

И.О. ШИШКИН

## МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Под редакцией академика *Н. С. СОЛОМЕНКО*

Допущено Государственным комитетом СССР по народному образованию в качестве учебника для инженерных специальностей технических вузов

МОСКВА ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ 1990

Шишкин И.Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством: Учеб. для вузов/Под ред. акад. Н.С. Соломенко. - М.: Изд-во стандартов, 1990. -342 с, ил.

В учебнике показана взаимосвязь метрологии, квалиметрии и стандартизации в деле создания продукции высокого качества, дается четкое представление о большинстве видов метрологической деятельности, освещаются такие актуальные вопросы, как контроль и аттестация качества, метрологическая экспертиза, стандартизация и аттестация методик выполнения измерений, аттестация средств измерений и др.

Предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов. Может быть полезным работникам метрологических служб, органов и служб стандартизации, государственной приемки и т. д.

Табл. 35. Ил. 92. Библиогр.: 34 назв.

Рецензент д-р техн. наук *Д.Ф. Тартаковский*

## Содержание:

Содержание: .....	2
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
ОБЪЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ МЕРЫ .....	13
1.1. РОЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ В ТЕОРИИ ПОЗНАНИЯ .....	13
1.2. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ .....	14
1.3. КАЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН .....	17
1.4. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН .....	19
1.5. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ .....	23
ГЛАВА 2 .....	27
РАЗНОВИДНОСТИ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ .....	27
2.1. РАЗНОВИДНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ .....	27
2.2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ .....	29
2.3. НОРМИРУЕМЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ .....	31
2.3.1. Метрологические характеристики средств измерений .....	31
2.3.2. Нормирование метрологических характеристик средств измерений .....	33
2.3.3. Классы точности средств измерений .....	34
2.4. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ .....	38
ГЛАВА 3 .....	43
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ .....	43
3.1. ОСНОВНОЙ ПОСТУЛАТ МЕТРОЛОГИИ .....	43
3.2. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ И ИХ ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	47
3.3. ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ .....	52
3.3.1. Исключение влияющих факторов .....	54
3.3.2. Внесение поправок .....	55
3.3.3. Ситуационное моделирование .....	61
3.3.4. Обнаружение и исключение ошибок .....	63
3.4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ .....	66
3.5. ОДНОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ .....	70
3.6. МНОГОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ С РАВНОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТСЧЕТА .....	77
3.6.1. Точечные оценки числовых характеристик .....	79
3.6.2. Проверка нормальности закона распределения вероятности результата измерения .....	84
3.6.3. Обработка экспериментальных данных, подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности .....	89
3.6.4. Обработка экспериментальных данных, не подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности .....	91
3.6.5. Обеспечение требуемой точности измерений .....	93
3.7. МНОГОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ С НЕРАВНОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТСЧЕТА .....	98
3.8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НЕСКОЛЬКИХ СЕРИЙ ИЗМЕРЕНИЙ .....	99
ГЛАВА 4 .....	106
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ .....	106
4.1. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ .....	106
4.2. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН .....	107
4.3. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ О РАЗМЕРАХ ЕДИНИЦ .....	113
ГЛАВА 5 .....	117
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ НАД РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ .....	117

5.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С ОДНИМ РЕЗУЛЬТАТОМ ИЗМЕРЕНИЯ .....	117
5.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С НЕСКОЛЬКИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	122
5.3. РЕШЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ.....	134
3.4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....	139
3.5. ОДНОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ .....	142
3.6. МНОГОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ С РАВНОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТСЧЕТА .....	150
3.6.1. Точечные оценки числовых характеристик.....	152
3.6.2. Проверка нормальности закона распределения вероятности результата измерения .....	157
3.6.3. Обработка экспериментальных данных, подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности.....	162
3.6.4. Обработка экспериментальных данных, не подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности.....	164
3.6.5. Обеспечение требуемой точности измерений.....	166
3.7. МНОГОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ С НЕРАВНОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТСЧЕТА .....	171
3.8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НЕСКОЛЬКИХ СЕРИЙ ИЗМЕРЕНИЙ .....	172
ГЛАВА 4.....	179
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ .....	179
4.1. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ .....	179
4.2. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	180
4.3. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ О РАЗМЕРАХ ЕДИНИЦ.....	186
ГЛАВА 5.....	190
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ НАД РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	190
5.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С ОДНИМ РЕЗУЛЬТАТОМ ИЗМЕРЕНИЯ .....	190
5.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С НЕСКОЛЬКИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	195
5.3. РЕШЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ.....	207
ГЛАВА 6.....	212
ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ И ПОЛЕЙ .....	212
6.1. ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ .....	212
6.2. ИЗМЕРЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН, ПРОЦЕССОВ И ПОЛЕЙ .....	220
Г Л А В А 7.....	226
КВАЛИМЕТРИЯ.....	226
7.1. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА .....	226
7.2. ИЗМЕРЕНИЕ КАЧЕСТВА.....	232
7.3. ЭКСПЕРТНЫЙ МЕТОД.....	246
ГЛАВА 8.....	256
ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ.....	256
8.1. НОРМАТИВНО-ПРАВОВАЯ РЕГЛАМЕНТАЦИЯ .....	256
8.2. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ, СТАНДАРТИЗАЦИИ И КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ .....	259
8.3. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ .....	266
Г Л А В А 9.....	271
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ.....	271
9.1. ПРИНЦИПЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ .....	271

9.2. МЕТОДЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ.....	281
9.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ БАЗА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ.....	289
ГЛАВА 10.....	298
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА СТАНДАРТИЗАЦИИ (ГСС).....	298
10.1. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ.....	298
Г Л А В А П.....	309
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ (ГСИ).....	309
11.1. СТАНДАРТЫ ГСИ .....	309
11.2. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА.....	312
11.3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ .....	320
11.4. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАДЗОР И ВЕДОМСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ЗА СТАНДАРТАМИ И СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЙ В СССР .....	338
ГЛАВА 12.....	343
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ .....	343
12.1. КОНТРОЛЬ И АТТЕСТАЦИЯ КАЧЕСТВА .....	343
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	347

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Указанием Государственного комитета СССР по народному образованию от 16 октября 1989 г № 49 предписано ввести в учебный процесс вузов дисциплину «Метрология, стандартизация и управление качеством», программа которой утверждена Главным учебно-методическим управлением высшего образования 29 сентября 1988 г. В

соответствии с этой программой **общинженерная дисциплина «Метрология, стандартизация и управление качеством»** обеспечивает базовую подготовку студентов всех специальностей технических вузов в области метрологии, стандартизации и управления качеством. Целью ее изучения является формирование у студентов знаний, умений и навыков, обеспечивающих квалифицированное участие в многогранной деятельности инженерного корпуса по реализации постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 12 мая 1986 г. № 54С «О мерах по коренному повышению качества продукции». Основные задачи вытекают из роли дисциплины как базовой в системе непрерывной подготовки студентов по метрологии и стандартизации. В ней изучаются фундаментальные сведения о стандартизации, метрологии и квалиметрии, которые в дальнейшем развиваются и углубляются в рамках специальных дисциплин.

В результате изучения дисциплины «Метрология, стандартизация и управление качеством» студент должен знать основные метрологические правила, требования и нормы, государственные акты и нормативно-технические документы по стандартизации и управлению качеством, соблюдать их в своей практической деятельности и уметь применять полученные знания, умения и навыки для повышения качества выпускаемой продукции и обеспечения ее конкурентоспособности на мировом рынке. Изучение дисциплины «Метрология, стандартизация и управление качеством» предполагает преемственность по отношению к начальным этапам непрерывной подготовки студентов по метрологии и стандартизации на которых многие из рассматриваемых вопросов затрагиваются в общенаучных и общинженерных дисциплинах. В то же время преемственность пролонгируется на последующие этапы непрерывной подготовки, когда общие положения конкретизируются в специальных дисциплинах применительно к отраслевой специфике, областям и видам измерений, направлениям целевой подготовки студентов.

Учебник написан строго по программе, утверждение которой является признанием правомерности аксиоматического подхода автора к изложению метрологии, основанного на трех сформулированных им постулатах: «Без априорной информации измерение невозможно», «Сравнение является единственным способом получения измерительной информации» и «Результат измерения без округления является случайным». Из них вытекают все основные положения теории и практики, знание которых необходимо для инженерной деятельности.

Ввиду остроты тематики и ограниченного объема учебник не свободен от недостатков. В частности аксиоматический подход автора обоснован недостаточно, а из трёх сформулированных им постулатов упоминается и используется только один. За недостающими сведениями приходится адресовать студентов к другим учебникам этого автора, таким как «Теоретическая метрология» и «Квалиметрия».

Издание учебника «Метрология, стандартизация и управление качеством» является своевременной мерой, направленной на увеличение вклада высшей школы в решение задачи повышения качества выпускаемой продукции и услуг.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Метрология как наука охватывает круг проблем, связанных с измерениями. В дословном переводе с древнегреческого *μετρον* — мера, а *λογος* — речь, слово, учение или наука. Таким образом метрология — наука об измерениях.

Потребность в измерениях возникла в незапамятные времена. Для этого в первую очередь использовались подручные средства. Из глубины веков дошли до нас единица веса драгоценных камней — *карат*, что в переводе с языков древнего юга-востока означает «семя боба», «горошина», единица аптекарского веса — *гран*, что в переводе с латинского, французского, английского, испанского означает «зерно». Многие меры имели антропометрическое происхождение или были связаны с конкретной трудовой

деятельностью человека. Так, в Киевской Руси применялись в обиходе *вершок* — «верх перста» — длина фаланги указательного пальца; *пядь* — от «пять», «пятерня» — расстояние между концами вытянутых большого и указательного пальцев; *локоть* — расстояние от локтя до конца среднего пальца; *сажень* — от «сягать», «достигать», т.е. можно достать; *косая сажень* — предел того, что можно достать: расстояние от подошвы левой ноги до конца среднего пальца вытянутой вверх правой руки; *верста* — от «верти», «поворачивая» плуг обратно, длина борозды.

Древнее происхождение имеют «естественные» меры. Первыми из них, получившими повсеместное распространение, стали меры времени. На основе астрономических наблюдений древние вавилоняне установили *год*, *месяц*, *час*. Впоследствии  $1/86400$  часть среднего периода обращения Земли вокруг своей оси получила название *секунды*.

Наряду с этим уже на заре цивилизации люди пришли к пониманию ценности так называемых «вещественных» мер и единиц измерений. Так в Вавилоне во II в. до н. э. время измерялось в *минах*. Мина равнялась промежутку времени (равному, примерно, двум астрономическим часам), за который из принятых в Вавилоне водяных часов вытекала «мина» воды, масса которой составляла около 500 г. Впоследствии мина сократилась и превратилась в привычную для нас *минуту*. Со временем водяные часы уступили место песочным, а затем более сложным маятниковым механизмам. Гюйгенс, посвятивший созданию и усовершенствованию маятниковых часов почти 40 лет и считавший это главным делом своей жизни, в 1664 г. писал: «... я нашел легкий и удобный способ регулировки часов. К этому, однако, присоединяется то, что я считаю еще более ценным, а именно: благодаря своему открытию я смог дать абсолютно устойчивое определение для постоянной, верной для всех времен меры длины». Речь идет об использовании свойства изохронности колебаний математического маятника, подмеченного Галилеем еще в 1583 г. При малых отклонениях период колебаний:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

где  $L$  — длина маятника, а  $g$  — ускорение при свободном падении. Это позволяет выразить меру длины через естественную меру времени. В 1824 г. в Англии был принят закон, установивший единицу длины *ярд* через длину секундного маятника.

Ни в древнем мире, ни в средние века не существовало метрологической службы, но имеются сведения о применении образцовых мер и хранении их в церквях и монастырях, а также о ежегодных поверках средств измерений. Так, «золотой пояс» великого князя Святослава Ярославича (1070-е гг.) служил образцовой мерой длины, а в уставе новгородского князя Всеволода «О церковных судах и о людях и о мерилах торговли», изданном в 1136 г., предписывалось «... торговья все весы и мерила блюсти без пакости, ни умаливати, ни умноживати, а всякий год извещивати ...». Нарушитель мог быть наказан вплоть до «... предания казни смерти».

Важнейшим метрологическим документом является Двинская грамота Ивана Грозного (1550 г.). В ней регламентированы правила хранения и передачи размера новой меры сыпучих веществ — *осьмины*. Ее медные экземпляры рассылались по городам на хранение выборным людям — старостам, соцким, целовальникам. С этих мер надлежало сделать клейменные деревянные копии для городских померщиков, а с тех, в свою очередь, — деревянные копии для использования в обиходе. Образцовые меры, с которых снимались первые копии, хранились централизованно в приказах Московского государства. Таким образом, можно говорить о начале создания при Иване Грозном государственной системы обеспечения единства измерений и государственной метрологической службы.

Развитие торговли и расширение внешних экономических связей требовало не только уточнения мер, но и установления их соотношения с «заморскими», а также унификации мер и более четкой организации контрольно-поверочной деятельности. Еще в договоре Великого Новгорода с немецкими городами и Готландом (1269 г.), наряду со взаимными

обязательствами, приведены соотношения между мерами договаривающихся сторон. Статьи Соборного уложения 1649 г., Таможенного устава 1653 г., Новоторгового устава 1667 г. и других документов установили соответствие различных «весов» *фунту* и размер *сажени*.

Московские указы, касавшиеся введения единых мер в стране, отсылались на места вместе с образцами казенных мер. Работы по надзору за мерами и их поверку проводили два столичных учреждения: Померная изба и Большая таможня. Они же разрешали конфликты, возникавшие при торговых операциях. В провинции надзор был поручен персоналу воеводских и земских изб, а также старостам, целовальникам и другим „верным людям“. Государственная дисциплина была суровой. За злоумышленную порчу контрольных мер грозило наказание — вплоть до смертной казни.

Метрологической реформой Петра I к обращению в России были допущены английские меры, получившие особенно широкое распространение на флоте и в кораблестроении — *футы*, *дюймы*. Для облегчения вычислений были изданы таблицы мер и соотношений между русскими и иностранными мерами. Начинают выделяться некоторые метрологические центры. Коммерцколлегия занялась вопросами единства мер и метрологического обслуживания в области торговли. Адмиралтейств-коллегия заботилась о правильном применении угломерных приборов, компасов и соответствующих мер. Берг-коллегия опекала измерительное хозяйство горных заводов, рудников и монетных дворов. Основанная в 1725 г. Петербургская академия наук занялась воспроизведением угловых единиц, единиц времени и температуры. Она имела в своем распоряжении образцовые меры и копии эталонов *туаза* и *фунта*. Назревала необходимость создания в стране единого руководящего метрологического центра.

В 1736 г. по решению Сената была образована Комиссия весов и мер под председательством главного директора Монетного двора графа М.Г. Головкина. В состав комиссии входил Л. Эйлер. В качестве исходных мер длины комиссия изготовила *медный аршин* и *деревянную сажень*, за меру жидких веществ было принято *ведро* московского Каменноостского питейного двора. Важнейшим шагом, подытожившим работу комиссии, было создание русского *эталонного фунта*. Работы начались в 1736 г. и завершились в 1747 г. изготовлением бронзовой золоченой гири, узаконенной в качестве первичного образца (государственного эталона) русских мер веса. Этот фунт почти 100 лет оставался единственным эталоном в стране.

В комиссии рассматривались — но из-за отсутствия денежных средств и специалистов не были осуществлены — проекты создания системы мер, основанной на физических постоянных (определение сажени через длину меридиана Земли, фунта — через вес определенного количества чистой воды), введение десятичной системы образования кратных и дольных единиц и др. Эти прогрессивные идеи получали в Европе в ту пору все большее распространение.

Идея построения системы измерений на десятичной основе принадлежит французскому астроному Г. Мутону, жившему в XVII в. Во Франции, где феодалы имели право пользоваться своими собственными мерами, содержать таможни и собирать пошлину, вопрос о рациональной системе мер стоял особо остро. Однако понадобилась революция, взлет творческой активности народа, чтобы идея пробилась себе дорогу. 8 мая 1790 г. Учредительное собрание Франции приняло декрет о реформе системы мер и поручило Парижской академии наук разработать соответствующие предложения. Комиссия академии, руководимая Лагранжем, рекомендовала десятичное подразделение кратных и дольных единиц, а другая комиссия, в состав которой входил Лаплас, предложила принять в качестве единицы длины одну сорок миллионную часть земного меридиана. На основе этой единственной единицы — *метра* — строилась вся система, получившая название *метрической*. За единицу площади принимался *квадратный метр*, за единицу объема — *кубический метр*, за единицу массы — *килограмм* — масса кубического дециметра чистой воды при температуре 4°C. Метрическая система с самого начала была задумана как международная. Ее единицы не совпадали ни с

какими национальными единицами, а наименования единиц и десятичных приставок были образованы от слов «мертвых» языков (латинского и древнегреческого).

26 марта 1791 г. Учредительное собрание Франции утвердило предложения Парижской академии наук. Национальный Конвент признавал, что дело реформы мер и весов, «как одно из величайших благодеяний революции, должно быть доведено республикой до конца». 7 апреля 1795 г. Конвент принял закон о введении метрической системы во Франции и поручил комиссарам, в число которых входили Кулон, Делабр, Лагранж, Лавуазье, Лаплас и другие ученые, выполнить работы по экспериментальному определению единиц длины и массы. В 1799 г. эта работа, проходившая под наблюдением международной комиссии, была закончена, и утвержденные законом платиновые прототипы метра и килограмма сданы на хранение Архиву Франции. С тех пор они именуется *архивными*.

Несмотря на свои очевидные преимущества, метрическая система внедрялась с большим трудом. Наполеон, например, считал, что «нет ничего более Противоречащего складу ума, памяти и соображению, чем то, что предлагают эти ученые. Абстракциям и пустым надеждам принесено в жертву благо теперящих поколений, ибо чтобы заставить старую нацию принять новые единицы мер и весов, надо переделать все административные правила, все расчеты промышленности. Такая работа устрашает разум». В 1812 г. он ввел новую систему, в которую вернул *туаз*, приравненный к 2 м, и многие единицы со старыми наименованиями, но приведенные к метрической системе. Лишь законом от 4 июля 1837 г. очищенная от нововведений Наполеона метрическая система была окончательно введена во Франции с 1 января 1840 г. как обязательная.

В развитии отечественной метрологии можно выделить несколько этапов. Первый этап стихийной метрологической деятельности продолжался от ее зарождения до 1892 г. Достижения и успехи метрологии на этом этапе не были результатом продуманной научно-технической политики, проводившейся в жизнь из поколения в поколение. Качественные изменения в статусе метрологии стали происходить только с середины XIX в. Этот период характерен централизацией метрологической деятельности и началом широкого участия русских ученых в работе международных метрологических организаций. Так, указом «О системе Российских мер и весов» (1835 г.) были утверждены эталоны длины и массы — *платиновая сажень*, равная 7 английским футам, и *платиновый фунт*, практически совпадавший по весу с бронзовым золоченым фунтом 1747 г.. В 1842 г. на территории Петропавловской крепости в специально построенном «несгораемом» здании открывается первое централизованное метрологическое и поверочное учреждение России — Депо образцовых мер и весов, куда и помещаются на хранение созданные эталоны, их копии, а также образцы различных иностранных мер (в настоящее время эти образцы хранятся в музее Д.И. Менделеева в Ленинграде). В Депо не только хранились эталоны и их копии, но и изготавливались образцовые меры для местных органов, а также проводилась поверка и сличение образцовых мер с иностранными. Эта деятельность регламентировалась «Положением о мерах и весах» (1842 г.) которое заложило основы государственного подхода к обеспечению единства измерений.

