигателя вентилятора, на основании которых рассчитывается кривая разгона системы «электродвигатель — рабочая машина» (рис. 7.23–7.27).

Для построения более точных графиков в электронной среде *Mathcad* предусмотрена функция «сплайн-интерполяция». На рисунке 7.25 представлены графики механических характеристик электродвигателя и рабочей машины, которые построены с применением интерполяции кубическим сплайном.

Использование указанной функции дает возможность соединять промежуточные точки не отрезками прямой линии, а скругленными кривыми, что обеспечивает построение плавной графической зависимости.

**Пример 7.14.** Для двигателя постоянного тока рассчитать сопротивление двухступенчатого пускового реостата, приняв пусковые токи  $I_1 = 30$  А;  $I_2 = 20$  А, номинальное напряжение  $U_n = 220$  В, номинальный ток  $I_n = 15,6$  А, активное сопротивление двигателя  $R_d = 2,85$  Ом. График электромеханической характеристики строится по следующим данным:  $\omega = (209,4; 159,1; 126,1; 104,7; 89,2; 80,6; 73,5; 68; 63,8)$ ,  $I = (6,24; 9,36; 12,5; 15,6; 18,7; 21,8; 25; 28,1; 31,2)$ .

#### Алгоритм решения

1. По данным задания строится естественная электромеханическая характеристика  $\omega = f(I)$ . В первом квадранте декартовой системы координат откладываются в масштабе значения пусковых токов  $I_1, I_2$ , и через них проводятся перпендикулярные прямые до пересечения с естественной электромеханической характеристикой (рис. 7.28).

**Расчет механических характеристик системы "электродвигатель - рабочая" машина**

**Исходные данные**  
 $P_n := 11000$  Вт  $n_n := 975$  об/мин  $\eta := 0.86$   $\cos\phi := 0.85$   $\lambda_{\text{min}} := 2.2$   $\lambda_{\text{max}} := 1.6$   $J_{\text{л}} := 0.55$  р  $\rho := 3$   
 $f := 50$   $J_{\text{в}} := 5.3$   $S_{\text{min}} := 0.85$

**Решение задачи**

1. Угловая скорость ротора в номинальном режиме  

$$\omega_n := \frac{\pi \cdot n_n}{30} \quad \omega_n = 102.102$$

3. Скользящие в номинальном режиме работы  

$$S_n := \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} \quad S_n = 0.025$$

5. Критический момент  

$$M_k := \lambda_{\text{max}} \cdot M_n \quad M_k = 237.018$$

7. Пусковой момент  

$$M_p := \lambda_p \cdot M_n \quad M_p = 215.471$$

9. Угловая скорость для нескольких значений  $S_i$   

$$S_i := (1 - 0.85 \cdot 0.6 \cdot 0.4 \cdot 0.11 \cdot 0.026 \cdot 0.001)^T$$

$$\omega_i := \omega_0 \cdot (1 - S_i)$$

0
15.768
41.888
62.832
93.201
101.997
104.615

2. Скорость вращения ротора в режиме холостого хода  

$$\omega_0 := \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad \omega_0 = 104.72$$

4. Номинальный момент  

$$M_n := \frac{P_n}{\omega_n} \quad M_n = 107.736$$

6. Критическое скольжение  

$$S_k := S_n \cdot (\lambda_{\text{max}} + \sqrt{\lambda_{\text{max}}^2 - 1}) \quad S_k = 0.104$$

8. Минимальный момент  

$$M_{\text{min}} := \lambda_{\text{min}} \cdot M_n \quad M_{\text{min}} = 172.377$$

10. Промежуточные значения момента  

$$S_3 := 0.6 \quad S_4 := 0.4$$

$$M_3 := \frac{2 \cdot M_k}{S_3 + S_k} \quad M_3 = 79.762$$

$$M_4 := \frac{2 \cdot M_k}{S_4 + S_k} \quad M_4 = 115.436$$

Рис. 7.23

Расчет механических характеристик электропривода вентилятора

**ПРОДОЛЖЕНИЕ 1**

11. Составление матрицы для построения механической характеристики

$$M_i := (M_{i1} \ M_{i2} \ M_{i3} \ M_{i4} \ M_{i5} \ M_{i6})^T$$

$$k := \text{espline}(\omega_i, M_i) \quad M(t) := \text{interp}(k, \omega_i, M_i, t)$$

12. Момент сопротивления вентилятора

$$M_{сн} := M_{и0} \quad M_{0} := 0.1 \cdot M_{сн}$$

$$M_{сг} := M_{0} + (M_{сн} - M_{0}) \cdot \left( \frac{\omega_i}{\omega_{н}} \right)^2$$