Как и многие другие науки, метрология в своем развитии не избежала описательного периода. Он завершился в нашей стране капитальным трудом Ф.И. Петрушевского «Общая метрология», вышедшим в 1849 г. и удостоенным императорской Академией наук Демидовской премии. Для русских ученых того времени характерно глубокое понимание роли и места метрологии в науке и жизни. В 1869 г. петербургские академики Б.С. Якоби, Г.И. Вильд и О.В. Струве направили в Парижскую академию наук доклад, в котором предлагалось с целью обеспечения единства измерений в международном масштабе изготовить новые международные прототипы метра и килограмма и распределить их однотипные копии между заинтересованными государствами.

Это предложение было принято, и в результате последующей работы ученых разных стран была подготовлена и 20 мая 1875 г. подписана Метрическая конвенция. Она стала основой международного научного сотрудничества, способствовала унификации мер и

расширению метрологической деятельности в национальном и международном масштабах. В соответствии с конвенцией Россия получила платиноиридиевые эталоны единицы массы № 12 и 26 и эталоны единицы длины № 11 и 28, которые были доставлены в новое здание Депо образцовых мер и весов (ныне это дом 19 на Московском проспекте в Ленинграде).

В 1892 г. управляющим Депо был назначен Д.И. Менделеев. Д.И. Менделеев (1834-1907 гг.) так много сделал для отечественной метрологии, что период с 1892 по 1918 гг. называют менделеевским *этапом развития метрологии*. С одной стороны, это этап научного становления метрологии, перевода ее в число точных естественнонаучных дисциплин, возвышения до уровня «главного орудия познания» по образному выражению Д.И. Менделеева. С другой стороны, это этап осознания народнохозяйственной значимости метрологии, начало глубоко продуманного и планомерного включения метрологической деятельности в хозяйственный механизм страны. В 1893 г. Д.И. Менделеев преобразует Депо образцовых мер и весов в Главную палату мер и весов — одно из первых в мире научно-исследовательских учреждений метрологического профиля. Лишь 8 лет спустя в США организуется Национальное бюро эталонов, а в 1900 г. в Англии — метрологическое отделение Национальной физической лаборатории. Под руководством Д.И. Менделеева была проведена работа по созданию русской системы эталонов и их сличению с английскими и метрическими мерами, начала создаваться государственная метрологическая служба, реализована широкая программа научных исследований в области метрологии. Собственные научные труды Д.И. Менделеева по метрологии не утратили своего значения по сей день. Его научное кредо — «Наука начинается ... с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры» — и сейчас определяет роль и место метрологии в системе естественных наук. Основанные им научные направления, сформированный стиль научно-практической работы на долгие годы определили высокое развитие русской метрологии, обеспечили ей передовые позиции и высокий авторитет на международной арене.

Но даже Д.И. Менделееву не удалось в условиях царизма внедрить в России метрическую систему. С 1899 г. она применялась в стране факультативно, наряду со старой русской и британской (дюймовой) системами. Такое положение тормозило развитие промышленности, усложняло и затрудняло внешние экономические, технические и научные связи.

Коренные изменения в метрологической деятельности стали возможны только при Советской власти. Декрет «О введении Международной метрической системы мер и весов» был принят Советом Народных Комиссаров РСФСР уже 14 сентября 1918 г. Издание декрета знаменует собой начало третьего — *нормативного этапа в развитии отечественной метрологии*. С этого момента сначала важнейшие, а затем и менее важные установления в области метрологии вводятся нормативными актами — поначалу постановлениями правительства, а позже, наряду с ними, — нормативно-техническими документами разного уровня.

Декретом 1918 г. предусматривалось для решения всех вопросов, касающихся введения и применения метрической системы, для общего руководства деятельностью всех заинтересованных учреждений и согласования их интересов при Народном Комиссариате Торговли и Промышленности учредить межведомственную комиссию из представителей ВСНХ и комиссариатов Финансов, Путей сообщения, по Военным делам, по Просвещению, по Продовольствию, Земледелию, а также Почт и Телеграфов. Благодаря этому, с одной стороны, подчеркивалась и узаконивалась государственная значимость метрологических проблем, а с другой, — метрологическая деятельность приобретала государственный характер.

В условиях интервенции, гражданской войны и хозяйственной разрухи предстояла титаническая работа. Нужно было:

- разработать, изготовить и заменить несколько десятков миллионов гирь и линейных мер;
- обеспечить их клеймение и поверку, для чего создать сеть поверочных учреждений;

- создать исходные образцовые средства для оснащения этих учреждений;
- создать эталоны единиц метрической системы и средства для передачи информации о размерах этих единиц;
- переработать всю техническую документацию, реорганизовать все измерительное хозяйство на промышленных предприятиях, обеспечить производство измерительного инструмента;
- обеспечить пропаганду метрической системы и обучение населения ее использованию, издать десятки брошюр, книг, преодолеть инерцию мышления и старые привычки.

Нет ничего удивительного в том, что дело продвигалось медленно. Сплошь и рядом возникали непредвиденные трудности. Только для изготовления необходимого количества гирь, например, потребовалось 4,5 млн. пудов дефицитного чугуна. По любому вопросу требовалось решение центральных органов власти. Однако командно-административные методы решения хозяйственных вопросов оказались неэффективными. Декрет предусматривал завершение перехода к метрической системе 1 января 1922 г. Но 29 мая 1922 г. СНК РСФСР вынужден был принять декрет «Об отдалении срока введения метрической системы» до 1 января 1927 г. К сожалению, должных выводов из этого сделано не было.

8 февраля 1919 г. В.И. Ленин подписал декрет «О введении нового счета времени по международной системе поясов», в 1921 г. — постановление «О всероссийской поверке мер и весов». Всего за семь послереволюционных лет Советское правительство пять раз принимало решения по различным метрологическим вопросам. В 1924 г. ЦИК и СНК СССР утвердили „Положение о мерах и весах“, с выходом которого завершилась организация государственной метрологической службы СССР. В 1925 г. СНК СССР принял постановление «О признании заключенной в Париже 20 мая 1875 г. Международной метрической конвенции для обеспечения международного единства и усовершенствования метрической системы, имеющей силу для СССР». В этом же году при Совете Труда и Оборона создается Комитет по стандартизации, председателем которого назначается один из видных организаторов Советского государства В.В. Куйбышев. В 1926 г. утвержден первый общесоюзный стандарт „Пшеница. Селекционные сорта зерна. Номенклатура“, в последующие три года — еще свыше 300 стандартов. Стандартизация становится нормативно-правовой основой метрологической деятельности. 23 ноября 1929 г. ЦИК и СНК СССР принимают постановление об уголовной ответственности за несоблюдение обязательных стандартов и „Положения о мерах и весах“.

За период с 1929 по 1932 гг. было утверждено более 4500 стандартов. В 1930 г. XVI съезд ВКП(б) принял решение о широком развитии работ по стандартизации промышленного сырья и материалов, а также самих продуктов и входящих в них составных частей. Однако уже тогда стали проявляться симптомы неблагополучия с качеством выпускаемой продукции. Съезд установил ответственность за качество продукции.

В годы первых пятилеток формируется устойчивая тенденция ко все большей регламентации всех сторон народнохозяйственной деятельности. С 1930 г. Комитет по стандартизации стал называться Всесоюзным комитетом стандартизации (ВКС) при Совете Труда и Оборона. На 1930—1931 гг. был впервые разработан и утвержден Государственный план стандартизации. С 1932 г. при наркоматах стали создаваться ведомственные комитеты по стандартизации, наркоматы получили право утверждать стандарты отраслевого назначения. После упразднения ВКС к 26 наркоматам и ведомствам перешло право утверждения и общесоюзных стандартов. За период с начала второй пятилетки и до 1941 г. было разработано и утверждено 8600 стандартов.

Несмотря на это на фоне экстенсивного развития экономики все больше проявлялось несоответствие между количеством и качеством выпускаемой продукции. В 1940 г.

Президиум Верховного Совета СССР издал указ „Об ответственности за выпуск недоброкачественной и некомплектной продукции и за несоблюдение обязательных стандартов промышленными предприятиями". В этом же году постановлением СНК СССР был образован Всесоюзный Комитет по стандартизации при Совнаркомме СССР. Введена категория государственных стандартов (ГОСТ).

За годы войны утверждено свыше 2200 новых и пересмотрено 1270 действовавших государственных стандартов. В 1942 г. правительством принято постановление «О мерах и контрольно-измерительных приборах, подлежащих обязательной государственной поверке и клеймению», которое предусматривало значительное расширение номенклатуры приборов, подлежащих государственной поверке, и подчеркивало общегосударственное значение и важность для обороны сохранения единства мер в стране.

В послевоенные годы линия на регламентацию всех сторон деятельности хозяйственного механизма не изменилась. В 1948 г. ВКС был включен в состав Государственного комитета Совета Министров СССР по внедрению передовой техники в народное хозяйство. С 1951 по 1953 гг. руководство работами по стандартизации осуществлялось Управлением по стандартизации при Совете Министров СССР. В 1954 г. был создан Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. Комитет возглавил всю работу по стандартизации, метрологии и измерительной технике в стране. Получило организационное воплощение единство между стандартизацией и метрологическим обеспечением народного хозяйства как рычагами управления качеством продукции. Июньский (1959 г.) Пленум ЦК КПСС поручил комитету разработать план мероприятий по переводу изготовления всей продукции массового применения на производство по государственным стандартам.

В 1964—1965 гг. состояние стандартизации в нашей стране подверглось детальному изучению и обсуждению с привлечением широких кругов ученых, работников промышленности, общественности. Было признано, что стандартизация отстает от растущих требований народного хозяйства, однако глубинные причины недостатков, обусловленные общими тенденциями развития народного хозяйства, при этом вскрыты не были. Совет Министров СССР принял 11 января 1965 г. постановление № 16 „Об улучшении работы по стандартизации в стране", где отмечалось, что в решении задач дальнейшего подъема народного хозяйства неизмеримо возрастает роль стандартизации как средства ускорения технического прогресса, повышения качества продукции и создания основы для широкой специализации производства. Этим же постановлением в целях обеспечения единой технической политики на Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР возлагалась координация работ по стандартизации в отраслях народного хозяйства, было поручено разработать единые системы нормативно-технической, проектно-конструкторской и технологической документации, ввести в государственный план показатели работы по стандартизации.

Во исполнение указанного постановления на 1966—1970 гг. был разработан и утвержден первый пятилетний план государственной стандартизации, включенный составной частью в план развития народного хозяйства. В рамках плана государственной стандартизации была разработана, в 1968 г. утверждена и с 1970 г. введена в действие Государственная система стандартизации (ГСС), установившая единый порядок разработки, утверждения, регистрации, издания, обращения и внедрения стандартов всех категорий на всех уровнях управления народным хозяйством. Наряду с ГСС бы созданы ЕСТД — Единая система технологической документации и другие крупные системы стандартов. В 1973 г. утверждена Государственная а тема обеспечения единства измерений (ГСИ), регламентирующая все стороны метрологической деятельности.

Негативные явления, постепенно накапливавшиеся в стране, привели в 1970-е гг. к застою в развитии народного хозяйства. Командные методы управления, оправданные в послереволюционные и военные годы, отвечали условиям мирного времени. Нужно было

не заставлять, а заинтересовывать людей в повышении производительности труда и эффективности производства. Всепроницающая регламентация их деятельности на всех уровнях и во всех сферах народного хозяйства сковывала инициативу, порождала безответственность и безразличие к результатам труда. Производственные отношения, основанные на исполнительской дисциплине, стали тормозом научно-технического и социально-экономического прогресса. Остро встала проблема качества.

Постановлением от 10 ноября 1970 г. № 937 „О повышении роли стандартов в улучшении качества выпускаемой продукции" ЦК КПСС и Совета Министров СССР возложили ответственность за научно-техническую политику в области качества на Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР (Госстандарт СССР). Постановление предусматривало: введение государственного планирования качества продукции через стандарты и планы по стандартизации; установление заданий предприятиям по внедрению стандартов и увеличению объемов производства продукции, аттестованной государственным Знаком качества; меры по укреплению государственной дисциплины, усилению государственного надзора и повышению ответственности за выпуск некачественной, нестандартной продукции. Впервые вводились экономические санкции к предприятиям за выпуск продукции, не соответствующей требованиям стандартов и технических условий. Усиление функций надзора требовало увеличения административного аппарата. Во всех союзных республиках были созданы республиканские управления Госстандарта СССР.

К середине 1970-х гг. начали разрабатываться и внедряться различные системы управления качеством. В августе 1975 г. ЦК КПСС принял постановление „Об опыте работы партийных организаций и коллективов передовых предприятий промышленности Львовской области по разработке и внедрению комплексной системы управления качеством продукции. Опыт получил высокую оценку и широкое распространение. На основе сочетания отраслевого и территориального принципов управления были созданы Московская городская и Ленинградская территориальная К У КП, позже — Киевская городская, Латвийская республиканская и многие другие. За годы XI пятилетки, объявленной «пятилеткой качества», системы управления качеством продукции были внедрены на 13600 предприятиях и объединениях, в 36 министерствах и ведомствах союзных республик, в 14 всесоюзных и республиканских промышленных объединениях. По данным Госстандарта СССР внедрение этих систем обеспечив рост выпуска продукции высшей категории качества в 1,5...2 раза, снижение в 3 раза потерь от брака, сокращение сроков освоения новой продукции и повышение производительности труда. Суммарный экономический эффект от внедрения систем управления качеством продукции только по четырем республикам составил 560 млн. руб. В 1985 г. Госстандарт СССР выпустил рекомендации по разработке программ „Качество" в регионах, отраслях промышленности, на предприятиях и в объединениях.

Фактическое положение дел, однако, не соответствовало шумной кампании. Застойные явления в народном хозяйстве усиливались, экономика страны входила в предкризисное состояние. Весь арсенал бюрократических методов управления в XI пятилетке был приведен в действие. В 1981 г. ЦК КПСС и Совет Министров СССР принимают постановление «Об усилении работы по экономии и рациональному использованию сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов». Постановлением значительно расширяется сфера государственного надзора, который распространяется на торговлю, сбыт, транспорт и хранение продукции. В 1983 г. принимается постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР „О мерах по ускорению научно-технического прогресса в народном хозяйстве", в котором ставятся очередные экономически необоснованные задачи. В этом же году выходят постановления Совета Министров СССР от 4 апреля № 273 „Об обеспечении единства измерений в стране", от 28 сентября № 936 „О государственном надзоре за стандартами и средствами измерений в СССР". В 1984 г. издается указ Президиума Верховного Совета СССР от 13 мая „Об административной

ответственности за нарушение правил по стандартизации и качеству, выпуска в обращение и содержания средств измерений и пользования ими". 7 января 1985 г. принимается постановление Совета Министров СССР № 13 „Об организации работы по стандартизации в СССР".

Итоги „пятилетки качества" известны. Они подведены в постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 12 мая 1986 г. № 540 „О мерах по коренному повышению качества продукции". Пятилетка не решила поставленных перед нею задач. Отечественная продукция не вышла на мировой рынок. Разрыв между качеством советских изделий и продукцией зарубежных фирм в среднем увеличился. Экстраординарной мерой стало введение по решению правительства с 1 января 1987 г. государственной приемки продукции.

К концу XI пятилетки количество регламентирующих установлений значительно превысило все разумные пределы. Нормативная база только ГСИ насчитывала свыше 1800 документов, в том числе 545 государственных стандартов, около 1100 методических указаний метрологических институтов, 115 руководящих документов, 60 инструкций и правил. К началу 1988 г. народнохозяйственная деятельность в стране регламентировалась 24 тыс. государственных, 54 тыс. отраслевых, 7 тыс. республиканских стандартов и 148 тыс. технических условий. Техническая база метрологического обеспечения народного хозяйства состояла из 145 государственных и 348 вторичных эталонов, 4100 типов образцовых средств измерений, 7500 типов средств измерений и 4100 стандартных образцов веществ и материалов, занесенных в Государственный реестр СССР. Только в метрологической службе СССР было занято 3,5 млн. человек. Все это громоздкое хозяйство, находившееся на государственном обеспечении функционировало крайне неэффективно.

Перестройка в нашей стране, начавшаяся после апрельского (1985 г. Пленума ЦК КПСС и исторических решений XXVII съезда партии, ознаменовала переход к революционным переменам во всех сферах общественно-политической жизни страны, начало коренной реконструкции народного хозяйства. Следуя начавшимся в стране преобразованиям, Госстандарт СССР выработал направления глубокой перестройки систем стандартизации, метрологии и контроля качества продукции в СССР включая отказ от неоправданной нормативной регламентации, значительное сокращение общего количества организационно-технических документов и упразднение нормативно-технических документов отраслевого уровня, перевод организаций, учреждений и территориальных органов Госстандарта СССР на хозрасчет и сокращение на этой основе численности административного аппарата. Установлены сжатые сроки перестройки с тем, чтобы к началу XIII пятилетки демонтировать механизм торможения и обеспечить высокие темпы развития народного хозяйства.

Объективно область науки и техники, к которой относятся метрология, стандартизация и управление качеством, включает в себя как фундаментальные законы природы, так и правила, устанавливаемые по соглашению и закрепляемые юридическими актами и нормативно-техническими документами. В понимании законов природы и разумной регламентации необходимых требований и норм — залог успехов в этом важном направлении научно-производственной деятельности.

## ***ГЛАВА 1***

### **ОБЪЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ МЕРЫ**

#### ***1.1. РОЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ В ТЕОРИИ ПОЗНАНИЯ***

Материалистическая концепция в естествознании, развивавшаяся великими представителями всех времен и народов, состоит в том, что объекты и явления окружающего мира существуют независимо от нас, от нашего сознания и восприятия этих

объектов и явлений. Исходной материалистической предпосылкой является признание того, что материя, материальный мир первичны, а сознание, мысль вторичны. Это фундаментальное положение отнюдь не тривиально. Его утверждение проходило в острейшей борьбе философских течений и школ, не вполне завершившейся по настоящее время. Отстаивая материализм, В.И. Ленин в работе „Материализм и эмпириокритицизм“ писал: „. . . в основе . . . материализма лежит признание внешнего мира . . .“. Советской наукой, основанной на материалистических представлениях, это положение рассматривается как постулат, краеугольный камень марксистско-ленинского мировоззрения.

Объекты и явления окружающего мира являются для нас предметами познания. Познавательная деятельность ведется по линии многих наук, но, как было показано В.И. Лениным на примере физики, никакая наука не может двигаться вперед, отступая от материалистического понимания познания как отражения объективной природы, реально существующего материального мира.

Познавательная деятельность имеет свои законы. Суть их - в ленинском определении процесса познания: „От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике — таков диалектический путь познания истины, познания объективной реальности“. Эта ленинская формула теории познания справедлива для всех наук, всех направлений познавательной деятельности. Но если, следуя ей, начать „разбирать, каким образом из незнания является знание, каким образом неполное, неточное знание становится более полным и более точным“, то мы неизбежно придем к пониманию важности получения количественной информации об изучаемых объектах. Она обеспечивает конкретность абстрактного мышления и выход его результатов в практику.

Получают количественную информацию посредством измерений. Таким образом, измерения входят в процесс познания, а процедура получения измерительной информации является познавательной процедурой.

На получении точной измерительной информации, питающей абстрактное мышление, зиждутся успехи всех естественных наук. Д.И. Менделеев отмечал, что любая „наука начинается ... с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры“. Ему же принадлежит и другое важное замечание: „В природе мера и вес суть главные орудия познания“.

В научной литературе теория познания называется ГНОСЕОЛОГИЕЙ (от древнегреческого γνῶσις — знание, познание и λόγος — речь, слово, учение или наука). Поскольку измерения являются инструментом познания, постольку наука об измерениях — МЕТРОЛОГИЯ относится к гносеологии, а исходные понятия метрологии являются элементами теории познания.

## ***1.2. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ***

Предметом познания, как уже говорилось, являются объекты, свойства и явления окружающего мира. Таким объектом, например, является окружающее нас пространство, а его свойством - протяженность. Последняя может характеризоваться различными способами. Общепринятой характеристикой (мерой) пространственной протяженности служит длина. Однако протяженность реального физического пространства является сложным свойством, которое не может характеризоваться только длиной. Для полного описания пространства рассматривается его протяженность по нескольким направлениям (координатам) или используются еще такие меры, как угол, площадь, объем. Таким образом, пространство является многомерным.

Любые события и явления в реальном мире происходят не мгновенно, а имеют некоторую длительность. Это свойство окружающего нас мира качественно отличается от пространственной протяженности. Его также можно характеризовать по-разному, но общепринятой мерой здесь является время.

Свойство тел сохранять в отсутствии внешних воздействий состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется инертностью. Мерой инертности является масса.

Свойство тел, состоящее в том, что они нагреты до некоторого состояния, качественно отличается от предыдущего. Оно могло бы характеризоваться средней скоростью теплового движения молекул, но распространение получила мера нагретости тел, называемая термодинамической температурой.

Общепринятые или установленные законодательным путем характеристики (меры) различных свойств, общих в качественном отношении для многих физических объектов (физических систем, их состояний и происходящих в них процессов), но в количественном отношении индивидуальных для каждого из них, называются физическими величинами. Кроме длины, времени, температуры, массы к физическим величинам относятся плоский и телесный углы, сила, давление, скорость, ускорение, электрическое напряжение, сила электрического тока, индуктивность освещенность и многие другие. Все они определяют некоторые общие в качественном отношении физические свойства, количественные характеристики которых могут быть совершенно различными. Получение сведений об этих количественных характеристиках и является задачей измерений.

Объектами измерений являются не только физические величины. Например, в экономике существует понятие стоимости - свойства, общего для всех видов товарной продукции, но в количественном отношении индивидуального для каждого из них. Другой пример — цена. В эпоху зарождения товарного обмена она имела натуральное выражение и определялась эквивалентным количеством продуктов питания, поголовьем рогатого скота и т. п. С появлением всеобщего эквивалента — денег - и переходом к товарно-денежным отношениям цена стала выражаться в денежных знаках. И стоимость, и цена являются мерами различных свойств товарной продукции. Они относятся не к физическим, а к экономическим величинам или, как их называют, *экономическим показателям*.

В сфере промышленного производства и в различных видах народнохозяйственной деятельности большое внимание уделяется качеству продукции. Оно определяется как совокупность ее свойств, обуславливающих удовлетворение определенных потребностей в соответствии с назначением продукции. Мерами этих свойств служат показатели качества. В КВАЛИМЕТРИИ (от латинского qualis - какой по качеству, и греческого метрю — измеряю) - разделе метрологии, посвященном измерению качества, различают следующие виды показателей качества продукции:

1. **Показатели назначения** характеризуют свойства продукции, определяющие основные функции, для выполнения которых она предназначена, и обуславливают область ее применения.
2. **Показатели надежности** характеризуют свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.
3. **Показатели экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии и трудовых ресурсов** характеризуют свойства изделия, отражающие его техническое совершенство по уровню или степени потребляемых им сырья, материалов, топлива и трудовых ресурсов при эксплуатации.
4. **Эргономические показатели** характеризуют систему „человек — изделие" (в частности, „человек — машина") и учитывают комплекс гигиенических, антропометрических, физиологических и психологических свойств человека, проявляющихся в производственных и бытовых процессах.
5. **Эстетические показатели** характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения.
6. **Показатели технологичности** характеризуют свойства состава и

структуры или конструкции продукции, определяющие ее приспособленность к достижению минимальных затрат при производстве, эксплуатации и восстановлении для заданных значений показателей качества продукции, объема ее выпуска и условий выполнения работ.

7. **Показатели транспортабельности** характеризуют приспособленность продукции к перемещению в пространстве (транспортировке), не сопровождающемуся ее использованием или потреблением.
8. **Показатели стандартизации и унификации** характеризуют насыщенность продукции стандартными, унифицированными и оригинальными составными частями, а также уровень унификации с другими изделиями.
9. **Патентно-правовые показатели** характеризуют степень обновления технических решений, использованных в продукции, их патентную защиту, а также возможность беспрепятственной реализации продукции в стране и за рубежом.
10. **Экологические показатели** характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих при эксплуатации или потреблении продукции.
11. **Показатели безопасности** характеризуют особенности продукции, обуславливающие при ее использовании безопасность обслуживающего персонала.
12. Обобщенным показателем эффективности использования продукции является **интегральный показатель качества**, который определяется как соотношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации и потребления продукции и суммарных затрат на ее создание и эксплуатацию или потребление.

Внутри каждого вида можно выделить группы и отдельные показатели качества. Таким образом, качество, как и пространство, многомерно.

Переход к количественным методам исследований на основе измерительной информации в биологии, психологии, спорте, искусстве, медицине, педагогике, социологии и т. д. стал отличительной чертой нашего времени. Привычным стало измерение знаний учащихся, мастерства спортсменов и исполнителей художественных произведений, вдохновения, красоты, таланта и других свойств, общих в качественном, но индивидуальных в количественном отношении. В абстрактной математике широкое распространение получили меры неопределенности, значимости и многие другие.

Между измеряемыми величинами существуют связи и зависимости, выражаемые математическими соотношениями и формулами. Эти формулы и соотношения могут отражать законы природы, как, например закон Ома:

$$I = \frac{U}{R};$$

или второй закон Ньютона:

$$F = m \cdot a;$$

могут быть определениями некоторых величин, например, плотности:

$$\rho = \frac{m}{V};$$

или интегрального показателя качества:

$$K_{II} = \frac{P_{\Sigma}}{Z_C + Z_{II}}$$

где  $P_{\Sigma}$  — суммарный полезный эффект от потребления продукции, а  $Z_C$  и  $Z_{II}$  — суммарные затраты на ее создание и потребление, либо, наконец, экспериментально или теоретически установленными соотношениями между несколькими величинами. В подобных зависимостях одни величины выступают как основные, а другие — как производные от них. Опыт показал, что всю механику, например, можно изложить, используя всего три основные величины, всю теплотехнику — с помощью четырех основных величин, для изложения всей молекулярной физики достаточно пяти основных величин и т. д. Вся современная физика может быть построена на семи основных

величинах. Выбор их в известном смысле является произвольным, но наиболее рационально в качестве основных физических величин выбрать такие, которые характеризуют фундаментальные свойства материального мира. В качестве таковых в настоящее время установлены *длина, масса, время, сила электрического тока, термодинамическая температура, количество вещества и сила света*. С помощью этих и двух дополнительных величин - *плоского и телесного углов* - введенных исключительно для удобства, образуется все многообразие производных физических величин и обеспечивается описание любых свойств физических объектов и явлений.

В квалиметрии не принято деление показателей качества на основные и производные. Идея выражения одних показателей через другие воплощается здесь за счет выделения единичных показателей качества, каждый из которых относится только к одному из свойств продукции, и комплексных показателей, характеризующих сразу несколько ее свойств. Комплексные показатели выражаются через единичные подобно тому, как производные физические величины выражаются через основные.

### 1.3. КАЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН

Формализованным отражением качественного различия измеряемых величин является их размерность. Размерность обозначается символом  $\dim$ , происходящим от слова *dimension*, которое в зависимости от контекста может переводиться и как размер, и как размерность.

Размерность основных физических величин обозначается соответствующими заглавными буквами. Для длины, массы и времени, например,

$$\dim l = L; \dim m = M; \dim t = T.$$

При определении размерности производных величин руководствуются следующими правилами:

1. Размерности левой и правой частей уравнений не могут не совпадать, так как сравниваться между собой могут только одинаковые свойства. Объединяя левые и правые части уравнений, отсюда можно прийти к выводу, что алгебраически суммироваться могут только величины, имеющие одинаковые размерности.
2. Алгебра размерностей мультипликативна, т. е. состоит из одного единственного действия — умножения.
  - 2.1. Размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей. Так, если зависимость между значениями величин  $Q, A, B, C$  имеет вид  $Q = A \cdot B \cdot C$ , то:
 
$$\dim Q = \dim A \cdot \dim B \cdot \dim C.$$
  - 2.2. Размерность частного при делении одной величины на другую равна отношению их размерностей, т. е. если  $Q = A/B$  то:
 
$$\dim Q = \frac{\dim A}{\dim B}.$$
  - 2.3. Размерность любой величины, возведенной в некоторую степень равна ее размерности в той же степени. Так, если  $Q = A^n$ , то

$$\dim Q = \prod_1^n \dim A = \dim^n A.$$

Например, если скорость определяется по формуле  $V = \frac{l}{t}$ , то

$$\dim V = \frac{\dim l}{\dim t} = \frac{L}{T} = LT^{-1}. \text{ Если сила по второму закону Ньютона } F = m \cdot a, \text{ где } a = \frac{V}{t} —$$

ускорение тела, то  $\dim F = \dim m \cdot \dim a = \frac{ML}{T^2} = MLT^{-2}$ .

Таким образом, всегда можно выразить размерность производной физической величины через размерности основных физических величин с помощью степенного одночлена:

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma \dots,$$

Где L, M, T — размерности соответствующих основных физических величин;  $\alpha, \beta, \gamma \dots$  — показатели размерности. Каждый из показателей размерности может быть положительным или отрицательным, целым или дробным числом, нулем. Если все показатели размерности равны нулю, то такая величина называется *безразмерной*. Она может быть *относительной*, определяемой как отношение одноименных величин (например, относительная диэлектрическая проницаемость), и *логарифмической*, определяемой как логарифм относительной величины (например, логарифм отношения мощностей или напряжений).

Итак, размерность является качественной характеристикой измеряемой величины. Она отражает ее связь с основными величинами и зависит от выбора последних. Как указывал М. Планк, вопрос об „истинной“ размерности любой величины „имеет не более смысла, чем вопрос об „истинном“ названии какого-либо предмета“. По этой причине в гуманитарных науках, искусстве, спорте, квалитметрии, где номенклатура основных величин не определена, теория размерностей не находит пока эффективного применения. В физике, напротив, методами теории размерностей нередко удается получать важные самостоятельные результаты. Формальное применение алгебры размерностей иногда позволяет определить неизвестную зависимость между физическими величинами.

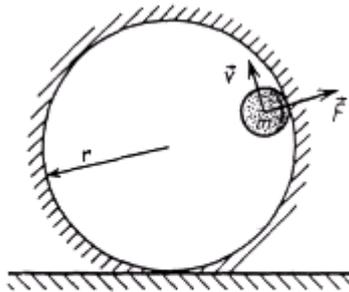


Рис. 1. Движение тела по окружности

Пример 1. В результате наблюдений установлено, что при движении по окружности сила F, прижимающая тело к опоре (рис. 1), в какой-то степени зависит от его скорости v, массы m и радиуса окружности r:

$$F = m^\alpha v^\beta r^\gamma.$$

Каков вид этой зависимости?

**Решение.** На основании алгебры размерностей:

$$\dim F = \dim^\alpha m \cdot \dim^\beta v \cdot \dim^\gamma r.$$

но  $\dim F = MLT^{-2}$ ;  $\dim m = M$ ;  $\dim v = LT^{-1}$ ;  $\dim r = L$ .

$$\text{Отсюда } LMT^{-2} = M^\alpha (LT^{-1})^\beta L^\gamma = L^{\beta+\gamma} M^\alpha T^{-\beta}.$$

Следовательно, показатели размерности

удовлетворяют уравнениям:

$$\beta + \gamma = 1; \alpha = 1; -\beta = -2,$$

решение которых:  $\alpha = 1; \beta = 2, \gamma = -1$ .

Таким образом

$$F = \frac{mV^2}{r}.$$

К выводу этой зависимости на основе законов механики был близок Галилей, но первым ее установил Гюйгенс.

Теория размерностей повсеместно применяется для оперативной проверки правильности сложных формул. Если размерности левой и правой частей уравнения не совпадают, т.е. не выполняется правило 1, то в выводе формулы, к какой бы области знаний она ни относилась, следует искать ошибку.

#### 1.4. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН

Количественной характеристикой измеряемой величины служит ее размер. Получение информации о размере физической или нефизической величины является содержанием любого измерения. Простейший способ получения такой информации, позволяющий составить некоторое представление о размере измеряемой величины, состоит в сравнении его с другим по принципу „что больше (меньше)?“ или „что лучше (хуже)?“. Более подробная информация о том, на сколько больше (меньше) или во сколько раз лучше (хуже) иногда даже не требуется. Например, масса на рис. 2 может быть намного, а может быть немного больше массы  $m_2$ , но для решения вопроса о том, что легче, получаемой таким путем измерительной информации вполне достаточно. Подобным образом решаются многие задачи выбора: кто сильнее? что нагляднее? как проще? и т. п. При этом число сравниваемых между собой размеров может быть достаточно большим. Расположенные в порядке возрастания или убывания размеры измеряемых величин образуют шкалу порядка. Так, например, на многих конкурсах и соревнованиях мастерство исполнителей и спортсменов (или целых команд) определяется их местом, занятым в итоговой таблице. Последняя, таким образом, является шкалой порядка — формой представления измерительной информации, отражающей тот факт, что мастерство одних выше мастерства других, хотя и неизвестно, в какой степени (на сколько, или во сколько раз). Построив людей по росту, можно, пользуясь шкалой порядка, сделать вывод о том, кто выше кого, однако сказать на сколько выше или во сколько раз нельзя. Расстановка размеров в порядке их возрастания или убывания с целью получения измерительной информации по шкале порядка называется *ранжированием*.

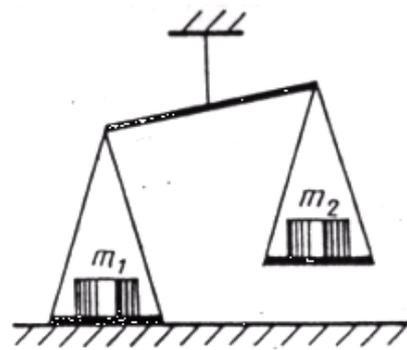


Рис. 2. Сравнение двух размеров одной физической величины (массы) по шкале порядка  $m_1$

Для облегчения измерений по шкале порядка некоторые точки на ней можно зафиксировать в качестве опорных (*реперных*). Знания, например, измеряют по реперной шкале порядка, имеющей следующий вид: неудовлетворительно, удовлетворительно, хорошо, отлично. Точкам реперной шкалы могут быть поставлены в соответствие цифры, называемые баллами. Например, интенсивность землетрясений измеряется по двенадцатибалльной международной сейсмической шкале MSK-64 (табл. 1, шкала приведена с некоторыми сокращениями), сила ветра — по шкале Бофорта (табл. 2). По реперным шкалам измеряются сила морского волнения, степень торошения льда, чувствительность фотопленок, твердость минералов (минералогическая шкала твердости приведена в табл. 3) и многие другие величины. Особенно широкое распространение

реперные шкалы получили в гуманитарных науках, спорте, искусстве и других областях где измерения еще не достигли высокого совершенства.

Недостатком реперных шкал является неопределенность интервалов между реперными точками. Поэтому баллы нельзя складывать, вычитать, перемножать, делить и т. п. Более совершенными в этом отношении являются шкалы, составленные из строго определенных интервалов. Общепринятым, например, является измерение времени по шкале, разбитой на интервалы, равные периоду обращения Земли вокруг Солнца (летоисчисление) Эти интервалы (годы) делятся в свою очередь на более мелкие (сутки) равные периоду обращения Земли вокруг своей оси. Сутки в свою очередь делятся на часы, часы на минуты, минуты на секунды. Такая шкала называется шкалой интервалов. По шкале интервалов можно уже судить не только о том, что один размер больше другого, но и о том, на сколько больше, т.е. на шкале интервалов определены такие математические действия, как сложение и вычитание. При любом летоисчислении коренной перелом в ходе второй мировой войны произошел под Сталинградом спустя 700 лет после разгрома Александром Невским немецких рыцарей Ливонского ордена на льду Чудского озера. Но если поставить вопрос о том, „во сколько раз" позже наступило это событие, то окажется, что по-нашему

григорианскому стилю в  $\frac{1942}{1242} \approx 1.56$  раза, по юлианскому календарю, отсчитывающему

время от „сотворения мира", — в  $\frac{7448}{6748} \approx 1.10$  раза, по

иудейскому, где время отсчитывается «от сотворения Адама», — в  $\frac{5638}{4938} \approx 1.14$  раза, а по

магометанскому летоисчислению, начатому с даты бегства Магомета из Мекки в священный город Медину, где была основана

первая мусульманская община, — в  $\frac{1320}{620} \approx 2.13$  раза. Следовательно,

сказать по шкале интервалов во сколько раз один размер больше другого нельзя. Это объясняется тем, что на шкале интервалов известен масштаб, а начало отсчета может быть выбрано произвольно. Поэтому определить по шкале интервалов, чему равен тот или иной размер, невозможно.

Таблица 1.

Балл	Название землетрясения	Краткая характеристика
1	Незаметное	Отмечается только сейсмическими приборами

2	Очень слабое	Ощущается отдельными людьми, находящимися в состоянии покоя
3	Слабое	Ощущается лишь небольшой частью населения
4	Умеренное	Распознается по мелкому дребезжанию и колебанию предметов, посуды и оконных стекол, скрипу дверей и стен
5	Довольно сильное	Общее сотрясение зданий, колебание мебели, трещины оконных стекол и штукатурки, пробуждение спящих
6	Сильное	Ощущается всеми. Картины падают со стен, откалываются куски штукатурки, легкое повреждение зданий
7	Очень сильное	Трещины в стенах каменных домов. Анти-сейсмические, а также деревянные постройки остаются невредимы
8	Разрушительное	Трещины на крутых склонах и на сырой почве. Памятники сдвигаются с места или опрокидываются. Дома сильно повреждаются
9	Опустошительное	Сильное повреждение и разрушение каменных домов
10	Уничтожающее	Крупные трещины в почве. Оползни и обвалы. Разрушение каменных построек, искривление железнодорожных рельсов
11	Катастрофа	Широкие трещины в земле. Многочисленные оползни и обвалы. Каменные дома совершенно разрушаются
12	Сильная катастрофа	Изменения в почве достигают огромных размеров. Многочисленные обвалы, оползни, трещины. Возникновение водопадов, подпруд на озерах. Отклонение течения рек. Ни одно сооружение не выдерживает

Таблица 2.