13. Суммарный момент инерции

$$J := J_d + J_v \quad J = 5.85$$

14. Расчет динамического момента

$$M_{дин} := M_i - M_{сг}$$

10.774
13.069
27.093
47.493
91.566
107.537
112.568

204.698
159.309
52.669
67.943
145.452
0.199
-112.568

$$d := \text{espline}(\omega_i, M_{сг})$$

$$M_{сг}(t) := \text{interp}(d, \omega_i, M_{сг}, t)$$

$$a := \text{espline}(\omega_i, M_{дин})$$

$$M_{дн}(u) := \text{interp}(a, \omega_i, M_{дин}, u)$$

**Рис. 7.24**

Продолжение расчета кривой разгона электропривода вентилятора

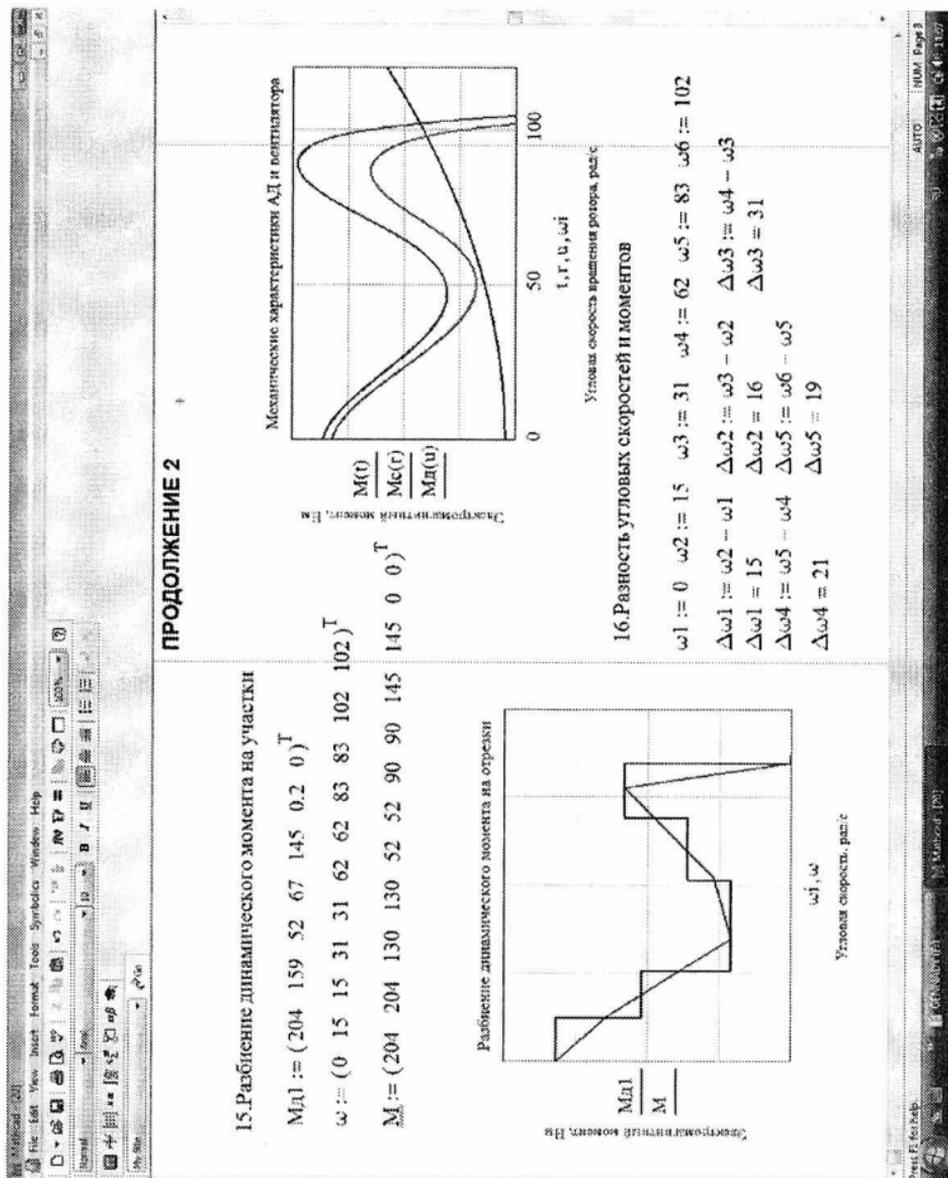
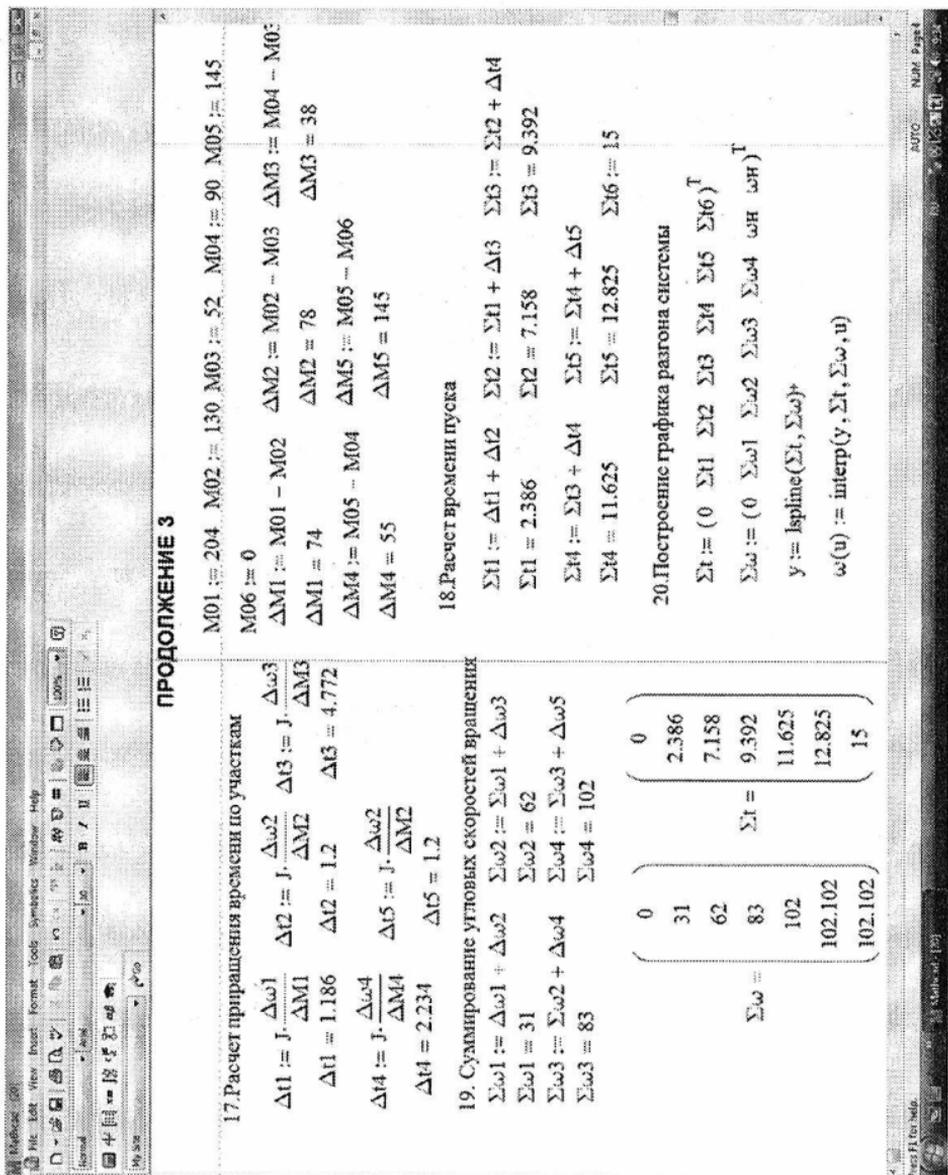


Рис. 7.25

Построение механических характеристик электродвигателя и рабочей машины — вентилятора