Балл	Название ветра	Действие
0	Штиль	Дым идет вертикально
1	Тихий	Дым идёт слегка наклонно
2	Лёгкий	Ощущается лицом, шелестят листья
3	Слабый	Развеваются флаги
4	Умеренный	Поднимается пыль
5	Свежий	Вызывает волны на воде
6	Сильный	Свистит в вантах, гудят провода
7	Крепкий	На волнах образуется пена
8	Очень крепкий	Трудно идти против ветра

9	Шторм	Срывает черепицу
10	Сильный шторм	Вырывает деревья с корнем
11	Жесткий шторм	Большие разрушения
12	Ураган	Опустошительное действие

Таблица 3.

Балл	Характеристика твердости
0	Меньше твердости талька
1	Равна твердости талька или больше ее, но меньше твердости гипса
2	Равна твердости гипса или больше ее, но меньше твердости известкового шпата
3	Равна твердости известкового шпата или больше ее, но меньше твердости плавикового шпата
4	Равна твердости плавикового шпата или больше ее, но меньше твердости апатита
5	Равна твердости апатита или больше ее, но меньше твердости полевого шпата
6	Равна твердости полевого шпата или больше ее, но меньше твердости кварца
7	Равна твердости кварца или больше ее, но меньше твердости топаза
8	Равна твердости топаза или больше ее, но меньше твердости корунда
9	Равна твердости корунда или больше ее, но меньше твердости алмаза
10	Равна твердости алмаза или больше ее

Шкалы интервалов иногда получают путем пропорционального деления интервала между двумя реперными точками. Так, в температурной шкале Цельсия один градус является сотой частью интервала между температурой таяния льда, принимаемой за начало отсчета, и температурой кипения воды. В температурной шкале Реомюра этот же интервал разбит на 80 градусов, а в температурной шкале Фаренгейта — на 180 градусов, причем начало отсчета сдвинуто на 32°F в сторону низких температур. Соотношение между этими шкалами показано на рис. 3.

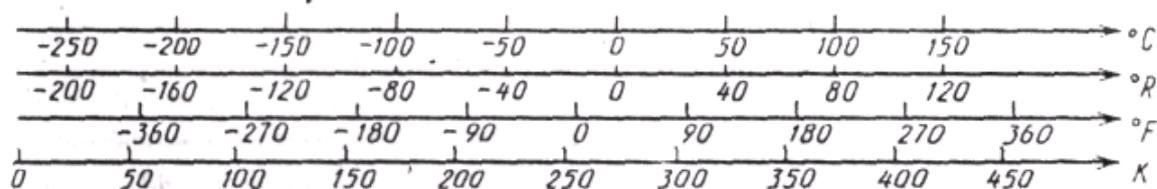


Рис. 3. Температурные шкалы Цельсия (°C), Реомюра (°R), Фаренгейта (°F) и Кельвина (K)

Если в качестве одной из двух реперных точек выбрать такую, в которой размер не принимается равным нулю (что приводит к появлению отрицательных значений), а равен нулю на самом деле, то по такой шкале уже можно отсчитывать абсолютное значение размера и определять не только, на сколько один размер больше или меньше другого, но и во сколько раз он больше или меньше. Эта шкала называется шкалой отношений. Примером может служить температурная шкала Кельвина. В ней за начало отсчета принят абсолютный нуль температуры, при котором прекращается тепловое движение молекул. Более низкой температуры быть не может. Второй реперной точкой служит температура таяния льда. По шкале Цельсия интервал между этими реперами равен 273,16°C (см. рис.

3). Поэтому на шкале Кельвина его делят на равные части, составляющие  $\frac{1}{273,16}$  интервала. Каждая такая часть называется Кельвином и равна градусу Цельсия, что значительно облегчает переход от одной шкалы к другой.

Шкала отношений является наиболее совершенной из всех рассмотренных шкал.

На ней определено наибольшее число математических операций: сложение, вычитание, умножение, деление. Но, к сожалению, построение шкалы отношений возможно не всегда. Время, например, может измеряться только по шкале интервалов.

В зависимости от того, на какие интервалы разбита шкала, один и тот же размер представляется по-разному. Например, 0,001 км; 1 м; 100 см; 1000 м - четыре варианта представления одного и того же размера. Их называют значениями измеряемой величины. Таким образом, значение измеряемой величины - это выражение ее размера в определенных единицах измерения. Входящее в него отвлеченное число называется числовым значением. Оно показывает, на сколько единиц измеряемый размер больше нуля или во сколько раз он больше единицы (измерения). Если 0,5 кг, 20 с, 8,12 руб., 6 баллов, 400 кормовых единиц, 100 т условного топлива — некоторые значения измеряемых величин, то фигурирующие в них отвлеченные числа — числовые значения этих величин. Таким образом, значение измеряемой величины  $Q$  определяется ее числовым значением  $q$  и некоторым размером  $[Q]$ , принятым за единицу измерения:

$$Q = q[Q] \quad (1)$$

Увеличение или уменьшение  $[Q]$  влечет за собой обратно пропорциональное изменение  $q$ . Поэтому значение, как и размер измеряемой величины, от выбора единиц измерения не зависит.

Словосочетания типа „размер длины" или „размер массы" в метрологии не применяются. Не говорят и „величина длины" или „величина массы", так как длина и масса сами являются величинами. Принято говорить просто длина, масса, время, скорость. Например, масса составляет (или равна) 3 кг, скорость 15 м/с.

### **1.5. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

Числовые значения измеряемых величин зависят от того, какие используются единицы измерений. Поэтому роль последних очень велика. Если допустить произвол в выборе единиц, то результаты измерений окажутся несопоставимы между собой, т. е. нарушится *единство измерений*. Чтобы этого не произошло, единицы измерений устанавливаются по определенным правилам и закрепляются законодательным путем. **Наличие законодательной метрологии отличает эту науку от других естественных наук (математики, физики, химии и др.) и направлено на борьбу с произволом в выборе таких решений, которые не диктуются объективными закономерностями, а принимаются по соглашению.**

Совокупность единиц измерения основных и производных величин называется системой единиц. Не во всех областях измерений системы единиц сформировались окончательно и закреплены соответствующими законодательными актами. Наилучшим образом в этом отношении обстоят дела в области измерения физических величин.

В физике общие правила конструирования систем единиц были сформулированы Гауссом в 1832 г. Они сводятся к следующему:

1. выбираются основные физические величины;
2. устанавливаются единицы основных физических величин. Для этого какому-либо размеру каждой основной физической величины приписывается числовое значение, равное 1. Выбор этого размера является произвольным и определяется исключительно соображениями удобства его использования в обиходе. Для обеспечения единства измерений все эти размеры, называемые единицами основных физических величин, должны быть закреплены законодательным путем. Обычно их называют просто основными единицами;
3. устанавливаются единицы производных физических величин, также называемые обычно просто производными единицами.

Пусть, например, производная физическая величина  $Q$  образуется путем перемножения двух основных величин  $A$  и  $B$ . Тогда согласно выражению (1), значение  $Q$  можно выразить через значения  $A$  и  $B$ :

$$q[Q] = a[A]b[B],$$

а производная единица может быть выражена через основные единицы с помощью соотношения:

$$[Q] = \frac{ab}{q} [A][B]$$

Если же производная величина  $Q$  образуется посредством деления основных величин  $A$  и  $B$ , то:

$$q[Q] = \frac{a[A]}{b[B]},$$

и производная единица выражается через основные следующим образом:

$$[Q] = \frac{a}{qb} [A][B]^{-1}$$

В общем случае производные единицы выражаются через основные с помощью степенного одночлена:

$$[Q] = k[A]^\alpha [B]^\beta [\dots]^\gamma \dots,$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  полагается безразмерным, а  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  оказываются тогда уже известными показателями размерности. В последнее время к коэффициенту  $k$  предъявлять еще одно требование — он должен равняться 1. Получаемые при этом условии так называемые *когерентные* или *согласованные* системы единиц являются наиболее простыми и удобными в обращении.

В 1832 г. Гауссом была разработана система единиц, названная им абсолютной, с основными единицами — миллиметр, миллиграмм, секунда. В дальнейшем по мере развития науки и техники возникали все новые и новые системы, пока их обилие не стало тормозом научно-технического прогресса. В этих условиях XI Генеральная конференция по мерам и весам в 1960 г. приняла Международную систему единиц физических величин, получившую у нас в стране сокращенное обозначение СИ (от начальных букв SI в словах Systeme International). Последующими Генеральными конференциями по мерам и весам в первоначальный вариант СИ внесены некоторые изменения. В Советском Союзе и всех других странах — членах Совета Экономической Взаимопомощи Международная система единиц является обязательной с 1 января 1980 г.

Основными единицами Международной системы являются:

**метр** (международное обозначение m; русское — м) — единица длины, равная пути, проходимому в вакууме светом за  $1/299792458$  долю секунды\*;

**килограмм** (международное обозначение kg.; русское - кг) - единица массы, равная массе международного прототипа килограмма;

**секунда** (международное обозначение s; русское - с) - единица времени, равная  $9192631770$  периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133;

**ампер** (международное обозначение A; русское — А) — единица силы электрического тока. Ампер равен силе неизменяющегося тока, который проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н;

**кельвин** (международное обозначение K; русское - К) — единица термодинамической температуры, равная  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды;

**кандела** (международное обозначение cd; русское - кд) — единица силы света. Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого

в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср;

**моль** (международное обозначение mol; русское - моль) - единица количества вещества. Моль равен количеству вещества, содержащему столько же структурных элементов (атомов, молекул или других частиц), сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода-12.

Предусмотрены также две дополнительные единицы:

**радиан** (международное обозначение rad; русское - рад) - единица плоского угла, равная внутреннему углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу;

**стерадиан** (международное обозначение sr; русское - ср) - единица телесного угла. Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности этой сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Производные единицы СИ образуются из основных и дополнительных по правилам образования когерентных производных единиц, т. е. связаны с ними соотношением:

$$[Q] = m^{\alpha} \cdot кг^{\beta} \cdot с^{\gamma} \dots$$

---

**\* При таком определении метра, принятом XVII Генеральной конференцией по мерам и весам в 1983 г., длина не может считаться основной физической величиной, так как выражается через скорость и время. По всей вероятности за этим решением XVII Генеральной конференции по мерам и весам должно последовать изменение структуры Международной системы единиц.**

---

Некоторым из них даны названия в честь великих ученых: *ньютон, герц, паскаль, кулон, ом, сименс, тесла, беккерель* и др.. Обозначения таких единиц, как международные, так и русские, пишутся с заглавной буквы.

**Пример 2.** Образовать производные единицы силы, давления, работы, мощности, электрических напряжения, сопротивления и проводимости.

**Решение 1.** Так как  $\dim F = MLT^{-2}$ , то  $[F] = м \cdot кг \cdot с^{-2}$ . Эта единица называется ньютон (Н):

$$Н = м \cdot кг \cdot с^{-2}.$$

2. Давление  $p$  определяется силой, действующей при равномерной нагрузке на единицу поверхности. Поэтому  $\dim p = L^{-1}MT^{-2}$  и, следовательно,  $[p] = м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-2}$ . Эта единица называется Паскаль (Па):

$$Па = м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-2}.$$

3. Работа  $A$ , совершаемая в направлении силы  $F$ , определяется по формуле:  $A = FL$ . Отсюда  $\dim A = L^2MT^{-2}$ , а  $[A] = м^2 \cdot кг \cdot с^{-2}$ . Такая единица называется Джоуль (Дж):

$$Дж = м^2 \cdot кг \cdot с^{-2}.$$

4. Мощность  $P$  - это работа, совершаемая в единицу времени. Поэтому  $\dim P = L^2MT^{-3}$ , а  $[P] = м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}$ . Эта единица называется ватт (Вт):

$$Вт = м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}.$$

5. Если электрическое напряжение  $U$  определить через мощность  $P$  и силу  $I$  постоянного электрического тока, то  $\dim U = L^2MT^{-3}I^{-1}$  и  $[U] = м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}$ . Единица электрического напряжения называется вольт (В):

$$В = м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}.$$

6. На основании закона Ома  $\dim R = L^2MT^{-3}I^{-2}$ . Отсюда  $[R] = м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}$ . Эта единица называется ом (Ом):

$$Ом = м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}.$$

7. Электрическая проводимость  $G$  - величина, обратная электрическому сопротивлению  $R$ .

Поэтому  $\dim G = L^{-2}M^{-1}T^3I^2$ , а  $[G] = m^{-2} \cdot \kappa z^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2$ . Единица электрической проводимости называется сименс (См):

$$Cm = m^{-2} \cdot \kappa z^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2.$$

Десятичные кратные и дольные единицы образуются с помощью множителей и приставок, наименования, происхождение и обозначения которых приведены в табл. 4.

К наименованию единицы допускается присоединять только одну Ставку (например, пикофарад, а не микромирофарад). У единиц, образованных как произведение или отношение нескольких единиц, приставку присоединяют, как правило, к наименованию первой единицы, например килопаскаль - секунда на метр (кПа • с/м), а не паскаль килосекунда на метр. Кратные и дольные единицы выбирают обычно таким образом, чтобы числовое значение величины находилось в диапазоне от 0,1 до 1000 (например, для длины  $l = 7.5 \cdot 10^{-5} м = 75 мкм = 0,075 мм = 75000 нм$  следует выбрать 75 мкм, так как в других случаях числовое значение выходит за пределы указанного диапазона). От этого правила отступают только при составлении таблиц числовых значений одной и той же величины или при сопоставлении этих значений в одном тексте, а также в тех областях, где традиционно применяется конкретная единица (например, линейные размеры на машиностроительных чертежах всегда выражаются в миллиметрах).

**Таблица 4**

Множитель	Приставка				
	Наименование	Происхождение		Обозначение	
		От какого слова	Из какого языка	Международное	Русское
$1000000000000000000 = 10^{18}$	экса	шесть (раз по $10^3$ )	греч.	E	Э
$1000000000000000 = 10^{15}$	пета	пять (раз по $10^3$ )	тоже	P	П
$100000000000000 = 10^{12}$	тера	огромный	„	T	Т
$1000000000 = 10^9$	гига	гигант	„	G	Г
$1000000 = 10^6$	мега	большой	„	M	М
$1000 = 10^3$	кило	тысяча	„	k	к
$100 = 10^2$	гекто	сто	„	h	г
$10 = 10^1$	дека	десять	„	da	да
$0,1 = 10^{-1}$	деци	десять	лат.	<b>d</b>	д
$0,01 = 10^{-2}$	санти	сто	то же	c	с
$0,001 = 10^{-3}$	мили	тысяча	„	m	м
$0,000001 = 10^{-6}$	микро	малый	греч.	μ	мк
$0,000000001 = 10^{-9}$	нано	карлик	лат.	n	н
$0,000000000001 = 10^{-12}$	пико	пикколо (маленький)	итал.	p	п

$0,0000000000000001 = 10^{-15}$	фемто	пятнадцать	дат.	f	ф
$0,000000000000000001 = 10^{-18}$	атто	восемнадцать	тоже	a	a

## ГЛАВА 2

### РАЗНОВИДНОСТИ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

#### 2.1. РАЗНОВИДНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

*Любое измерение по шкале отношений состоит в сравнении неизвестного размера с известным и выражении первого через второй в кратном или дольном отношении.* Таких измерений каждому человеку приходится делать в жизни бесчисленное множество. Сравнивая в уме высоту людей с представлением о единице длины в Международной системе, мы измеряем их рост на глаз с точностью до нескольких сантиметров. Легко можем определить, с какой примерно скоростью движется автомобиль. Результаты подобных измерений в значительной мере зависят от квалификации тех, кто их выполняет. Штангист, например, довольно точно устанавливает массу поднимаемой штанги, врач наощупь измеряет температуру больного с точностью до десятых долей кельвина. Во всех этих случаях информация о размерах тех или иных физических величин, доставляемая с помощью органов чувств, сравнивается с представлением о соответствующих единицах, и неизвестные размеры выражаются через эти единицы в кратном или дольном отношении.

Измерения, основанные на использовании органов чувств человека (осозания, обоняния, зрения, слуха и вкуса), называются органолептическими. Они широко применяются не только в обиходе, но и в некоторых областях науки и техники (например, при визуальной топографической съемке местности).

Природа в разной степени наделила людей способностями к органолептическим измерениям по шкале отношений. Частоту звуковых колебаний, например, могут определить лишь те немногие, кто обладает абсолютным слухом. Большинство же воспринимает разность звуковых частот в тонах и полутонах, т. е. способно к измерению частоты звука только по шкале интервалов. Измерения по шкале интервалов, будучи менее совершенными чем по шкале отношений, могут выполняться и без участия органов чувств. Измерение времени, например, или гравитации (космонавтами) основываются на ощущениях. Еще менее совершенные измерения по шкале порядка строятся на впечатлениях. К ним относятся конкурсы мастеров искусства (скульпторов, художников, поэтов, композиторов), соревнования спортсменов по фигурному катанию на коньках и т. п. Измерения, основанные на интуиции, называются эвристическими. При всех таких измерениях, кроме ранжирования (расстановки измеряемых величин в порядке убывания или возрастания их размеров), широко применяется способ попарного сопоставления,

когда измеряемые величины сначала сравниваются между собой попарно, и для каждой пары результат сравнения выражается в форме: «больше—меньше» или «лучше—хуже». Затем ранжирование производится на основании результатов попарного сопоставления.

**Пример 3.** Результат дегустации пищевых продуктов, обозначенных номерами от 1 до 6, представлен табл. 5, где предпочтению  $i$ -го продукта над  $j$ -м соответствует 1, а противоположному отношению - 0. Расставить продукты по качеству на шкале порядка.

Таблица 5

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	Итого
1		1	0	1	1	1	4
2	0		0	1	1	1	3
3	1	1		1	1	1	5
4	0	0	0		0	0	0
5	0	0	0	1		0	1
6	0	0	0	1	1		2

**Решение.** Ранжированный ряд имеет вид: №4; №5; №6; №2; №1; №3.

Иногда попарное сопоставление проводят более тщательно, учитывая равноценность.

**Пример 4.** В табл. 6 приведены результаты попарного сопоставления мастерства певцов, выступавших на конкурсе вокалистов. Преимущество  $i$ -го солиста над  $j$ -м обозначено 1,  $j$ -го над  $i$ -м соответственно -1, равноценное выступление 0. Определить итоги конкурса.

Таблица 6

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	Итого
1	0	1	-1	1	1	1	3
2	-1	0	-1	0	1	0	-1
3	1	1	0	1	1	1	5
4	-1	0	-1	0	1	0	-1
5	-1	-1	-1	-1	0	-1	-5
6	-1	0	-1	0	1	0	-1

**Решение.** Победителем конкурса стал певец, выступавший третьим, второе место занял солист, выступавший первым. Третье, четвертое и пятое места поделили между собой вокалисты, выступавшие вторым, четвертым и шестым. Последнее место досталось певцу, выступавшему пятым.