**Рис. 7.26**  
Расчет приращения времени разгона по участкам

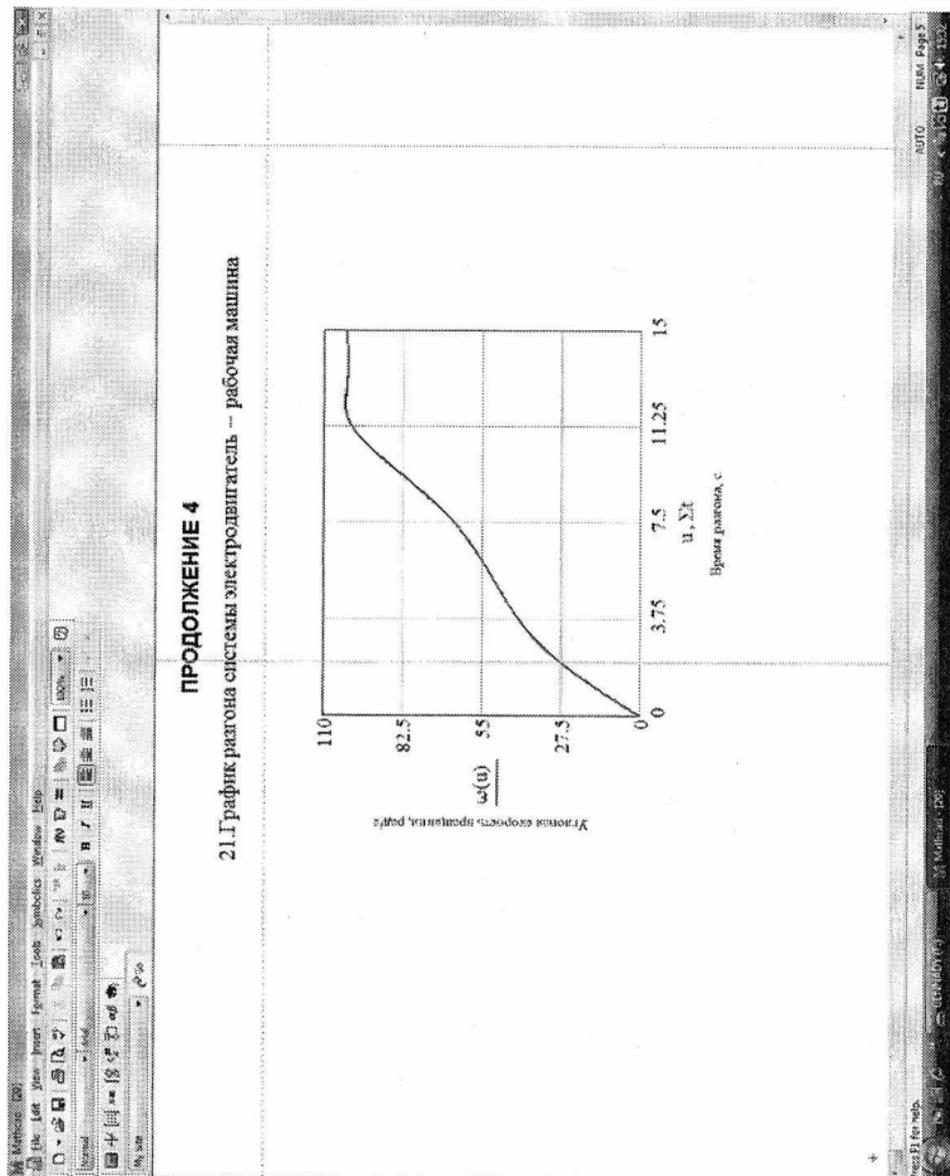
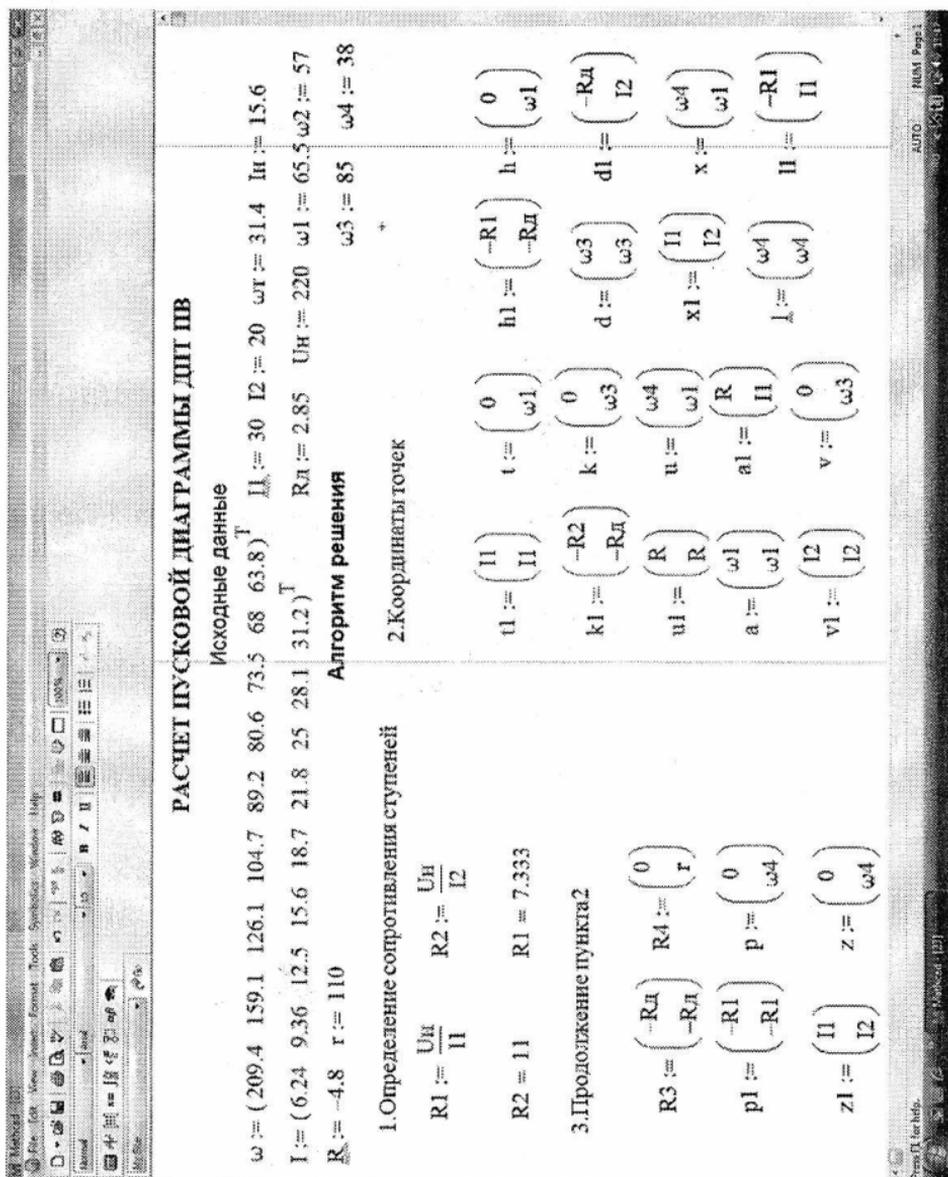


Рис. 7.27

График разгона электропривода с АД



**Рис. 7.28**  
Алгоритм расчета пусковой диаграммы ДПТ ПВ

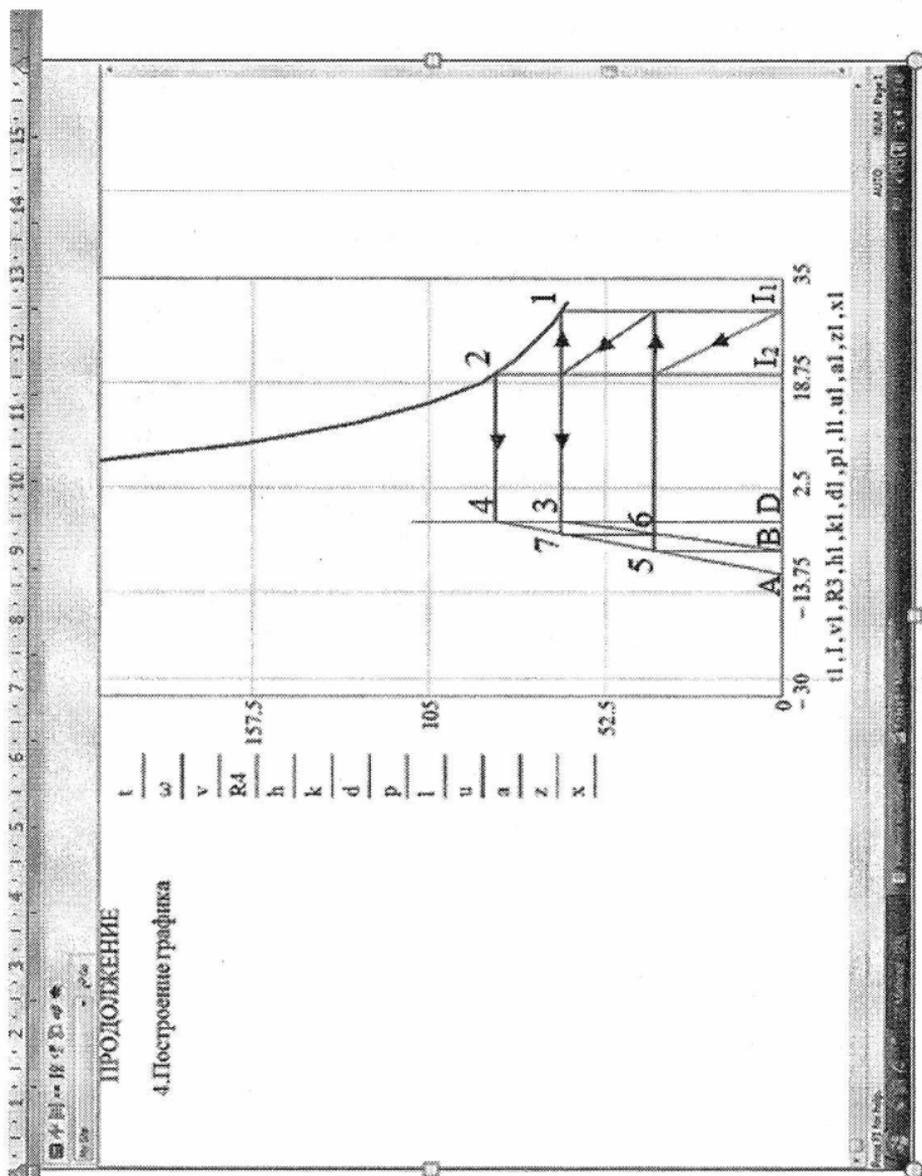


Рис. 7.29

Построение графика пусковой диаграммы ДПТ ПВ в среде *Mathcad*

2. Во втором квадранте в масштабе сопротивления по оси абсцисс откладывается отрезок  $[0, D]$ , равный  $R_d$ , а из точки  $D$  поднимается вертикаль. Из точек 1 и 2 проводятся две параллельные оси абсцисс линии до пересечения с прямой  $[0, D]$  и обозначаются точки 3 и 4.