Психологами доказано, что попарное сопоставление лежит в основе любого выбора. Сравнить между собою два размера по шкале порядка всегда легче, чем сразу устанавливать значения измеряемых величин по шкале отношений. Поэтому настройщики музыкальных инструментов пользуются сначала камертоном, а потом ведут настройку, измеряя высоту тона (частоту звука) по шкале интервалов.

Результат измерения, выполненного человеком, зависит от множества обстоятельств, не поддающихся строгому учету. Это и его настроение в данный момент, и степень сосредоточенности, и наличие или отсутствие раздражающих факторов, и многое другое. Вследствие этого, как показывает опыт, результат измерения является в какой-то мере случайным. Повторное измерение той же самой величины может дать (и на практике дает) несколько иной результат, последующие — также. Народная мудрость давно выработала правило: „семь раз отмерь, один раз отрежь“, имея в виду, что элемент случайности при многократном измерении одной и той же величины уменьшается. Результаты однократных измерений при этом усредняются.

Существуют, однако, факторы, которые являются постоянно действующими для

каждого человека. Это его требовательность (на конкурсах), личные вкусы, симпатии, склонности и т. п. Вследствие своих индивидуальных особенностей одни люди дают постоянно завышенные результаты измерений, а другие - постоянно заниженные. Чтобы избежать ошибок, вызванных этой причиной, прибегают к услугам нескольких специалистов - экспертов. Усреднение результатов, получаемых независимо каждым из них при измерении одной и той же величины, позволяет повысить объективность результата такого многократного измерения. Экспертный метод широко применяется в квалитметрии, спорте, искусстве, медицине, гуманитарных науках — всюду, где применение более совершенных методов невозможно, либо трудно, дорого и нецелесообразно.

Человек является высокосовременным „средством измерений". Однако вполне объективными могут считаться только измерения, выполняемые без участия человека.

Измерения, выполняемые с помощью специальных технических средств, называются инструментальными. Среди них могут быть автоматизированные и автоматические. При автоматизированных измерениях роль человека полностью не исключена. Он может, например, проводить съем данных с отсчетного устройства измерительного прибора (шкалы со стрелкой или Цифрового табло), вести их регистрацию в журнале, обрабатывать в уме или с помощью вычислительных средств. На качество всех этих операций влияет настроение человека, степень его сосредоточенности, серьезности, мера ответственности за порученное дело, уровень профессиональной подготовки. Таким образом, элемент субъективности при автоматизированных измерениях остается.

Автоматические измерения выполняются без участия человека. Результат их представляется в форме документа и является совершенно объективным. Однако стоимость такого результата обычно велика, и целесообразность автоматизации измерений всегда должна быть экономически обоснована.

## ***2.2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ***

Так как измеряются свойства, общие в качественном отношении многим объектам или явлениям, эти свойства без участия органов чувств человека должны быть каким-то образом обнаружены, в чем-то должны проявляться. Технические устройства, предназначенные для обнаружения (индикации) физических свойств, называются индикаторами. Стрелка магнитного компаса, например, — индикатор напряженности магнитного поля; осветительная электрическая лампочка — индикатор электрического напряжения в сети; лакмусовая бумага — индикатор активности ионов водорода в растворах.

С помощью индикаторов устанавливается только наличие измеряемой физической величины, интересующего нас свойства материи. В этом отношении индикаторы играют ту же роль, что и органы чувств человека, но значительно расширяют их возможности. Человек, например, слышит в диапазоне частот от 16 до 20 кГц, в то время как техническими средствами обнаруживаются звуковые колебания в диапазоне от инфранизких (доли герца) до ультравысоких (десятки и сотни килогерц) частот. Видят люди в узком оптическом диапазоне электромагнитных волн, а инструментально регистрируются электромагнитные колебания от сверхнизкочастотных радиоволн с частотой, составляющей доли герца, до высокоэнергетического уровня гамма-излучения с частотой порядка  $10^{22}$  Гц. В то же время не созданы еще технические устройства, которые могли бы соперничать с обонянием человека или животных.

Так как индикаторы должны лишь реагировать на проявление свойств окружающего мира, важнейшей их технической характеристикой является порог реагирования (иногда его называют порогом чувствительности). Чем меньше порог реагирования, тем более слабое проявление свойства регистрируется индикатором. Современные индикаторы обладают очень низкими порогами реагирования, лежащими на уровне фоновых помех и собственных шумов аппаратуры. Последние имеют тепловую природу, поэтому для их снижения чувствительные элементы и электронные узлы особо чувствительных индикаторов охлаждают до температуры, близкой к абсолютному нулю. Селекцию (выделение) сигналов на фоне помех осуществляют с помощью специальных фильтров и накопителей. За счет этих и некоторых других мер порог чувствительности радиотелескопов, например, в сантиметровом диапазоне радиоволн доведен до  $10^{-18}$  Вт.

Однако обнаружить физическую величину и измерить ее — далеко не одно и то же. Как уже отмечалось, для измерения необходимо сравнить неизвестный размер с известным и выразить, первый через второй в кратном или дольном отношении. Если физическая величина известного размера есть в наличии, то она непосредственно используется для сравнения. Так измеряют длину линейкой, плоский угол транспортиром, массу с помощью гирь и весов, электрическое сопротивление с помощью магазина сопротивлений. Если же физической величины известного размера в наличии нет, то сравнивается реакция (отклик) прибора на воздействие измеряемой величины с проявившейся ранее реакцией на воздействие той же величины, но известного размера. Так силу электрического тока измеряют амперметром, электрическое напряжение — вольтметром, скорость — спидометром, давление — манометром, термодинамическую температуру — термометром и т. д..

От индикаторов эти измерительные приборы отличаются тем, что обеспечивают сравнение откликов на воздействие двух разных размеров физической величины (известного и неизвестного). При этом предполагается, что соотношение между откликами такое же, как и между сравниваемыми размерами. Для облегчения сравнения отклик на известное воздействие еще на стадии изготовления прибора фиксируют на шкале отсчетного устройства, после чего разбивают шкалу на деления в кратном и дольном отношении. Эта процедура называется *градуировкой шкалы*. При измерениях она позволяет по положению указателя получать результат сравнения непосредственно на шкале отношений.

Все технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики, называются *средствами измерений*. К ним относятся вещественные меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и измерительные системы.

*Вещественные меры* предназначены для воспроизведения физической величины заданного размера, который характеризуется так называемым номинальным значением. При условии, что указывается точность, с которой воспроизводится номинальное значение физической величины, гиря является мерой массы, конденсатор — емкости, кварцевый генератор — частоты электрических колебаний и т. д. Различают однозначные и многозначные меры, а также наборы мер. Например, гиря и измерительный конденсатор постоянной емкости — это однозначные меры, масштабная линейка и конденсатор переменной емкости — многозначные меры, а набор гирь и набор измерительных конденсаторов являются наборами мер. Сравнение с мерой выполняют с помощью специальных технических средств — компараторов. Компараторами служат равноплечие весы, измерительный мост и т. д. Иногда в качестве компаратора выступает человек (например, при измерении длины линейкой).

*Измерительные преобразователи* — это средства измерений, перерабатывающие измерительную информацию в форму, удобную для дальнейшего преобразования, передачи, хранения, обработки, но, как правило, не доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные преобразователи получили очень широкое

распространение. К ним относятся термопары, измерительные усилители, преобразователи давления и многие другие виды измерительных устройств. По месту, занимаемому в измерительной цепи, они делятся на первичные, промежуточные и т. д. (рис. 4). Конструктивно преобразователи являются либо отдельными блоками, либо составной частью средства измерений. Если преобразователи не входят в измерительную цепь и их метрологические свойства не нормированы, то они не относятся к измерительным. Таковы, например, операционный усилитель, делитель напряжения в цепи электропитания, силовой трансформатор и т. п.

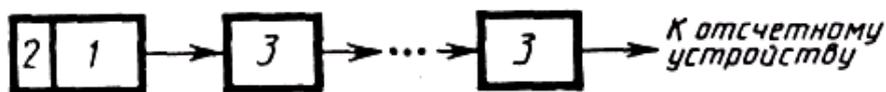


Рис. 4. Измерительная цепь:

- 1 – первичный измерительный преобразователь с чувствительным элементом 2;  
3 – промежуточные измерительные преобразователи

*Измерительный прибор* представляет собой совокупность преобразовательных элементов, образующих измерительную цепь, и отсчетного устройства. В отличие от вещественной меры прибор не воспроизводит известное значение физической величины. Измеряемая величина должна подводиться к нему и воздействовать на его первичный преобразователь.

*Измерительные установки* состоят из функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, собранных в одном месте. В *измерительных системах* эти средства и устройства территориально разобщены и соединены каналами связи. И в установках, и в системах измерительная информация может быть представлена в форме, удобной как для непосредственного восприятия, так и для автоматической обработки, передачи и использования в автоматизированных системах управления.

## **2.3. НОРМИРУЕМЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ**

### **2.3.1. Метрологические характеристики средств измерений**

Качество измерений зависит от многих факторов. В некоторых случаях, однако, требуется знать, какое влияние на результаты измерений и их точность оказывают свойства средств измерений. К таким случаям относятся:

- априорная оценка точности измерений. При ее выполнении наряду с другими факторами должна учитываться точность средств измерений;
- выбор средств измерений, применение которых в известных условиях обеспечит требуемую точность измерений. Эта задача является обратной по отношению к предыдущей;
- сравнение различных типов средств измерений по их метрологическим свойствам как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации;
- использование средств измерений в качестве комплектующих при разработке сложных измерительных систем. Одни и те же требования к измерительной системе могут удовлетворяться при различных сочетаниях свойств средств измерений, используемых в качестве комплектующих. Оптимальное сочетание должно быть результатом технико-экономического обоснования;
- определение точности информационных систем расчетным путем, когда экспериментальное решение этой задачи связано с большими трудностями или вообще невозможно из-за специфики условий работы. Эта же задача возникает при проектировании информационных систем.

**Характеристики свойств средств измерений, оказывающих влияние на результаты измерений и их точность, называются метрологическими характеристиками средств измерений.** Их можно разбить на группы:

1. *Характеристики, предназначенные для определения показаний средств измерений.* К ним относятся: функция преобразования измерительного преобразователя, а также измерительного прибора с неименованной шкалой или со шкалой, градуированной в единицах, отличных от единиц входной величины; значения однозначной или многозначной меры; цена деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры; вид выходного кода, число разрядов кода, цена единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде.

2. *Характеристики качества показаний* - точности и правильности. Точность показания определяется его средним квадратическим отклонением или его аналогом. Правильность обеспечивается внесением поправки, устанавливаемой при метрологической аттестации средства измерений. Эти вопросы подробно рассматриваются в гл. 3.

3. *Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам.* К ним относятся функции влияния и учет изменений метрологических характеристик средств измерений, вызванных изменениями влияющих величин в установленных пределах.

4. *Динамические характеристики* средств измерений, учитывающие их инерционные свойства. Подробно они рассматриваются в разд. 6.1.

5. *Характеристики взаимодействия* с объектами или устройствами на входе и выходе средств измерений. Примерами характеристик этой группы являются входной и выходной импедансы линейного измерительного преобразователя.

6. *Неинформативные параметры* выходного сигнала, обеспечивающие нормальную работу устройств, подключенных к средству измерений.

Например, выходным сигналом преобразователя напряжения в среднюю частоту следования импульсов является последовательность импульсов.

Для определения значения измеряемого напряжения к выходу преобразователя подключается частотомер. Он будет нормально работать только в случае, если амплитуда и форма импульсов преобразователя, хотя они и не несут информации о значении измеряемого напряжения, удовлетворяют определенным требованиям. В противном случае частотомер будет измерять частоту следования этих импульсов неточно, либо вообще не будет работать.

**Метрологические характеристики являются показателями качества и технического уровня всех без исключения средств измерений.** Однако для определения их у конкретного экземпляра средств измерений он должен пройти *метрологическую аттестацию.* **Метрологической аттестацией называется всестороннее исследование средства измерений, выполняемое метрологическим органом для определения метрологических свойств этого средства измерений, и выдача документа с указанием полученных данных.** Это длительная, сложная и дорогая процедура, целесообразность которой в каждом отдельном случае должна быть обоснована. Обычно пользуются сведениями о метрологических характеристиках, содержащимися в нормативно-технических документах на средства измерений. В этих документах приводятся требования (нормы), которым должны удовлетворять метрологические характеристики всех серийно выпускаемых средств измерений данного типа. Соответствие этим требованиям метрологических характеристик каждого отдельного экземпляра средств измерений должно проверяться. **Проверка метрологическим органом или специально на то уполномоченным лицом соответствия метрологических характеристик нормам и установление на этой основе пригодности средств измерений к применению называется поверкой.** Постановлением Совета Министров СССР от 4 апреля 1983 г. № 273 „Об обеспечении единства измерений в стране“ **применение неуполномоченных средств измерений запрещено.**

### 2.3.2. Нормирование метрологических характеристик средств измерений

*Типовые* метрологические характеристики первой группы нормируют как номинальные характеристики средств измерений данного типа. Номинальную функцию преобразования измерительного преобразователя представляют в виде формулы, таблицы, графика. Номинальные значения однозначной или многозначной меры представляют именованными числами.

*Для конкретных экземпляров* средств измерений *нормируются пределы* (граничные характеристики), в которых должна находиться индивидуальная метрологическая характеристика первой группы при предусмотренных условиях применения средства измерений.

Нормальные и рабочие условия применения средств измерений устанавливаются в нормативно-технических документах на средства измерений. *Нормальными* считаются условия, при которых зависимостью метрологических характеристик от изменения значений влияющих величин можно пренебречь. Так, для многих типов средств измерений нормальными условиями являются: температура —  $(293 \pm 5)$  К, относительная влажность -  $(65 \pm 15)$  %, напряжение в сети питания —  $220 \text{ В} \pm 10 \%$ . *Рабочие* условия отличаются от нормальных более широким диапазоном изменения значений влияющих величин.

При нормировании метрологических характеристик второй группы исходят из того, что правильность показаний средств измерений обеспечивается поправкой, точное значение которой для каждого конкретного экземпляра средств измерений неизвестно. Поэтому *устанавливают пределы*,

*в которых должна находиться поправка* у всех средств измерений данного типа. Прибегают также к ситуационному моделированию (см. разд. 3.3.3), нормируют пределы, в которых должны находиться аналоги числовых характеристик ситуационной модели. Точность показаний нормируется указанием предельно допускаемого значения среднего квадратического отклонения (или его оценки). Так как показание и поправка суммируются, то может нормироваться аналог среднего квадратического отклонения композиции закона распределения вероятности показания и ситуационной модели поправки.

Нормированные метрологические характеристики второй группы представляются либо одним числом, либо функцией (формулой, таблицей, графиком) информативного параметра входного или выходного сигнала.

Нормирование метрологических характеристик второй группы может производиться как для нормальных, так и для рабочих условий. В отличие от этого метрологические характеристики третьей группы нормируются только для рабочих условий измерений. В рабочих условиях изменение значений влияющих величин начинает сказываться на точности и правильности показаний. Это учитывается функциями влияния. Для разных экземпляров средств измерений данного типа могут различаться как вид этих функций, так и их параметры. Однако в принципе, для всех экземпляров средств измерений данного типа эти функции должны быть подобны, а их параметры близки. Поэтому нормируются в качестве номинальных некоторые усредненные функции влияния с указанием их параметров. Нормируются также пределы допускаемых отклонений функций влияния у отдельных экземпляров средств измерений данного типа от номинальной. Если функции влияния у различных экземпляров средств измерений данного типа существенно различаются между собой, то нормируются граничные функции влияния.

В нормативно-технических документах номинальная функция влияния, пределы допускаемых отклонений от нее и граничные функции влияния представляются в виде числа, формулы, таблицы или графика. Линейную функцию влияния, проходящую через начало координат, допускается представлять коэффициентом влияния в виде числа. Функции влияния представляют в координатах, у которых начало отсчета по оси ординат совпадает с нормальным значением влияющей величины на оси абсцисс.

Пределы допускаемых изменений метрологических характеристик, вызванных изменениями влияющих величин, устанавливаются в виде границ зоны вокруг значения метрологической характеристики при нормальных условиях.

Аналогично нормируются метрологические характеристики четвертой группы. Устанавливается номинальная динамическая характеристика, пределы допускаемых отклонений от нее и граничные динамические характеристики. Они представляются в виде числа, формулы, таблицы или графика.

**Во всех случаях представление нормированных метрологических характеристик в виде графика допускается только при одновременном представлении их в виде формулы или таблицы.**

Формы представления нормированных метрологических характеристик пятой и шестой групп устанавливаются в нормативно-технических документах на средства измерений конкретных видов и типов.

В зависимости от особенностей использования средств измерений возникает необходимость в том или ином наборе их метрологических характеристик. Так для вещественных мер и цифроаналоговых преобразователей, аналоговых и цифровых измерительных показывающих и регистрирующих приборов, аналоговых и аналого-цифровых измерительных преобразователей нормируются разные наборы метрологических характеристик. Номенклатура нормированных метрологических характеристик в каждом наборе зависит, кроме того, от ответственности измерений и других факторов. Подробно все вопросы нормирования метрологических характеристик средств измерений регламентируются ГОСТ 8.009—84.

### **2.3.3. Классы точности средств измерений**

Учет всех нормируемых метрологических характеристик средств измерений - сложная и трудоемкая процедура, оправданная только при измерениях очень высокой точности, характерных для метрологической практики. В обиходе и на производстве, как правило, такая точность не нужна. Поэтому для средств измерений, используемых в повседневной практике, принято деление по точности на классы. **Классом точности называется обобщенная характеристика всех средств измерений данного типа, обеспечивающая правильность их показаний и устанавливающая оценку снизу точности показаний.** В стандартах на средства измерений конкретного типа устанавливаются требования к метрологическим характеристикам, в совокупности определяющие класс точности средств измерений этого типа. У плоскопараллельных концевых мер длины, например, такими характеристиками являются: пределы допускаемых отклонений от номинальной длины и плоскопараллельности; пределы допускаемого изменения длины в течение года. У мер электродвижущей силы (нормальных элементов) - пределы допускаемой нестабильности ЭДС в течение года.

При малоизменяющихся метрологических характеристиках допускается устанавливать требования, единые, для двух и более классов точности.

Независимо от классов точности нормируют метрологические характеристики, требования к которым целесообразно устанавливать едиными для средств измерений всех классов точности, например, входные или выходные сопротивления.

Классы точности присваиваются типам средств измерений с учетом результатов государственных приемочных испытаний. Средствам измерений с несколькими диапазонами измерений одной и той же физической величины или предназначенным для измерений разных физических величин могут быть присвоены различные классы точности для каждого диапазона или каждой измеряемой величины. Так, амперметр с диапазонами 0-10, 0-20 и 0-50 Л может иметь разные классы точности для отдельных диапазонов; электроизмерительному прибору, предназначенному для измерений напряжения и сопротивления, могут быть присвоены два класса точности: один — как вольтметру, другой — как омметру. Метрологические характеристики средств измерений

должны соответствовать установленным классам точности как при выпуске готовой продукции, так и в процессе эксплуатации.