3. Рассчитываются сопротивления ступеней резисторов по формулам

$$R_1 = \frac{U_n}{I_1}; \quad R_2 = \frac{U_n}{I_2}.$$

4. От начала координат откладываются отрезки  $[0, A]$  и  $[0, B]$ , равные сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$ .

5. Точки  $A$  и  $B$ , а также 3 и 4 соединяются между собой в виде отрезков  $[A, 3]$  и  $[B, 4]$ , полученные участки отражают линейную зависимость между скоростью ДПТ ПВ и сопротивлением якорной цепи при постоянном токе.

6. Через точку  $B$  проводится вертикальная линия до пересечения с отрезком  $[A, 4]$  в точке 5, затем через точку 5 — горизонтальная линия до пересечения с отрезком  $[B, 3]$  в точке 6. Из точки 6 выходит вертикаль до пересечения с отрезком  $[A, 4]$  и обозначается точка 7. Параллельно оси абсцисс проводится прямая линия до пересечения с естественной механической характеристикой в точке 1. В первом квадранте между токами  $I_1$  и  $I_2$  строится диаграмма разгона якоря электродвигателя, которая на рисунке обозначена стрелками. Построение пусковой диаграммы считается правильной, когда отрезок  $[7, 3]$  находится на прямой линии, проходящей через точку 1. Отрезки  $[5, 6]$  и  $[7, 3]$  в масштабе сопротивления соответствуют первой и второй ступеням пускового резистора.

На рисунке 7.28 представлены исходные данные, расчет ступеней пусковых резисторов и координаты точек, на основании которых строится пусковая диаграмма ДПТ ПВ (рис. 7.29), в электронном листинге программы *Mathcad*.

**Пример 7.15.** Для двухскоростного электродвигателя серии АИ рассчитать потери энергии в обмотках при его запуске в одну и две ступени в режиме холостого хода, если двигатель имеет следующие технические характеристики:  $P_n = 7,5$  кВт;  $n_n = 1475$  мин<sup>-1</sup>;  $n_{01} = 1000$  мин<sup>-1</sup>;  $n_{02} = 1500$  мин<sup>-1</sup>;  $J = 0,028$  кг·м<sup>2</sup>;  $R = 1,5$  Ом.

### Алгоритм решения задачи

1. Расчет первой и второй угловых синхронных скоростей вращения по формулам

$$\omega_{01} = \frac{\pi n_{01}}{30}; \omega_{02} = \frac{\pi n_{02}}{30}.$$

2. Полные потери при прямом запуске до скорости  $\omega_{02}$  находятся из выражения

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{J}{2} \omega_{02}^2 (1 + R).$$

3. Потери энергии при ступенчатом пуске до скорости  $\omega_{01}$ :

$$\Delta A_{\text{п1}} = \frac{J}{2} \omega_{02}^2 (1 + R).$$

4. Потери энергии в период разгона от скорости  $\omega_{01}$  до  $\omega_{02}$ :

$$\Delta A_{\text{п2}} = \frac{J}{2} (\omega_{01} - \omega_{02})^2 (1 + R).$$

5. Полные потери при ступенчатом пуске находятся как

$$A_{\text{пп}} = A_{\text{п1}} + A_{\text{п2}}.$$

6. Потери в период торможения от скорости  $\omega_{02}$  до 0 рассчитываются из выражения

$$\Delta A_{\text{т1}} = 3 \frac{J}{2} \omega_{02}^2 (1 + R).$$

7. Потери энергии при ступенчатом торможении от угловой скорости вращения  $\omega_{02}$  до  $\omega_{01}$  определяются по уравнению

$$\Delta A_{\text{т1}} = \frac{J}{2} (\omega_{01} - \omega_{02})^2 (1 + R).$$

8. Торможение противовключением от скорости  $\omega_{01}$  до 0 вычисляется как

$$\Delta A_{\text{т2}} = 3 \frac{J}{2} \omega_{01}^2 (1 + R).$$

9. Суммарные потери энергии при ступенчатом торможении двигателя находятся из выражения

$$A_{\text{тс}} = A_{\text{т1}} + A_{\text{т2}}.$$

На рисунке 7.30 представлен электронный алгоритм расчета, из которого видно, что потери энергии во время

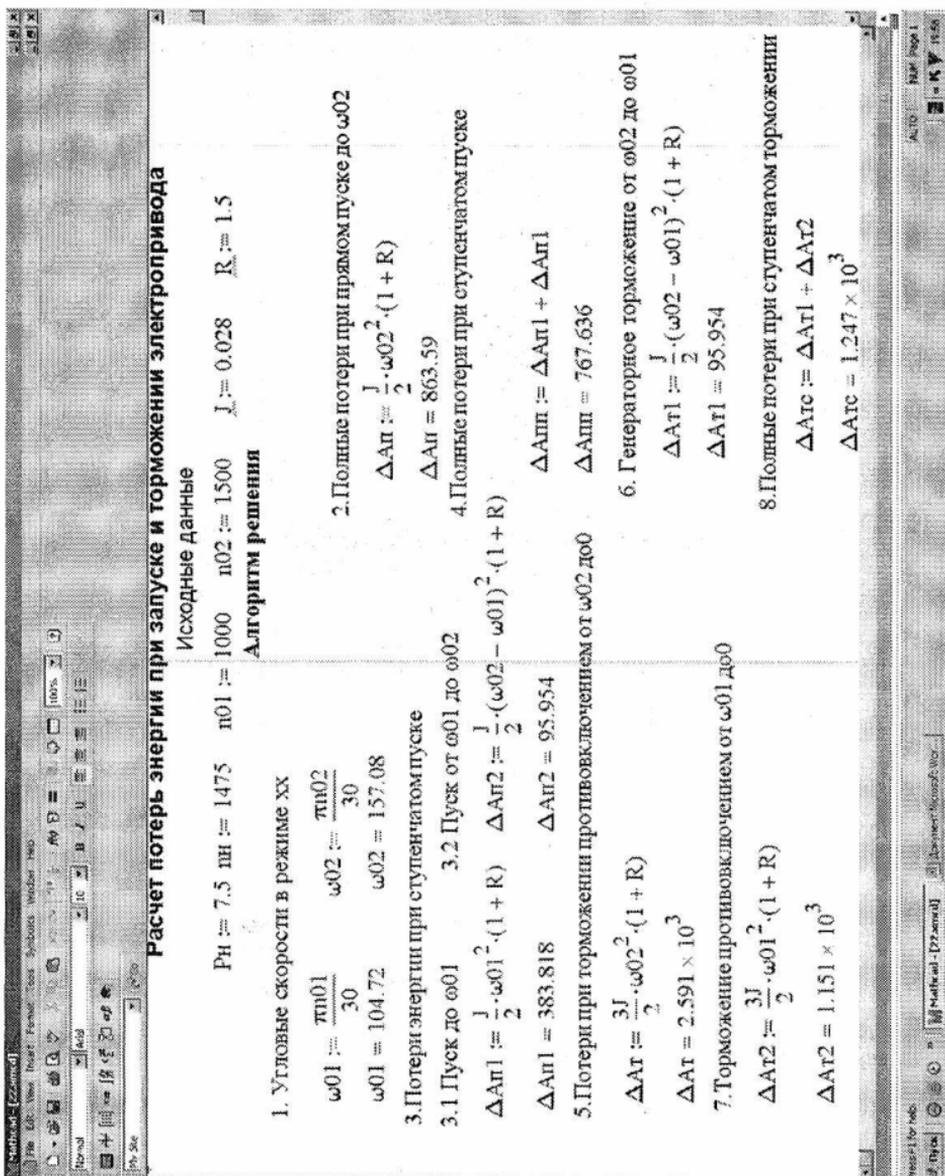


Рис. 7.30

Расчет потерь энергии при запуске и торможении асинхронного электропривода



двухступенчатого запуска электрического двигателя несколько меньше ( $A_{\text{шт}} = 767,64 \text{ Вт}\cdot\text{с}$ ), чем при прямом пуске ( $A_{\text{п}} = 863,59 \text{ Вт}\cdot\text{с}$ ). Аналогичное снижение электрических потерь наблюдается и в момент противовключения электродвигателя с введением двух тормозных резисторов.

**Пример 7.16.** Для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения рассчитать сопротивление цепи якоря в режиме торможения противовключением. Груз опускается при скорости вращения электродвигателя  $\omega = 32 \text{ рад/с}$  и токе  $I_{\text{н}} = 15,6 \text{ А}$ . Расчет сопротивления проиллюстрировать графически. Данные для построения электромеханической характеристики и расчета пусковых резисторов берутся из примера 7.15.

#### Алгоритм решения задачи

1. Строится естественная электромеханическая характеристика.

2. На графике, построенном в электронном поле среды *Mathcad* с помощью координатных точек, с учетом  $I_{\text{н}}$  проводится прямая ( $F, Z$ ).

3. Рассчитывается тормозное сопротивление из выражения

$$R_{\text{т}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}.$$

4. Величина полученного сопротивления откладывается с помощью координатных точек по оси сопротивлений, второй квадрант декартовой системы координат. Через точки  $A$  и  $D$ , обозначенные на прямой ( $B, D$ ), проводится прямая ( $D, K$ ), и на пересечении с прямой ( $F, K$ ) ставится точка  $K$ .

5. Отрезок [ $K, H$ ] в масштабе сопротивления соответствует величине тормозного резистора.

6. Значение дополнительного резистора обозначено отрезком  $R_{\text{тд}}$ , величина которого рассчитывается как

$$R_{\text{тд}} = R_{\text{т}} - R_2.$$

Исходя из проведенных расчетов (рис. 7.31) было установлено, что для осуществления процесса торможения противовключением ДПТ ПВ необходимо в цепь якоря включить дополнительный реостат с сопротивлением  $3,1 \text{ Ом}$ .

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АИ

#### КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

**А**синхронные электродвигатели — самые распространенные из всех видов электрических машин из-за их простоты, надежности, небольшого веса, низкой стоимости и высоких энергетических и удельных характеристик.

Электродвигатели отличаются по степени защиты (например: IP23, IP44), способу охлаждения (например: IC 01, IC 0141) и способу монтажа (например: IM 1001).

Электрические машины подразделяются по климатическим условиям эксплуатации. Выпускаются двигатели для работы на суше, реках, озерах и для климатических районов: с умеренным климатом — У; с холодным климатом — ХЛ; с влажным тропическим климатом — ТВ; с сухим тропическим — ТС; с сухим влажным — Т и общеклиматического исполнения — О.

Пример обозначения асинхронных двигателей: АИР280S8 — асинхронный двигатель Интерэлектро (международная организация стран СЭВ); Р — вариант увязки мощности и установочных размеров; 280 — высота оси вращения, мм; S — длина корпуса по установочным размерам; 8 — число полюсов ( $750 \text{ мин}^{-1}$ ).

Электродвигатели серии АИ выпускаются мощностью от 0,06 до 400 кВт и отвечают всем рекомендациям Международной электротехнической комиссии (МЭК) и отечественным стандартам. Электрические машины изготавливаются с фазным ротором (Ж), частотно регулируемые, многоскоростные, с повышенным скольжением (С) и пусковым моментом (Р), однофазные (У, Е) и трехфазные, на частоты тока 50–60 Гц.

По климатическому исполнению двигатели классифицируются на тропические, влагостойкие, химостойкие и водостойкие.

Серия АИ выпускается в двух исполнениях: АИР — для внутренних поставок; АИС — для продаж только на экспорт. В электродвигателях данной серии значительно улучшены пусковые и виброакустические характеристики, повышена надежность и снижен расход меди на 2,5% и электротехнической стали на 4%, конструкционных материалов на 15–20%.

Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	cosφ	$S_n$ , %	$M_n$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_{min}}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_H}$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>	Масса, кг
АИР50А2	0,09	60	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	0,000025	2,5
АИР50В2	0,12	63	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	0,000028	2,8
АИР56А2	0,18	68	0,78	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00042	3,4
АИР56В2	0,25	69	0,79	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00047	3,9
АИР63А2	0,37	72	0,86	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00076	4,7
АИР63В2	0,55	75	0,85	9	2,2	2,2	1,8	5	0,0009	5,45
АИР71А2	0,75	78,5	0,83	6	2,1	2,2	1,6	6	0,00097	6,5
АИР71В2	1,1	79	0,83	6,5	2,1	2,2	1,6	6	0,0011	8,8
АИР80А2	1,5	81	0,85	5	2,1	2,2	1,6	7	0,0018	9,8
АИР80В2	2,2	83	0,87	5	2	2,2	1,6	7	0,0021	13,2
АИР90L2	3	84,5	0,88	5	2	2,2	1,6	7	0,0035	16,7
АИР100S2	4	87	0,88	5	2	2,2	1,6	7,5	0,0059	21,6
АИР100L2	5,5	88	0,89	5	2	2,2	1,6	7,5	0,0075	27,4
АИР112M2	7,5	87,5	0,88	3,5	2	2,2	1,6	7,5	0,01	41
АИР132M2	11	88	0,9	3	1,6	2,2	1,2	7,5	0,023	64

Продолжение табл.

Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	$\cos\varphi$	$S_n$ , %	$M_n$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	$\frac{M_{\min}}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>	Масса, кг
АИР160S2	15	90	0,89	3	1,8	2,7	1,7	7	0,039	100
АИР160M2	18,5	90,5	0,9	3	2	2,7	1,8	7	0,043	110
АНР180S2	22	90,5	0,89	2,7	2	2,7	1,9	7	0,057	160
АИР180M2	30	91,5	0,9	2,5	2,2	3	1,9	7,5	0,07	180
АИР200M2	37	91,5	0,87	2	1,6	2,8	1,5	7	0,13	220
АИР200S2	45	92	0,88	2	1,8	2,8	1,5	7,5	0,14	240
АИР225M2	55	92,5	0,91	2	1,8	2,6	1,5	7,5	0,22	320
АИР250S2	75	93	0,9	2	1,8	3	1,6	7,5	0,41	425
АИР250M2	90	93	0,92	2	1,8	3	1,6	7,5	0,46	455
<b>Синхронная частота вращения 1500 об/мин</b>										
АИР50A4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000029	2,6
АИР50B4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000033	2,9
АИР56A4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5	0,000070	3,35
АИР56B4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5	0,000079	3,9
АИР63A4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0012	4,7

АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5	0,0013	7,8
АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5	0,0014	8,8
АИР80А4	1,1	75	0,81	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0032	9,9
АИР80В4	1,5	78	0,83	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0033	12,1
АИР90Л4	2,2	81	0,83	7	2,1	2,2	1,6	6,5	0,0056	17
АИР100S4	3	82	0,83	6	2	2,2	1,6	7	0,0087	21,6
АИР100Л4	4	85	0,84	6	2	2,2	1,6	7	0,011	27,3
АИР112М4	5,5	85,5	0,86	4,5	2	2,5	1,6	7	0,017	41
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2	2,5	1,6	7,5	0,028	58
АИР132М4	11	87,5	0,87	3,5	2	2,7	1,6	7,5	0,04	70
АИР160Б4	15	90	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	0,078	100
АИР160М4	18,5	90,5	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	0,1	110
АИР180S4	22	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7	0,15	170
АИР180М4	30	92	0,87	2	1,7	2,7	1,5	7	0,19	190
АИР200М4	37	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	0,28	245
АИР200S4	45	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	0,34	270
АИР225М4	55	93	0,89	2	1,7	2,6	1,6	7	0,51	335
АИР250Б4	75	94	0,88	1,5	1,7	2,5	1,4	7,5	0,89	450

Продолжение табл.