Обозначения классов точности наносятся на циферблаты, щитки и (корпуса средств измерений, приводятся в нормативно-технических документах. При этом в эксплуатационной документации на средство измерений, содержащей обозначение класса точности, должна быть ссылка на стандарт или технические условия, в которых установлен класс точности для этого типа средств измерений.

Обозначения могут иметь форму заглавных букв латинского алфавита (например, М, С и т. д.) или римских цифр (I, II, III, IV и т. д.) с добавлением условных знаков. Смысл таких обозначений раскрывается в нормативно-технической документации. Если же класс точности обозначается арабскими цифрами с добавлением какого-либо условного знака, то эти цифры непосредственно устанавливают оценку снизу точности показаний средства измерений.

Для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, нулевое значение входного (выходного) сигнала у которых находится на краю или вне диапазона измерений, обозначение класса точности арабской цифрой из ряда (1; 1,5; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6)·10<sup>n</sup>, где  $n = 1, 0, -1, -2$  и т. д., означает, что значение измеряемой величины не отличается от того, что показывает указатель отсчетного устройства, более чем на соответствующее число процентов от верхнего предела измерений.

**Пример 5\*.** Указатель отсчетного устройства вольтметра класса точности 0,5, шкала которого приведена на рис. 5, показывает 124 В. Чему равно измеряемое напряжение?

**Решение.** Для указанного прибора измеряемое напряжение не может отличаться от того, что показывает указатель, больше чем на 1 В. Следовательно, измеряемое напряжение  $123 \text{ В} \leq U \leq 125 \text{ В}$ .

Если при тех же условиях нулевое значение находится внутри диапазона измерений, то значение измеряемой величины не отличается от того, что показывает указатель, больше чем на соответствующее классу точности число процентов от большего из модулей пределов измерений.

**Пример 6.** Указатель отсчетного устройства амперметра класса точности 1,5, шкала которого видна на рис. 6, показывает 4 А. Чему равна измеряемая сила тока?

**Решение.** Для указанного прибора измеряемая сила тока не может отличаться от той, которую показывает указатель, более чем на 0,3 А. Поэтому измеряемая сила тока  $3,7 \text{ А} \leq I \leq 4,3 \text{ А}$ .

У средств измерений с установленным номинальным значением отличие измеряемой величины от той, что показывает указатель, не может превысить соответствующего числа процентов от номинального значения.

---

В примерах 5 ... 9 предполагается, что остальными факторами, влияющими на результат измерения, можно пренебречь.

---

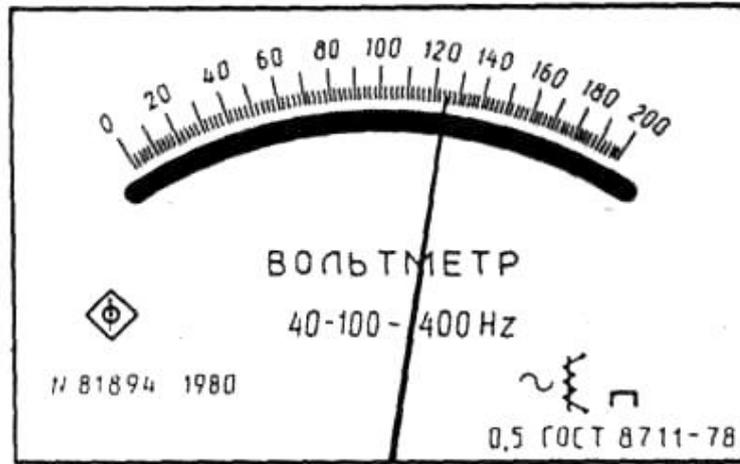


Рис. 5. Лицевая панель вольтметра класса точности 0,5 с равномерной шкалой

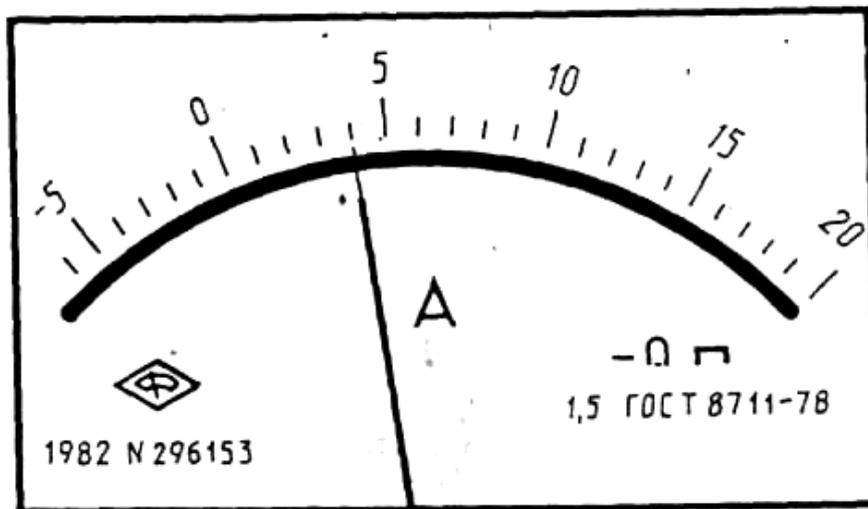


Рис. 6. Лицевая панель амперметра класса точности 1,5 с равномерной шкалой

**Пример 7.** Цифровой частотомер класса точности 2,0 с номинальной частотой 50 Гц, цифровое табло которого показано на рис. 7, показывает 47 Гц. Чему равна измеряемая частота?

**Решение.** У такого прибора измеряемая частота не может отличаться от цифры на табло больше чем на 1 Гц. Следовательно, измеряемая частота  $46\text{ Гц} \leq f \leq 48\text{ Гц}$ .

В других случаях, когда классы точности обозначаются цифрами из приведенного выше ряда, следует обращаться к стандартам на средства измерений этого вида.



Обозначение классов точности цифрами из того же ряда предпочтительных чисел может сопровождаться применением дополнительных условных знаков. Так, например, отметка снизу ( $\surd_{0,5}$ ;  $\surd_{1,6}$ ;  $\surd_{2,5}$  и т. п.) означает, что у измерительных приборов этого типа существенно неравномерной шкалой значение измеряемой величины не может отличаться от того, что показывает указатель отсчетного устройства, больше чем на указанное число процентов от всей длины шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. Заключение цифры в окружность (например, 0,02; 0,4; 1,0; 3,0 и т.д.) означает, что проценты исчисляются непосредственно от значения, которое показывает указатель.

**Пример 8.** Указатель отсчетного устройства мегаомметра класса точности 2,5 неравномерной шкалой, представленной на рис. 8, показывает 40 МОм. Чему равно измеряемое сопротивление?

**Решение.** При таком обозначении класса точности измеряемая величина не может отличаться от значения, которое показывает указатель, более чем на 2,5 %. Поэтому измеряемое сопротивление  $39 \text{ МОм} \leq R \leq 41 \text{ МОм}$ .

Иногда обозначение класса точности дается в виде дроби, например, 0,02/0,01. Это означает, что измеряемая величина не может отличаться от значения  $X$ , показанного указателем, больше чем на  $\left[ c + d \left( \left| \frac{X_k}{X} \right| - 1 \right) \right] \%$ , где  $c$  и  $d$  соответственно числитель и знаменатель в обозначении класса точности, а  $X_k$  — больший (по модулю) из пределов измерений.

**Пример 9.** Указатель отсчетного устройства ампервольтметра класса точности 0,02/0,01 со шкалой, показанной на рис. 9, показывает — 25 А. Чему равна измеряемая сила тока?

**Решение.** Измеряемая сила тока отличается от той, что показывает указатель, не больше чем на  $\left[ 0,02 + 0,01 \left( \frac{50}{-25} - 1 \right) \right] \% = 0,3\%$ . Таким образом, измеряемая сила тока  $24,992 \leq I \leq 25,008 \text{ А}$ .

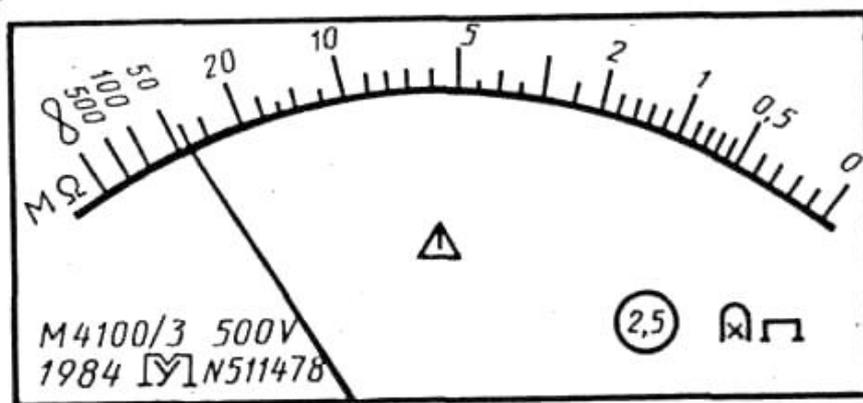


Рис. 8. Лицевая панель мегаомметра класса точности (2,5) с неравномерной шкалой

Необходимо ещё раз подчеркнуть, что класс точности является обобщенной

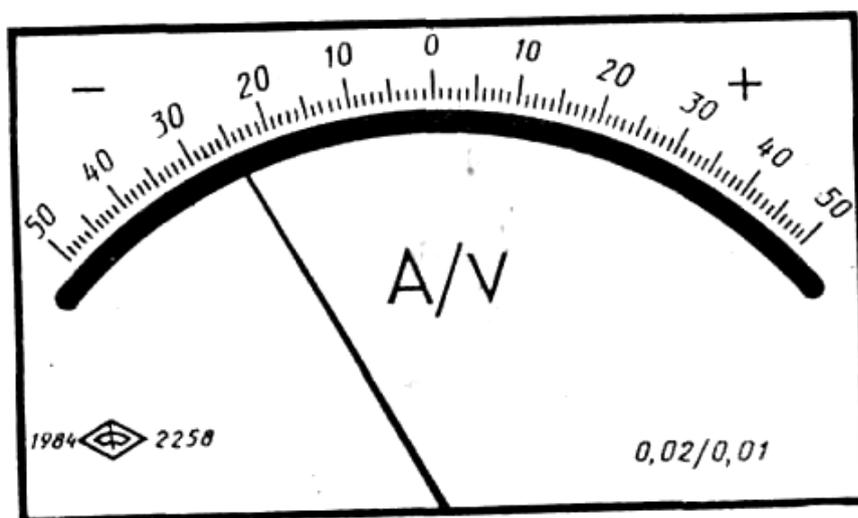


Рис. 9. Лицевая панель ампервольтметра класса точности 0,02/0,01 с равномерной шкалой

характеристикой средств измерений. Значение его позволяет определить не точность конкретного измерения, а лишь указать пределы, в которых находится значение измеряемой величины. Между тем, точность конкретного измерения во многих случаях представляет известный интерес.

#### 2.4. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В процессе эксплуатации любого средства измерений может возникнуть неисправность или поломка, называемые отказом. Внезапные отказы, вследствие их случайности, невозможно прогнозировать. Для большого числа серийно выпускаемых

электрических и радиотехнических элементов средств измерений (транзисторов, резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и т. д.) имеются специальные таблицы, в которых указывается *интенсивность  $\lambda$  их отказов* — количество отказов в единицу времени. Если справочные данные отсутствуют, то их можно получить экспериментально в результате испытания элементов на надежность. Для этого  $N$  однотипным элементам задаются обычные режимы их работы и фиксируется число отказов  $L$  за определенный промежуток времени  $\Delta t$ . Интенсивность отказов элемента вычисляется в этом случае по формуле

$$\lambda = \frac{L}{N \cdot \Delta t}.$$

Зная интенсивность отказов каждого элемента  $\lambda_i$ , можно определить интенсивность отказов средства измерений, состоящего из этих элементов:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i m_i$$

где  $n$  — количество типов элементов, входящих в состав средства измерений;  $m_i$  — количество элементов  $i$ -го типа.

*Вероятность безотказной работы* средства измерений

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) dt},$$

а среднее время безотказной работы, называемое *наработкой на отказ*,

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Интенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$ , вероятность безотказной работы  $P(t)$  и наработка на отказ  $T_{cp}$  называются показателями надежности средств измерений. Так как случайный отказ может произойти в любой момент независимо от того, сколько времени проработало средство измерений, то интенсивность внезапных отказов от времени не зависит:

$$\lambda_{\Sigma}(t) = \lambda_{\Sigma} = const.$$

Поэтому, когда речь идет о внезапных отказах, вероятность безотказной работы и наработка на отказ определяются более простыми выражениями:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t};$$

$$T_{cp} = \frac{L}{\lambda_{\Sigma}}$$

**Пример 10.** Электроизмерительный преобразователь состоит из четырех транзисторов с интенсивностью отказов  $\lambda_T = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ , восьми резисторов с  $\lambda_p = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$  и шести керамических сопротивлений с  $\lambda_c = 3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ . Определить вероятность внезапного отказа этого средства измерений за 1000 ч. работы.

**Решение.** 1. Интенсивность отказов электроизмерительного преобразователя

$$\lambda_{\Sigma} = 4 \cdot 10^{-7} + 6 \cdot 3 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 10^{-5} = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

2. Вероятность безотказной работы за 1000 ч

$$P(1000 \text{ ч}) = e^{-0,1} = 0,905.$$

3. Вероятность отказа за это же время

$$P_{\text{отк}}(1000 \text{ ч}) = 1 - P(1000 \text{ ч}) = 0,095.$$

По характеру своего проявления внезапные отказы являются *явными*. Они сравнительно легко обнаруживаются, и после выяснения их причин возникшие неисправности устраняются. Сложнее обстоит дело с диагностикой так называемых постепенных отказов, которые заключаются в том, что с течением времени метрологические характеристики перестают соответствовать установленным для них

нормам, и средство измерений вследствие этого становится непригодным для применения по назначению. Такие отказы являются скрытыми и могут быть обнаружены только при очередной поверке средства измерений. Поэтому межповерочные интервалы устанавливаются исходя из требования обеспечения метрологической надежности средств измерений.

**Метрологическая надежность** — это свойство средств измерений сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение определенного времени при нормальных режимах и рабочих условиях эксплуатации. *Метрологическим отказом* называется выход метрологической характеристики средства измерений за пределы нормы. Метрологические отказы являются результатом старения и износа элементов и узлов средств измерений, так что их интенсивность с течением времени возрастает. Межповерочный интервал определяют по формуле

$$T_{МП} = \frac{\ln(1 - P_{М.ОТК})}{\ln P_M(t)} t,$$

где  $P_M(t)$  — вероятность безотказной в метрологическом смысле работы, а  $P_{М.ОТК}$  — вероятность метрологического отказа за время между поверками, выбираемая из следующих установок:

Для средств измерений, используемых	Значение допускаемой вероятности метрологического отказа
При технических измерениях	0,2...0,1
При передачи информации о размере единиц	0,15...0,05
При особо важных, ответственных измерениях	0,05...0,01

В процессе эксплуатации может производиться корректировка межповерочного интервала. Если в партии из  $N$  поверенных однотипных средств измерений  $m$  штук оказываются забракованными по результатам поверки, то по графикам на рис. 10 определяется необходимость корректировки межповерочного интервала. При попадании точки с координатами  $(N, m)$  в область (А) межповерочный интервал следует уменьшить, при попадании в область (Б) — оставить без изменения, при попадании в область (В) — увеличить. Откорректированный межповерочный интервал определяется ) формуле:

$$T_{МП}^* = \frac{\ln(1 - P_{М.ОТК})}{\ln(1 - P_{М.ОТК}^*)} \cdot T_{МП},$$

где эмпирическая частота метрологических отказов:

$$P_{М.ОТК}^* = \frac{m}{N} + 2 \sqrt{\frac{m}{N^2} \left(1 - \frac{m}{N}\right)}.$$

При  $m = 0$

$$P_{М.ОТК}^* = \frac{1}{2(1 + N)}.$$

**Пример 11.** 1. По техническим условиям вероятность безотказной работы прибора, предназначенного для технических измерений, за 2000 ч составляет 0,95. Каким должен быть первично установленный межповерочный интервал?

**Решение.** Выбрав  $P_{М.ОТК} = 0,15$  (см. рис. 10, б), получим

$$T_{МП}^* = \frac{\ln(1 - 0,15)}{\ln 0,95} \cdot 2000 = 6316ч \approx 9мес.$$

2. По истечении 9 мес. эксплуатации из 85 поверенных приборов два забракованы по результатам поверки. Должен ли быть откорректирован межповерочный интервал?