Тип двигателя	$P_{\text{в}}, \text{кВт}$	$\eta_{\text{в}}, \%$	cosφ	$S_{\text{в}}, \%$	$M_{\text{п}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{н}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}}$	$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	Масса, кг
АИР250М4	90	94	0,89	1,5	1,5	2,5	1,3	7,5	1,1	480
АИР280S4	110	93,5	0,91	2,2	1,6	2,2	1	6,5	2,3	594
АИР280М4	132	94	0,93	2,2	1,6	2,2	1	6,5	2,5	752
АИР315S4	160	93,5	0,91	2	1,4	2	1	5,5	3,1	896
АИР315М4	200	94	0,92	2	1,4	2	0,9	5,5	3,6	1000
АИР355S4	250	94,5	0,92	2	1,4	2	0,9	7	6	1275
АИР355М4	315	94,5	0,92	2	1,4	2	0,9	7	7	1480
<b>Синхронная частота вращения 1000 об/мин</b>										
АИР63А6	0,19	56	0,62	14	2	2,2	1,6	4	0,0018	4,65
АИР63В6	0,25	59	0,62	14	2	2,2	1,6	4	0,0022	5,6
АИР71А6	0,37	65	0,65	8,5	2	2,2	1,6	4,5	0,0017	7,8
АИР80В6	1,1	74	0,74	8	2	2,2	1,6	4,5	0,0046	13,4
АИР90L6	1,5	76	0,72	7,5	2	2,2	1,6	6	0,0073	16,9
АИР100L6	2,2	81	0,74	5,5	2	2,2	1,6	6	0,013	22,8
АИР112МА6	3	81	0,76	5	2	2,2	1,6	6	0,017	35
АИР112МВ6	4	82	0,81	5	2	2,2	1,6	6	0,021	40,4
АИР132S6	5,5	85	0,8	4	2	2,2	1,6	7	0,04	57
АИР132М6	7,5	85,5	0,81	4	2	2,2	1,6	7	0,058	68
АИР160S6	11	88	0,83	3	2	2,7	1,6	6,5	0,12	100

АИР160М6	15	88	0,85	3	2	2,7	1,6	6,5	0,15	120
АИР180М6	18,5	89,5	0,85	2	1,8	2,4	1,6	6,5	0,2	180
АИР200М6	22	90	0,83	2	1,6	2,4	1,4	6,5	0,36	225
АИР200L6	30	90	0,85	2,5	1,6	2,4	1,4	6,5	0,4	250
АИР225М6	37	91	0,85	2	1,5	2,3	1,4	6,5	0,61	305
АНР250S6	45	92,5	0,85	2	1,5	2,3	1,4	6,5	1	390
АИР250М6	55	92,5	0,86	2	1,5	2,3	1,4	6,5	1,1	430
АИР280S6	75	92,5	0,9	2,2	1,3	2,2	1	6,5	2,9	637
АИР280М6	90	93	0,9	2,2	1,4	2,4	1	6,5	3,4	702
АИР315S6	110	93	0,92	2,3	1,4	2,3	1	6	4	847
АИР315М6	132	93,5	0,9	2,3	1,4	2,3	1	6,5	4,5	950
АИР355B6	160	94	0,9	2,2	1,6	2	1	7	7,3	1136
АИР355М6	200	94	0,9	2,2	1,6	2	0,9	7	8,8	1280

**Синхронная частота вращения 750 об/мин**

АИР71B8	0,25	56	0,65	8	1,8	1,9	1,4	4	0,0019	7,8
АИР80A8	0,37	60	0,61	6,5	1,8	1,9	1,4	4	0,0034	13,8
АИР80B8	0,55	64	0,63	6,5	1,8	1,9	1,4	4	0,0041	13,5
АИР90L8	0,75	70	0,66	7	1,6	1,7	1,2	3,5	0,0067	19,7
АИР90LB8	1,1	72	0,70	7	1,6	1,7	1,2	3,5	0,0086	22,3
АИР100L8	1,5	76	0,73	6	1,6	1,7	1,2	5,5	0,013	31,3
АИР112MA8	2,2	76,5	0,71	5,5	1,8	2,2	1,4	6	0,017	36

Продолжение табл.

Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	cosφ	$S_n$ , %	$M_n$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_{min}}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>	Масса, кг
АИР112МВ8	3	79	0,74	5,5	1,8	2,2	1,4	6	0,025	41
АИР132S8	4	83	0,7	4,5	1,8	2,2	1,4	6	0,042	56
АИР132М8	5,5	83	0,74	5	1,8	2,2	1,4	6	0,057	70
АИР160S8	7,5	87	0,75	3	1,6	2,4	1,4	5,5	0,12	100
АИР160М8	11	87,5	0,75	3	1,6	2,4	1,4	6	0,15	120
АИР180М8	15	89	0,82	2,5	1,6	2,2	1,5	5,5	0,23	180
АИР200М8	18,5	89	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6	0,36	225
АИР200L8	22	90	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6	0,4	250
АИР225М8	30	90,5	0,81	2,5	1,4	2,3	1,3	6	0,61	305
АИР250S8	37	92,5	0,78	2	1,5	2,3	1,4	6	1,1	400
АИР250М8	45	92,5	0,79	2	1,4	2,2	1,3	6	1,2	430
АИР280S8	55	92	0,86	3	1,3	2,2	1	6	3,2	643
АИР280М8	75	93	0,87	3	1,4	2,2	1	6	4,1	735
АИР315S8	90	93	0,85	1,5	1,2	2,2	1	6	4,9	927
АИР315М8	110	93	0,86	1,5	1,1	2,2	0,9	6	5,8	1001
АИР355S8	132	93,5	0,85	2	1,2	2	0,9	6,5	9	1175
АИР355М8	160	93,5	0,85	2	1,2	2	0,9	6,5	10	1280

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

**А**втоматические выключатели предназначены для коммутации силовых цепей и защиты электроприемников от перегрузки и режимов короткого замыкания. Аппараты снабжаются тепловыми и электромагнитными расцепителями, а также дугогасящими устройствами в виде фибровых пластин или дугогасящих камер. Выключатели выбираются по номинальному току. Для силовых одиночных потребителей тока уставок теплового и электродинамического расцепителей определяются из неравенств:

$$I_T \leq 1,25I_{\text{ном}}; I_3 \leq 1,2I_{\text{пуск}}$$

Для групповых электроприемников, например, электрических двигателей соизмеримой мощности, с учетом наибольшего суммарного группового тока  $I_{\text{max}}$  в номинальном режиме работы, ток уставок теплового и электромагнитного расцепителей должен удовлетворять неравенствам:

$$I_T \leq 1,1I_{\text{max}}; I_3 \leq 1,2(I_{\text{пуск}} + I_{\text{max}}).$$

Автоматические выключатели выпускаются на напряжения: переменное 220–660 В и постоянное 110–440 В.

Преимущество автоматических выключателей перед плавкими предохранителями состоит в том, что они обладают многократностью действия. После срабатывания плавкого предохранителя требуется замена плавкой вставки. Автоматический выключатель по завершению устранения причины срабатывания подготавливается для повторной работы нажатием на кнопку или поворотом рукоятки.

Для защиты двигателей от перегрева при пониженном напряжении кроме автоматических выключателей с тепловыми расцепителями применяются выключатели с расцепителями минимального напряжения. При значительном снижении или исчезновении напряжения якорь расцепителя минимального напряжения срабатывает и, воздействуя на защелку, размыкает главные контакты автоматического выключателя. Если напряжение соответствует стандартному значению — якорь втянут, а контакты выключателя замкнуты.

Одно- и двухполюсные автоматические выключатели применяются в однофазных цепях, трехполюсные — в трехфазных.

Марка	Число полюсов	Номинальное напряжение, $U_n$ , В	Номинальный ток, $I_n$ , А	Ток установки расцепителя	Степень защиты	Габаритные размеры, мм
АЕ 1031	1	220/380	6; 10; 16; 20; 25	1,5 In	IP 20	20×90×70
АЕ 2044	1	220/380/440	10; 12,5; 16; 25; 31, 5; 40; 50; 63	12 In	IP 20	25×164×110
ВМ 40	1	230/240	10; 16; 20; 25; 32; 40	1,45 In-Т; 5 In-ЭМ	IP 20	17,5×80×71
АЕ 2046-10Р	3	660	16; 20; 25; 31, 5; 40; 50; 63	12 In	IP 20	75×215×105
АП 50Б-3МТ	3	500-перем. ток	1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 50; 63	10 In	IP 20	103×138×198
		220-пост. ток				
ВА 5237	3	380/660	250; 320; 400	10 In	IP 20	150×225×140
ИЭК-С45М	1, 2	380/220	1; 2,3,4,5,6, 10	2,5 In	IP 40	18×80×75
ВА 47-29	3, 4	—	16; 20; 25; 32, 40; 50; 63	2,5 In	—	—
ИЭК-NC100H	1,2	380/220	63; 80; 100	2,5 In	IP 40	27×81×70
ВА 16-26	1	220/380	6,3; 10; 16; 20; 25; 31, 5	1,45 In-Т; 12-14 In	IP 20	18×90×80
А63М	1	380	10; 16; 20; 25	1,35 In-Т; 10 In-ЭМ	IP 30	28×134×83
ВА 60-26-14	1	380	6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40	1,45 In-Т; 10 In-ЭМ	IP 20	12,5×85×65
ВА 66-29-14	1	220/380	10; 16; 25; 40; 50; 63	1,45 In-Т; 10 In-ЭМ	IP 20	17,5×80×71
АЕ2056ММ	3	660	80; 100	1,25 In-Т; 12 In-ЭМ	IP 20	75×145×105
ВА 6026-34	3	380	6,3; 10; 16; 20; 25; 31,5	1,45 In-Т; 10 In-ЭМ	IP 20	39×85×65

BA 60-26-14	1	380	6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40	1,45 ИН-Т; 10 ИН-ЭМ	IP 20	12,5×85×65
BA 51-25	3	660	10; 16; 25	1,35 ИН-Т; 10 ИН-ЭМ	IP 20	52,5×100×75
BA 66-29-14	1	220/380	10; 16; 25; 40; 50; 63	1,45 ИН-Т; 10 ИН-ЭМ	IP 20	17,5×80×71
AE2056MM	3	660	80; 100	1,25 ИН-Т; 12 ИН-ЭМ	IP 20	75×145×105
BA 6026-34	3	380	6,3; 10; 16; 20; 25; 31,5	1,45 ИН-Т; 10 ИН-ЭМ	IP 20	39×85×65
BA 6026-24	2	380	6,3; 10; 16; 20; 25; 31,5	1,45 ИН-Т; 10 ИН-ЭМ	IP 20	25×85×65
AE2046M	3	660	10; 16; 25; 31,5; 40; 50; 63	1,25 ИН-Т; 12 ИН-ЭМ	IP 20	75×145×90
BA 6026-14	1	380	6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40	1,45 ИН-Т; 10 ИН-ЭМ	IP 20	12,5×85×65
BA 51-25	3	660	10; 16; 25	1,35 ИН-Т; 10 ИН-ЭМ	IP 20	52,5×100×75
A3716	3	380/660	100; 125; 160	1,15 ИН-Т; 630 А-ЭМ	IP 30	110×320×180
AE2046-10Б	3	660	10; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	1,25 ИН-Т; 12 ИН-ЭМ	IP 20	75×164×110
BA5735	3	380/660	100; 125; 160; 200; 250	1,3 ИН-Т; 14 ИН-ЭМ	IP 20	110×175×128
BA51-39 B	3	660	320; 400; 630	1,25 ИН-Т; 10 ИН-ЭМ	—	225×250×100
AE2056МП	3	660	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	1,25 ИН-Т 12 ИН-ЭМ	—	75×145×105

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ СЕРИИ ПМА, ПМЕ И ПМЛ

#### КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЯХ

**М**агнитные пускатели предназначены для пуска, остановки, реверсирования и тепловой защиты электрических двигателей. Наибольшее применение находят магнитные пускатели с контактными системами и электромагнитным приводом типов ПМА, ПМЕ и ПМЛ.

Пускатели выполняются открытого, защищенного, пыле-брызгонепроницаемого исполнения, реверсивные и нереверсивные, с тепловой защитой и без нее.

Пускатели серии ПМА предназначены для управления асинхронными электродвигателями в диапазоне мощностей от 1,1 до 75 кВт на напряжение 380–660 В.

Магнитные пускатели серий ПМЕ и ПМЛ обладают коммутационной способностью до  $2 \cdot 10^6$  и частотой включений в час до 1200. Выбор магнитных пускателей осуществляется по напряжению сети и номинальному напряжению питания катушек, а также по номинальному коммутируемому току электроприемника.

Магнитные пускатели обеспечивают нулевую защиту, т. е. при исчезновении напряжения или его снижении до 50–60% от номинального катушка не удерживает магнитную систему пускателя, и силовые контакты размыкаются. При восстановлении напряжения токоприемник остается отключенным. Это исключает возможность аварий, связанных с самопроизвольным пуском электродвигателя или другой электроустановки. Пускатели с тепловыми реле осуществляют также защиту электроустановки от длительных перегрузок.

Пускатели серии ПМЕ могут быть использованы для управления электродвигателями мощностью от 0,27 до 10 кВт, а пускатели серии ПМЛ — для управления электродвигателями и другими электроустановками мощностью от 4 до 75 кВт.

Марка	Номинальный ток, А	Напряжение катушки, В	Степень защиты	Контактная группа	Тепловое реле	Габариты, мм	Примечание
ПМЕ 111	10	220/380	IP 00	1«з»	нет	68×85×84	—
ПМЕ 211	25	220/380	IP 00	2«з» + 2«р»	нет	89×93×116	—
ПМЕ 212	25	220/380	IP 00	2«з» + 2«р»	РГТ	89×150×116	—
ПМЕ 222	25	220/380	IP 00	2«з» + 2«р»	РГТ	222×150×154	—
ПМА 3100	40	220/380	IP 00	2«з» + 2«р»	нет	89×93×116	—
ПМА 3200	40	220/380	IP 00	2«з» + 2«р»	РГТ	222×150×154	—
ПМА 3210	40	220/380	IP 40	2«з» + 2«р»	РГТ	223×150×157	—
ПМА 4100	63	220	IP 00	2«з» + 2«р»	нет	110×133×139	—
ПМА 4200	63	220	IP 00	2«з» + 2«р»	РГТ	202×133×139	—
ПМА 4210	63	220	IP 40	2«з» + 2«р»	РГТ	210×365×172	—
ПМА 4500	63	220	IP 00	2«з» + 2«р»	нет	250×170×170	реверс
ПМА 5102	100	220	IP 00	2«з» + 2«р»	нет	150×125×160	—
ПМА 5202	100	220	IP 00	2«з» + 2«р»	нет	150×125×160	—
ПМА 5212	100	220	IP 40	2«з» + 2«р»	РГТ	248×468×206	—
ПМА 6102	160	220	IP 00	2«з» + 2«р»	нет	199×143×192	—
ПМА 6202	160	220	IP 00	2«з» + 2«р»	РГТ	292×143×192	—

Продолжение табл.