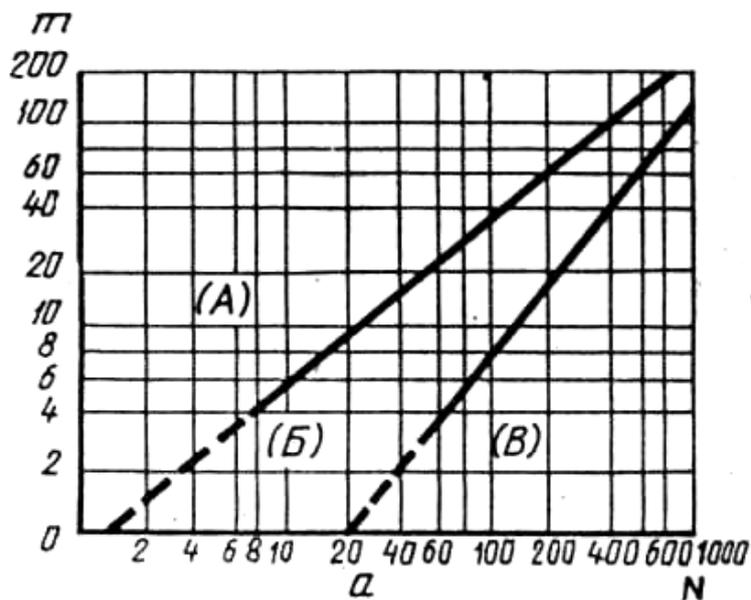
**Решение.** По графику на рис. 10, б получается, что межповерочный интервал должен быть увеличен. Так как

$$P_{M.OTK}^* = \frac{2}{85} + 2\sqrt{\frac{2}{7225}\left(1 - \frac{2}{85}\right)} = 0.0563,$$

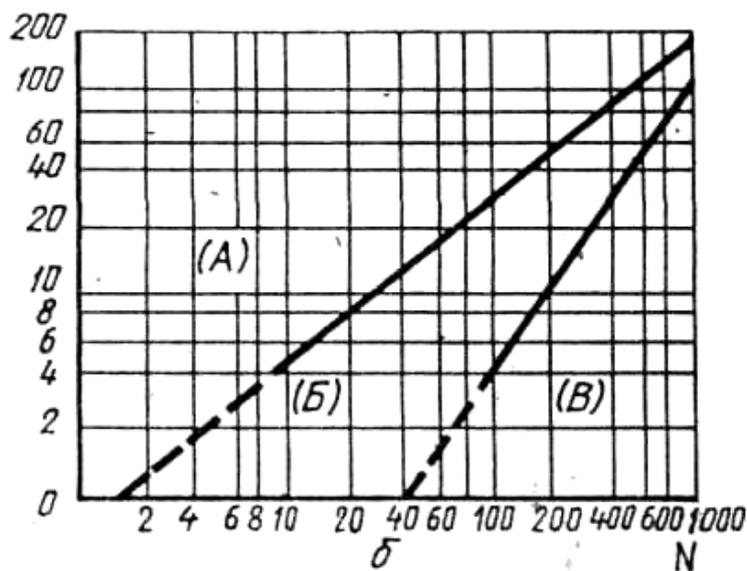
то межповерочный интервал должен быть установлен равным

$$T_{МП}^* = \frac{\ln(1-0.15)}{\ln(1-0.0563)} \cdot 9 = 25 \text{ мес.}$$

$$P_{\text{м.отк}} = 0,2$$



$$P_{\text{м.отк}} = 0,15$$



$$P_{\text{м.отк}} = 0,1$$

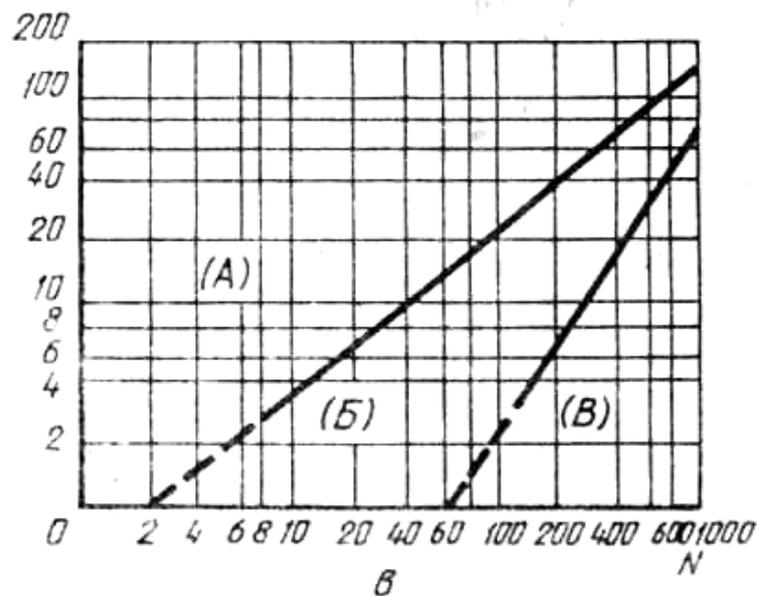


Рис. 10. Графики для определения необходимости корректировки межверочного интервала

## ГЛАВА 3

### ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 3.1. ОСНОВНОЙ ПОСТУЛАТ МЕТРОЛОГИИ

Как уже отмечалось в начале предыдущей главы, любое измерение по шкале отношений предполагает сравнение неизвестного размера с известным и выражение первого через второй в кратном или дольном отношении. При измерении физических величин в качестве известного размера естественно выбрать единицу СИ. Тогда процедура сравнения неизвестного значения с известным и выражения первого через второе в кратном или дольном отношении запишется следующим образом:  $\frac{Q}{[Q]}$ . В

квалиметрии сравнение производится обычно со значением базового показателя качества или с представлением о наивысшем качестве, которое оценивается максимальным количеством баллов.

На практике непосредственно неизвестный размер не всегда может быть представлен для сравнения с единицей. Жидкости, например, и сыпучие вещества предъявляются на взвешивание в таре. Очень маленькие линейные размеры могут быть измерены только после увеличения их микроскопом или другим прибором. В первом случае процедура сравнения выглядит как определение отношения  $\frac{Q+v}{[Q]}$ , во втором —

$\frac{\varphi \cdot Q}{[Q]}$ , где в рассматриваемых примерах  $v$  - масса тары, а  $\varphi$  - коэффициент увеличения.

Само сравнение в свою очередь происходит под влиянием множества случайных и неслучайных, аддитивных (от латинского *additivus* - прибавляемый) и мультипликативных (от латинского *multiplico* — умножаю) факторов, точный учет которых невозможен, а результат совместного воздействия непредсказуем. Ограничиваясь для простоты аддитивными воздействиями, совместное влияние которых можно учесть случайным слагаемым  $\eta$ , получим следующее уравнение измерения по шкале отношений:

$$\frac{Q+v}{[Q]} + \eta = \chi. \quad (2)$$

Оно выражает некоторое действие, процедуру сравнения в реальных условиях, которая, собственно, и является измерением. Главной особенностью измерительной процедуры является то, что при ее повторении из-за случайного характера  $\eta$  отсчет по шкале отношений  $\chi$  получается все время разным. Это фундаментальное положение является законом природы. На основании громадного опыта практических измерений, накопленного к настоящему времени, может быть сформулировано следующее утверждение, называемое *основным постулатом метрологии*: отсчет является случайным числом. На этом постулате, который легко поддается проверке и остается справедливым в любых областях и видах измерений, основана вся метрология.

Уравнение (2) является математической моделью измерения по шкале отношений. Отсчет в ней не может быть представлен одним числом. Его можно лишь описать словами или математическими символами, представить массивом экспериментальных данных, таблично, графически, аналитическим выражением и т. п. Проиллюстрируем это двумя примерами.

**Пример 12.** При  $n$ -кратном независимом измерении одной и той же физической величины постоянного размера на световом табло цифрового измерительного прибора в случайном порядке появлялись числа  $x_i$ , представленные в первой графе табл. 7.

Таблица 7.

$x_i$	$m_i$	$P(x_i)$	$F(x_i)$
90,10	1	$\frac{1}{100} = 0,01$	0,01
90,11	2	$\frac{2}{100} = 0,02$	$0,01 + 0,02 = 0,03$
90,12	5	$\frac{5}{100} = 0,05$	$0,03 + 0,05 = 0,08$
90,13	10	$\frac{10}{100} = 0,10$	$0,08 + 0,1 = 0,18$
90,14	20	$\frac{20}{100} = 0,20$	$0,18 + 0,2 = 0,38$
90,15	24	$\frac{24}{100} = 0,24$	$0,38 + 0,24 = 0,62$
90,16	19	$\frac{19}{100} = 0,19$	$0,62 + 0,19 = 0,81$
90,17	11	$\frac{11}{100} = 0,11$	$0,81 + 0,11 = 0,92$
90,18	5	$\frac{5}{100} = 0,05$	$0,92 + 0,05 = 0,97$
90,19	2	$\frac{2}{100} = 0,02$	$0,97 + 0,02 = 0,99$
90,20	1	$\frac{1}{100} = 0,01$	$0,99 + 0,01 = 1,00$

Каждое  $i$ -е число появилось  $m_i$  раз. Что представляет отсчёт при таком измерении?

**Решение.** Ни одно из чисел в первой графе таблицы, взятое в отдельности, не является отсчетом. Отсчет характеризуется всей совокупностью этих чисел с учетом того, как часто они появлялись. Принимая частоту  $\frac{m_i}{n}$  — каждого  $i$ -го числа за вероятность его появления  $P(x_i)$  заполним третью графу в табл. 7. В совокупности с первой она даст нам распределение вероятности отсчета, представленное в виде таблицы. Его можно представить графически так, как это показано на рис. 11. А можно поступить по-другому. Проставим в четвертой графе табл. 7 вероятности того, что на табло показывающего измерительного прибора появится число меньше или равное тому, которое значится в первой графе. В совокупности с первой графой это даст нам представленную таблично функцию распределения вероятности отсчета. Графически она выглядит так, как это показано на рис. 12.

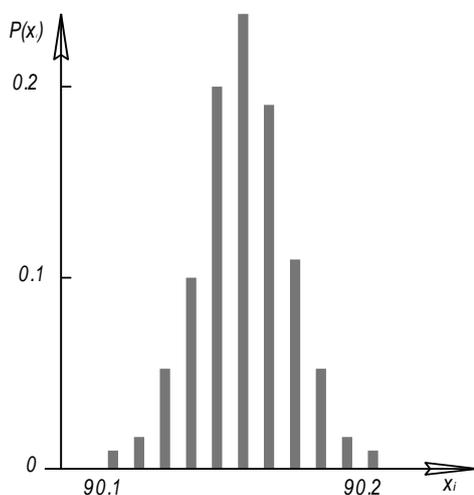


Рис. 11. Распределение вероятности отсчёта у цифрового измерительного прибора.

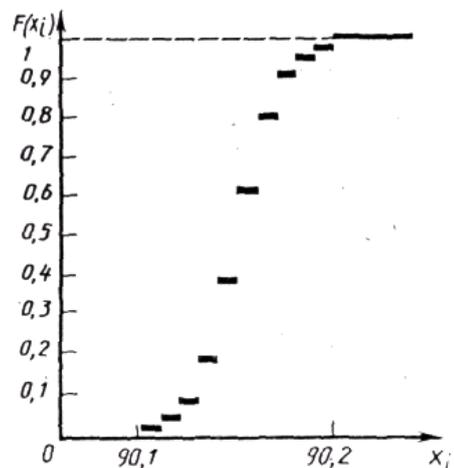


Рис. 12. Функция распределения вероятности отсчета у цифрового измерительного прибора

Как распределение вероятности  $P(x_i)$ , так и функция распределения вероятности  $F(x_i)$  являются исчерпывающим описанием отсчета у цифровых измерительных приборов любой конструкции.

**Пример 13.** При  $n$ -кратном независимом измерении одной и той же физической величины постоянного размера аналоговым измерительным прибором указатель отсчётного устройства в случайной последовательности по  $m$  раз останавливался на каждом из делений шкалы:

Деление шкалы	$m$	Деление шкалы	$m$
0,10...0,11	1	0,15...0,16	23
0,11...0,12	2	0,16...0,17	20
0,12...0,13	6	0,17...0,18	10
0,13...0,14	11	0,18...0,19	5
0,14...0,15	19	0,19...0,20	3

Чему равен отсчет при таком измерении?

**Решение.** Принимая деления шкалы за основания, построим из них прямоугольники с высотами, равными отношению частостей  $\frac{m}{n}$  к цене деления шкалы  $\Delta x$  (в данном случае безразмерной). Получившаяся фигура, показанная на рис. 13, а, называется гистограммой. Соединив теперь отрезками прямых середины верхних сторон прямоугольников, как это показано на рисунке, получим ломаную линию, называемую полигоном.

Как гистограмма, так и полигон являются исчерпывающим эмпирическим описанием отсчета у аналоговых измерительных приборов любой конструкции.

Если бы была возможность увеличивать  $n$ , то в пределе при  $n \rightarrow \infty$  и полигон перешел бы в кривую плотности распределения вероятности отсчета  $p(x)$ , показанную на рис. 13, б.

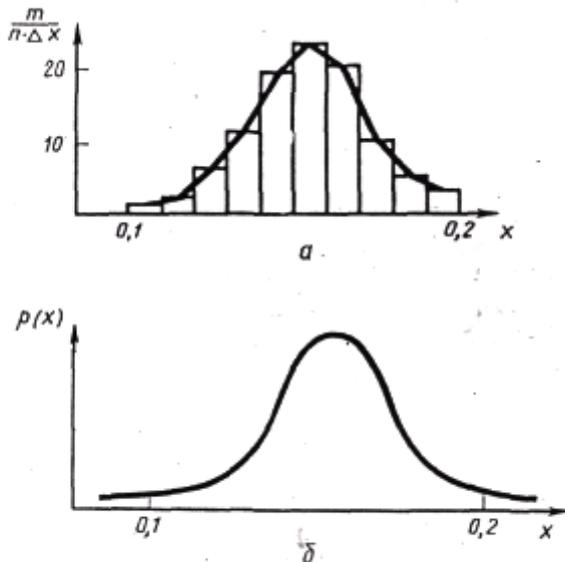


Рис. 13. Гистограмма, полигон и плотность распределения вероятности отсчета у аналогового измерительного прибора

Здесь так же, как в примере 12, можно поступить по-другому. Подсчитывая, сколько раз указатель отсчётного устройства останавливался левее каждой отметки шкалы, откладывая над этой отметкой вдоль оси ординат отношение числа таких отклонений к их общему числу  $n$  и соединяя полученные точки отрезками прямых, получим ломаную

линию, показанную на рис. 14, а и называемую кумулятивной кривой. Как гистограмма и полигон, она исчерпывающе характеризует отсчет у аналоговых измерительных приборов. Если бы опять-таки была возможность увеличивать  $n$ , то при  $n \rightarrow \infty$  и  $\Delta x \rightarrow 0$  кумулятивная кривая перешла бы в график функции распределения вероятности отсчета  $F(x)$ , показанной на том же рис. 14, б.

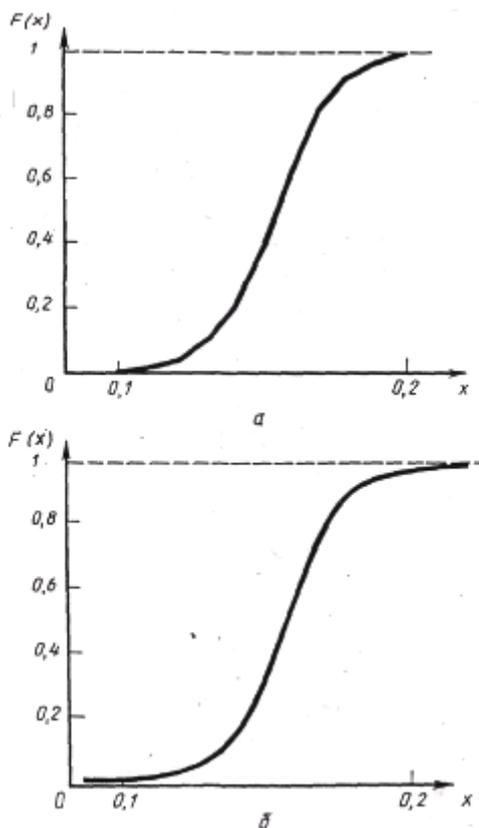


Рис. 14. Кумулятивная кривая (а) и функция распределения вероятности отсчета (б) у аналогового измерительного прибора.

**Плотность распределения вероятности  $p(x)$  и функция распределения плотности  $F(x)$  служат в теории вероятностей моделями эмпирических законов распределения, получаемых из экспериментальных данных методом математической статистики.**

После выполнения измерительной процедуры в уравнении (2) остаются два неизвестных:  $Q$  и  $\eta$ . Неслучайное значение  $\mathcal{S}$  либо должно быть известно до измерения, либо устанавливается посредством дополнительных исследований. Слагаемое  $\eta$ , являющееся случайным, не может быть известно в принципе. Поэтому **определить значение измеряемой величины**

$$Q = x[Q] - \eta[Q] - \mathcal{S} \quad (3)$$

**невозможно.**

Равенство (3) соблюдается точно, благодаря тому, что при повторных выполнениях измерительной процедуры случайное изменение второго слагаемого в правой части всякий раз влечет за собой точно такое же изменение первого. О таких слагаемых говорят, что они *коррелированы* (взаимосвязаны) между собой. Разность между коррелированными значениями двух случайных величин неслучайна, но в данном случае неизвестна. Поэтому строгого решения уравнение (3) не имеет.

На практике удовлетворяются приближенным решением. Для этого используются результаты специального исследования, называемого *метрологической аттестацией средства измерений и методики выполнения измерений*. В ходе этого исследования приближенно определяется среднее значение второго слагаемого в правой части формулы (3):

$$H \approx \eta[Q]$$

Среднее значение не является случайным. Поэтому после замены случайного второго слагаемого в правой части уравнения (3) неслучайным значением  $H$  получается приближенное решение

$$Q \approx x[Q] - H - \vartheta \quad (4)$$

в котором **результат измерения  $Q$  является случайным значением измеряемой величины.**

Первое слагаемое в правой части выражения (4) называется *показанием*

$$X = x[Q]$$

Оно подчиняется тому же закону распределения вероятности, что и отсчет, но отличается от последнего тем, что

$$\dim X = \dim Q.$$

Два последних слагаемых в правой части формулы (4) представляют суммарную *поправку*

$$\theta = -H - \vartheta,$$

которая может включать и большее количество составляющих в зависимости от числа учитываемых факторов. Поправка не является случайной, но может изменяться от измерения к измерению по определенному закону. Поэтому в каждое отдельное значение показания  $X_i$  может вноситься своя поправка  $\theta_i$ .

Результат измерений  $Q$  подчиняется тому же закону распределения вероятности, что показание и отсчет, но смещенному по оси абсцисс на значение суммарной поправки. Отдельное его значение

$$Q_i = X_i + \theta_i, \quad (5)$$

получаемое всякий раз после выполнения измерительной процедуры, называется *результатом однократного измерения*. Среднее арифметическое значение результата измерения, полученное при многократном независимом измерении одной и той же величины постоянного размера

$$\hat{Q}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (6)$$

называется *результатом многократного измерения*.

Уравнение измерения интервала записывается аналогично уравнению (2):

$$\frac{\Delta Q + \vartheta}{[Q]} + \eta = x, \quad (7)$$

где  $\Delta Q$  — значение разности между двумя размерами физической величины. Анализ этого уравнения не отличается от анализа уравнения (2).

Математической моделью измерения по шкале порядка служит неравенство

$$Q_1 + \eta_1 \leq Q_2 + \eta_2, \quad (8)$$

описывающее процедуру сравнения двух размеров одной и той же измеряемой величины. Результатом сравнения в этом случае является не отсчет, а решение о том, какой из размеров больше, либо они одинаковы. Не исключена возможность как правильных, так и неправильных решений. Следовательно, **результат сравнения двух размеров по шкале порядка является случайным**, что соответствует основному постулату метрологии.

### **3.2. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ И ИХ ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Математический аппарат теории вероятностей широко используется в метрологии. Рассмотрим поэтому некоторые свойства законов распределения вероятности, являющихся моделями эмпирических законов распределения, получаемых из экспериментальных данных методами математической статистики.

- Прежде всего отметим, что функция  $F(x)$  определяет вероятность того, что отдельный результат, полученный по формуле (2) или (7), будет меньше ее аргумента.
- Так как вероятность не может быть отрицательной, то

$$F(x) \geq 0$$

Чем больше  $x$ , тем больше вероятность того, что ни один результат, полученный по формуле (2) или (7) не превысит этого значения, т. е.  $F(x)$  — неубывающая функция:

$$F(x_2) \geq F(x_1), \text{ если } x_2 \geq x_1$$

При изменении  $x$  от  $-\infty$  до  $+\infty$   $F(x)$  меняется от 0 до 1.

- Результат, полученный по формуле (2) или (7), меньше некоторого  $x_1$ , с вероятностью  $F(x_1)$  и меньше другого  $x_2 > x_1$  с вероятностью  $F(x_2)$ . Следовательно, вероятность того, что результат сравнения по формуле (2) или (7) окажется в интервале  $[x_1; x_2]$ , равна разности значений  $F(x)$  на границах этого интервала:

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = F(x_2) - F(x_1).$$

У аналогового измерительного прибора  $x_1$  и  $x_2$  можно выбирать сколько угодно близкими друг к другу. При  $x_1 \rightarrow x_2$   $F(x_2) - F(x_1) \rightarrow 0$ . Поэтому аналоговых измерительных приборов вероятность того, что указатель отсчетного устройства остановится на какой-либо конкретной точке шкалы, равна 0. Отсюда следует, что

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = P\{x_1 \leq x \leq x_2\},$$

т.е. крайние точки можно включать, а можно и не включать в пределы интервала.