Марка	Номинальный ток, А	Напряжение катушки, В	Степень защиты	Контактная группа	Тепловое реле	Габариты, мм	Примечание
ПМА 6212	160	220	IP 40	2«з» + 2«р»	РТТ	440×327×242	—
НМЛ 1100	10	220/380	IP 00	1«з»	нет	67×44×73,5	—
ПМЛ 1220	10	220/380	IP 54	1«з»	РТЛ	160×87×116,5	—
ПМЛ 1501	10	220/380	IP 00	1«р»	нет	78×103,1×78	реверс
ПМЛ 2100	25	220/380	IP 00	1«з»	нет	77×56×89,1	—
ПМЛ 2220	25	220/380	IP 54	1«з»	РТЛ	185×101×134	—
ПМЛ 2501	25	220/380	IP 00	1«р»	нет	88×128,5×97	реверс
ПМЛ 3100	40	220/380	IP 00	1«з» + 1«р»	нет	126×75×107,3	—
ПМЛ 3220	40	220/380	IP 54	1«з» + 1«р»	РТЛ	280×164×166	—
ПМЛ 3500	40	220/380	IP 00	1«з» + 1«р»	нет	128×165×115	—
ПМЛ 4100	63	220/380	IP 00	1«з» + 1«р»	нет	126×75×107,3	—
ПМЛ 4220	63	220/380	IP 54	1«з» + 1«р»	РТЛ	280×164×166	—
ПМЛ 4500	63	220/380	IP 00	1«з» + 1«р»	нет	128×165×115	—

# ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев, В. П.* Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. — 2-е изд. — М. : Госэнергоиздат, 1963. — 772 с.
2. *Богатырев, Н. И.* Практикум по электроприводу / Н. И. Богатырев, С. В. Оськин, В. Н. Темников. — Краснодар, 2009. — 288 с.
3. *Зимин, Е. Н.* Электрооборудование промышленных предприятий и установок / Е. Н. Зимин, В. И. Преображенский, И. И. Чувашов. — 2-е изд. — М. : Энергоиздат, 1981. — 552 с.
4. *Кириянов, Д. В.* Mathcad 13. — СПб. : БХВ-Петербург, 2006. — 608 с.
5. *Ключев, В. И.* Теория электропривода. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 416 с.
6. *Справочник по автоматизированному электроприводу* / под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 616 с.
7. *Кононенко, В. В.* Электротехника и электроника / В. В. Кононенко, В. И. Мишкочич, В. В. Муханов [и др.] — 2-е изд. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2005. — 752 с.
8. *Москаленко, В. В.* Электрический привод. — 3-е изд., стер. — М. : ИЦ «Академия», 2005. — 368 с.
9. *Москаленко, В. В.* Электрический привод. — М. : Высш. шк., 1991. — 430 с.
10. *Никитенко, Г. В.* Расчет и выбор электроприводов сельскохозяйственного назначения / Г. В. Никитенко, И. В. Атанов, С. Н. Антонов [и др.] — Ставрополь, 2008. — 115 с.
11. *Справочник инженера-электрика сельскохозяйственного производства : учеб. пособие* / под ред. В. М. Баутина. — М. : Информагротех, 1999. — 536 с.
12. *Чиликин, М. Г.* Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. — 6-е изд. — М. : Энергоиздат, 1981. — 576 с.
13. *Фокин, В. В.* Практикум по электрооборудованию сельскохозяйственного производства. — М. : Агропромиздат, 1991. — 160 с.
14. *Фоменков А. П.* Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий. — 2-е изд. — М. : Колос, 1984. — 288 с.
15. *Трухачев, В. И.* Технологии и технические средства в животноводстве / В. И. Трухачев, И. В. Капустин, О. Г. Ангилеев [и др.] — Ставрополь : Изд-во СтГАУ «АГРУС», 2005. — 304 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
<i>Глава первая</i>	
Основные понятия электропривода .....	5
<i>Глава вторая</i>	
Электропривод постоянного тока .....	15
2.1. Машины постоянного тока .....	15
2.2. Механические характеристики электродвигателей .....	16
2.3. Механические и электромеханические характеристики двигателя постоянного тока параллельного и независимого возбуждения .....	18
2.4. Способы регулирования оборотов вращения ДПТ с параллельной и независимой обмоткой возбуждения .....	23
2.5. Механические и электромеханические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	30
2.6. Регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	33
2.7. Приводные характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения .....	36
2.8. Тормозные режимы работы электропривода постоянного тока .....	39

<i>Глава третья</i>	
<b>Электропривод переменного тока</b> .....	53
3.1. Асинхронный электродвигатель переменного тока .....	53
3.2. Механические и электромеханические характеристики асинхронных двигателей .....	55
3.3. Регулирование угловой скорости вращения асинхронных электродвигателей .....	60
3.4. Тормозные режимы работы электропривода с асинхронным двигателем .....	79
<i>Глава четвертая</i>	
<b>Динамика электропривода</b> .....	88
4.1. Уравнение движения электропривода .....	88
4.2. Приведение статических моментов и усилий .....	93
4.3. Приведение моментов инерции электропривода к валу двигателя .....	95
4.4. Определение времени пуска и торможения электропривода .....	98
<i>Глава пятая</i>	
<b>Энергетика электропривода</b> .....	103
5.1. Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода .....	103
5.2. Потери энергии в переходных процессах работы электропривода .....	104
5.3. Способы уменьшения потерь энергии в электроприводе .....	106
5.4. Расчет КПД электрического привода .....	108
5.5. Коэффициент мощности электрического привода .....	110
5.6. Энергосбережение в электроприводе .....	111
<i>Глава шестая</i>	
<b>Электропривод в агропромышленном производстве</b> .....	114
6.1. Приводные характеристики рабочих машин .....	114
6.2. Электропривод водоснабжающих установок .....	116
6.3. Электропривод вентиляционных установок .....	121
6.4. Электропривод стационарных транспортеров .....	125
6.5. Электропривод крановых механизмов .....	131
6.6. Электропривод кормоприготовительных машин .....	139
6.7. Электропривод металлорежущих станков .....	145
<i>Глава седьмая</i>	
<b>Расчет и построение приводных характеристик в системе Mathcad</b> .....	156
7.1. Краткая характеристика электронной среды .....	156
7.2. Основные редакторы системы Mathcad .....	157
7.3. Примеры решения типовых задач электропривода в электронной среде Mathcad .....	160
<i>Приложения</i>	
<b>Приложение А</b>	
Технические данные электродвигателей серии АИ .....	210
<b>Приложение Б</b>	
Характеристики автоматических выключателей .....	217
<b>Приложение В</b>	
Магнитные пускатели серии ПМА, ПМЕ и ПМЛ .....	220
<b>Литература</b> .....	223

Подписано в печать 25.02.13.

Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108<sup>1/32</sup>.

Печать офсетная. Усл. п. л. 11,76. Тираж 1000 экз.

Заказ №558.

Отпечатано в полном соответствии  
с качеством предоставленных диапозитивов  
в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера».  
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, д. 32.  
Тел./факс (8182) 64-14-54; www.ippps.ru

ДОСТУП К ЭЛЕКТРОННОЙ ВЕРСИИ  
ЭТОЙ КНИГИ НА

[www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com)