- Плотность распределения вероятности  $p(x)$  связана с функцией распределения вероятности  $F(x)$  соотношением

$$p(x) = F'(x)$$

Поэтому  $p(x)$  называют иногда *дифференциальной функцией распределения вероятности*.

В свою очередь  $F(x)$  может быть получена интегрированием  $p(x)$  в соответствующих пределах:

$$F(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} p(x) dx.$$

Геометрическая интерпретация этой операции показана на рис. 15, а  $F(x_0)$  иногда называют *интегральной функцией распределения вероятности*.

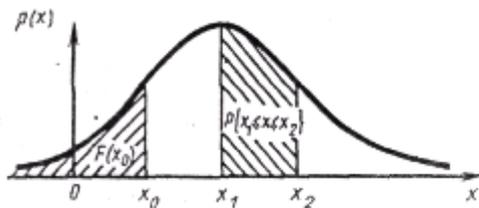


Рис. 15. Дифференциальная функция распределения вероятности

- Так как  $F(x)$  — неубывающая функция, то ее производная не может быть отрицательной:

$$p(x) \geq 0.$$

- Вероятность того, что отдельный результат, полученный по формуле (2) или (7), окажется в интервале  $[x_1; x_2]$ , равна площади, ограниченной графиком функции  $p(x)$ , осью абсцисс и перпендикулярами к ней на границах интервала (см. рис. 15):

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx.$$

- При расширении интервала до бесконечности рассматриваемое событие становится достоверным. Поэтому площадь, ограниченная графиком функции  $p(x)$  и осью

абсцисс, равна 1:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1.$$

Описание отсчета или результата измерения с помощью законов распределения вероятности является наиболее полным, но неудобным. Во многих случаях ограничиваются приближенным описанием закона распределения вероятности с помощью его *числовых характеристик* или *моментов*. Все они представляют собой некоторые средние значения, причем, если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, моменты называются *начальными*, а если от центра закона распределения - *центральными*.

Общее правило образования начальных моментов:

$$\bar{x}^r = \int_{-\infty}^{+\infty} x^r p(x) dx$$

где  $r$  - номер момента. **Важнейшим начальным моментом является первый** — *среднее значение*

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x) dx$$

характеризующее математическое ожидание отсчета при бесконечном повторении процедуры измерения по формуле (2) или (7). Иногда математическое ожидание удобнее обозначать символом  $M(x)$ . Свойства математического ожидания:

1) математическое ожидание неслучайного числа равно самому этому числу:

$$M(a) = a, \text{ где } a = const;$$

2) постоянный множитель можно выносить за знак математического ожидания:

$$M(ax) = aM(x);$$

3) математическое ожидание алгебраической суммы случайных чисел равно алгебраической сумме их математических ожиданий:

$$M(x + y - z) = M(x) + M(y) - M(z);$$

4) математическое ожидание произведения независимых случайных чисел равно произведению их математических ожиданий:

$$M(x \cdot y \cdot z) = M(x) \cdot M(y) \cdot M(z);$$

5) математическое ожидание отклонения случайного числа от его математического ожидания равно нулю:

$$M[x - M(x)] = 0;$$

**Мерой рассеяния** отдельных результатов, полученных по формуле (2) или (7), около их среднего значения **служит второй центральный момент**. Общее правило образования центральных моментов записывается следующим образом:

$$\overline{(x - \bar{x})^r} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^r p(x) dx,$$

откуда сразу видно, что первый центральный момент тождественно равен нулю:

$$\overline{x - \bar{x}} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x}) p(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x p(x) dx - \bar{x} \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = \bar{x} - \bar{x} \cdot 1 = 0$$

Второй центральный момент называется *дисперсией* и обозначается  $\sigma_x^2$ :

$$\sigma_x^2 = \overline{(x - \bar{x})^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx,$$

Иногда дисперсию удобнее обозначать символом  $D(x)$ . Свойства дисперсии:

1) дисперсия неслучайного числа равна нулю:

$$D(a) = 0, \text{ где } a = \text{const};$$

2) постоянный множитель можно выносить за знак дисперсии, возводя его при этом в квадрат:

$$D(ax) = a^2 D(x);$$

3) дисперсия алгебраической суммы двух случайных чисел

$$D(x \pm y) = D(x) + D(y) \pm 2\rho\sqrt{D(x)D(y)};$$

где коэффициент корреляции

$$\rho = \frac{M\{[x - M(x)][y - M(y)]\}}{\sqrt{D(x)D(y)}}$$

4) дисперсия алгебраической суммы независимых случайных чисел равна арифметической сумме их дисперсий:

$$D(x + y + z) = D(x) + D(y) + D(z);$$

5) дисперсия случайного числа равна разности между математическим ожиданием ее квадрата и квадратом математического ожидания:

$$D(x) = M(x^2) - M^2(x).$$

Чем больше дисперсия, тем значительнее рассеяние результатов, полученных по формулам (2), (7) относительно  $\bar{x}$ . Это наглядно видно на рис. 16, где представлены кривые плотности одного и того же закона распределения вероятности отсчета при различных дисперсиях.

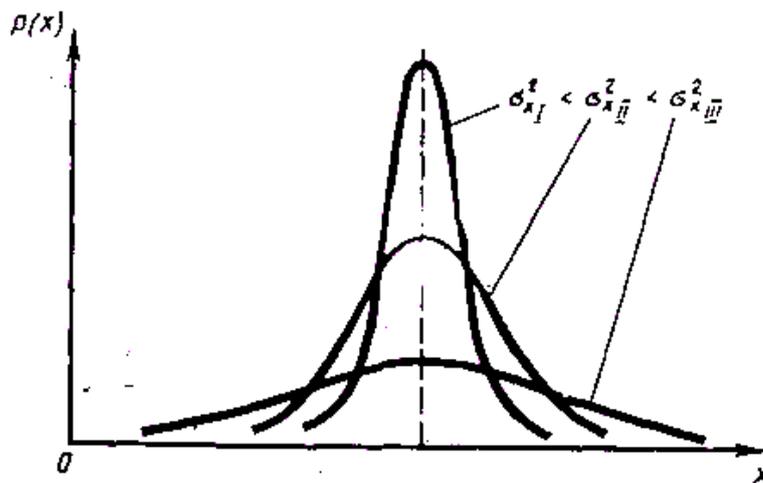


Рис. 16. Графики плотности распределения вероятности отсчета при различной дисперсии

В метрологии в качестве меры рассеяния чаще используют *среднее квадратическое отклонение*

$$\sigma_x = +\sqrt{\sigma_x^2}.$$

Находит применение и третий центральный момент

$$\overline{(x - \bar{x})^3} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^3 p(x) dx,$$

Мерой несимметричности распределения вероятности служит *асимметрия*

$$\mu = \frac{\overline{(x - \bar{x})^3}}{\sigma_x^3}$$

которая может быть положительной и отрицательной. Для симметричных распределений вероятности отсчета асимметрия равна нулю. На рис. 17 в качестве иллюстрации приведены примеры симметричного и несимметричных законов распределения вероятности с разными математическими ожиданиями.

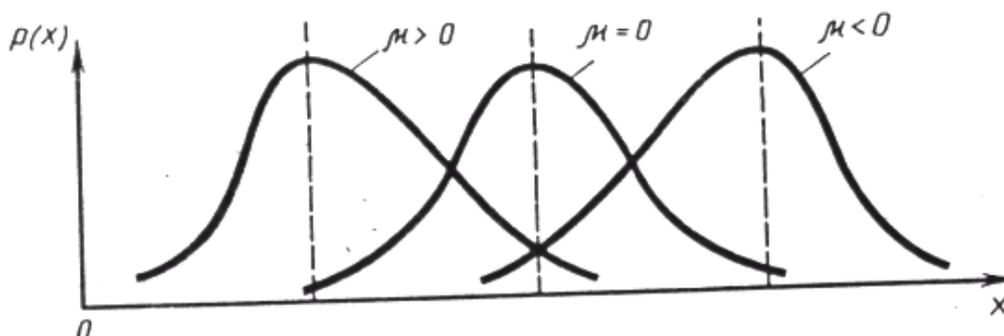


Рис. 17. Симметричное и несимметричные распределения плотности вероятности отсчета

Четвертый центральный момент используется для оценки заостренности дифференциальной функции распределения вероятности. Мерой заостренности служит *эксцесс*

$$v = \frac{\overline{(X - \bar{x})^4}}{\sigma_x^4}$$

равный трем у закона распределения вероятности отсчета, кривая плотности вероятности которого имеет колоколообразную форму. Кривые с более острой вершиной имеют больший эксцесс, с более полой — меньший вплоть до отрицательного (рис. 18).

Мерой неопределенности случайного числа является *энтропия*

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx$$

среднее значение логарифма плотности вероятности, взятое со знаком минус.

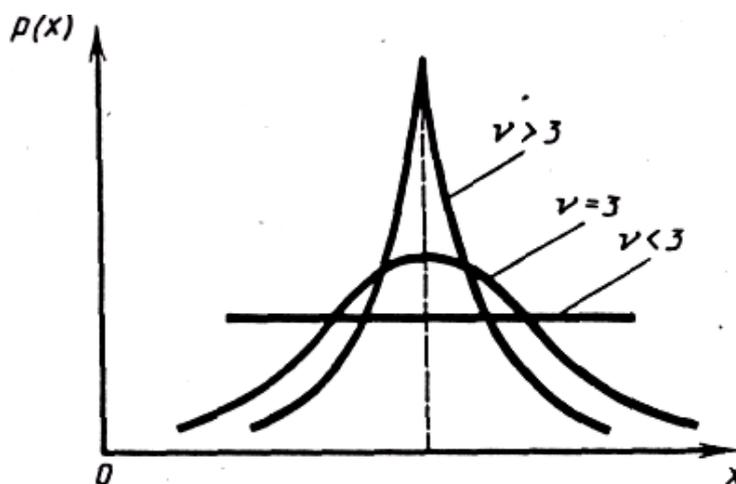


Рис. 18. Дифференциальные функции распределения вероятности отсчета различной степени заостренности

Так как  $p(x) < 1$ , то энтропия всегда положительна. Она равна нулю у неслучайного числа и максимальна при равномерной плотности распределения вероятности.

**Модели эмпирических законов распределения вероятности отсчета — дифференциальная и интегральная функции распределения вероятности, как и все без исключения моменты, обладают важным качеством: будучи характеристиками случайного числа, сами они не являются случайными.** Описание с их помощью отсчета или результата измерения было бы очень удобным, если бы эти характеристики можно было получить. Но на практике это невозможно, так как измерительная процедура по формулам (2), (7) не может быть повторена бесконечное число раз. Поэтому и в дальнейшем они будут использоваться только в качестве моделей.

### 3.3. ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Получение отсчета (либо принятие решения) — основная измерительная процедура. Однако, как отмечалось в разд. 2.1, во внимание должно приниматься еще множество факторов, учет которых представляет иногда довольно сложную задачу. При подготовке и проведении высокоточных измерений в метрологической практике учитывается влияние:

- объекта измерения;
- субъекта (эксперта или экспериментатора);
- способа измерения;
- средства измерений;
- условий измерения.

Объект измерений должен быть достаточно изучен. Например, при измерении диаметра вала должна быть уверенность в том, что он круглый. В противном случае может быть нужно измерять эллиптичность его сечения. При измерении площадей сельскохозяйственных угодий пренебрегают кривизной Земли, чего нельзя делать при измерении поверхности океанов. Измеряя плотность вещества, нужно быть уверенным в отсутствии инородных включений. При измерении периода обращения Земли вокруг Солнца можно заранее пренебречь его неравномерностью, а можно, наоборот, сделать ее объектом исследования. Таким образом, перед измерением необходимо представить себе модель исследуемого объекта, которая в дальнейшем, по мере поступления измерительной информации, может изменяться и уточняться. Чем полнее модель соответствует измеряемому объекту или исследуемому явлению, тем точнее измерительный эксперимент.

Эксперт или экспериментатор вносят в процесс измерения элемент субъективизма,

который по возможности должен быть уменьшен. Он зависит от квалификации измерителя, его психофизиологического состояния, соблюдения эргономических требований при измерениях и многого другого. Все эти факторы заслуживают внимания. К измерениям допускаются лица, прошедшие специальную подготовку, имеющие соответствующие знания, умения и практические навыки. В ответственных случаях их действия должны быть строго регламентированы. Особенно большую роль играет профессиональная подготовка экспертов при эвристических и органолептических измерениях. Важное значение имеет также настроение человека, его собранность, внимание, режим труда и отдыха. Наибольшая работоспособность наблюдается в утренние и дневные часы — с 8 до 12 ч и с 14 до 17 ч. В период с 12 до 14 ч и в вечерние часы отмечается, как правило, снижение работоспособности, а в ночную смену она минимальна. Начало смены — период вхождения в работу - длится утром примерно от 30 мин до 1,5 ч. Затем работоспособность стабилизируется на 1,5 . . 2,5 ч. К середине дня начинается спад. После обеденного перерыва работоспособность снова повышается, но наивысшего уровня уже не достигает. В конце рабочего дня наступает спад, обусловленный утомлением.

Санитарно-гигиенические условия труда включают такие факторы, как микроклимат, всевозможные излучения, чистоту воздуха, освещение, производственный шум, вибрацию и т. д.

Острота зрения и длительность ясного видения в значительной степени зависят от условий освещения. Люди с нормальным зрением способны различать мелкие предметы лишь при освещенности 50. . 70 лк. Максимальная острота зрения наступает при освещенности 600. . 1000 лк. Освещение может быть как естественным, так и искусственным. Наиболее благоприятным является естественное освещение, производительность труда при котором на 10 % выше, чем при искусственном. Дневной свет должен быть рассеянным и не иметь бликов. Во избежание действия солнечных лучей на окнах лаборатории следует повесить белые шторы. Искусственное освещение помещений должно быть люминесцентным рассеянным. Источники света необходимо заключать в арматуру с матовым или молочным «стеклом». В зависимости от особенностей трудового процесса применяются три системы освещения: общее (для освещения всего помещения) , местное (непосредственно на рабочем месте) и комбинированное, сочетающее общее и местное. Общее освещение допустимо в помещениях, где проводят механические измерения невысокой точности, когда направление света не играет особенной роли. Комбинированное освещение требуется при высокоточных измерениях, когда для различения мелких деталей свет должен падать под определенным углом. Одно лишь местное освещение нормами не допускается, так как оно приводит к неравномерному распределению яркости в поле зрения наблюдателя. Это резко снижает производительность труда, увеличивает число ошибок в работе, приводит к быстрому утомлению. В оптимальных же условиях время ясного видения (с хорошей остротой) при непрерывной работе составляет 3 ч. Оно зависит от освещенности и сокращается при 50 лк на 57 %, при 75 лк - на 50 %, при 100 лк - на 26 %, при 200 лк - на 15 %.

Измерительные приборы размещают в поле зрения оператора в зоне, ограниченной углами  $\pm 30^\circ$  от оси в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Отсчетные устройства располагают перпендикулярно линии зрения оператора. Оптимальное расстояние от шкалы до глаз оператора определяют по формуле

$$l = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha}$$

где  $h$  — высота знака, подлежащего считыванию,  $\alpha$  — угол, равный 40. . 50'. Для различения отметки шкалы с угловым размером 30.. 40' необходимо время 0,03 с, а с размером 3. . 6' — до 0,3 с. По контрастности отметки шкал должны на порядок отличаться от фона. По данным профессора М.Ф. Маликова в зависимости от индивидуальных особенностей операторов, связанных с их реакцией, измерительными

навыками и т. п., неточность глазомерного отсчета по шкалам измерительных приборов достигает  $\pm 0,1$  деления шкалы.

Уровень шума в лабораториях не должен превышать 40.. 45 дБ. Повышению производительности труда способствует функциональная музыка, снижающая утомляемость, повышающая работоспособность, улучшающая эмоциональное состояние людей, имеющая эстетическое значение. Рекомендуемая продолжительность звучания музыки за смену 1,5. . 2,5 ч. В музыкальные передачи должны включаться мелодичные, ненавязчивые популярные мелодии с легким и ясным музыкально-ритмическим рисунком, со спокойным темпом.

Очень часто измерение одной и той же величины разными способами дает совершенно непохожие результаты. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. В преодолении таких недостатков, в непрерывном совершенствовании измерений состоит искусство экспериментатора. Здесь нет и не может быть готовых рецептов, хотя со временем выработались определенные приемы, знание которых полезно. Рассмотрим некоторые из них.

### 3.3.1. Исключение влияющих факторов

Способ замещения состоит в замене измеряемой величин равновеликой ей мерой, значение которой известно. Реакция средств измерений при этом должна остаться такой же. Например, при взвешивании груза на равноплечих весах его масса считается равной массе уравнивающих гирь. Однако это справедливо только при строгом равенстве плеч, так как равновесие коромысла определяется не равенством сравниваемых масс, а равенством произведений силы на плечо. На практике плечи строго не равны между собой. Поэтому груз уравнивается не равным ему по массе набором гирь. При использовании способа замещения тот же груз уравнивается любой тарой, а потом заменяется набором гирь, при котором сохраняется равновесие коромысла. Очевидно, что масса груза в таком случае равна массе гирь, а влияние неравноплечести весов оказывается исключенным.

Точно также, включив измеряемое сопротивление в мостовую схему и уравновесив ее, заменяют его затем магазином сопротивлений и, подбирая сопротивление магазина, восстанавливают равновесие моста. Высокая точность измерения сопротивлений этим способом обеспечивается за счет исключения остаточной неуравновешенности мостовой схемы, взаимного влияния ее элементов, утечек и других паразитных факторов.

Компенсация влияющего фактора по знак осуществляется следующим образом. Измерение проводится дважды так, чтобы влияющий фактор оказывал противоположное действие, и берется среднее арифметическое двух опытов. Например, механические узлы некоторых средств измерений имеют люфты, влияние которых компенсируется, если измерительный механизм подводится к измеряемой величине сначала со стороны больших, а затем меньших значений (или наоборот) Можно скомпенсировать влияние постоянных магнитных полей, паразитных ТЭДС и т. п.

Если влияющий фактор приводит не к изменению измеряемого значения на некоторую величину, а к умножению его на некоторый коэффициент, то вместо компенсации по знаку применяется способ противопоставления. Рассмотрим его на примере взвешивания на равноплечих весах.

Условие равновесия коромысла записывается следующим образом

$$ml_1 = m_r l_2,$$

где  $m$  — масса взвешиваемого груза;  $m_r$  — масса уравнивающих гирь, а  $l_1$  и  $l_2$  — соответствующие плечи коромысла. Таким образом, влияние неравноплечести весов проявляется в наличии множителя  $\frac{l_2}{l_1}$ :

$$m = \frac{l_2}{l_1} m_{\Gamma}.$$

Если повторить взвешивание, поместив груз на чашу весов, на которой ранее были гири, получим

$$m'_{\Gamma} l_1 = m l_2,$$

где  $m'_{\Gamma} \neq m$ . Разделив первое условие равновесия на второе, найдем, что

$$\frac{m}{m'_{\Gamma}} = \frac{m_{\Gamma}}{m},$$

откуда

$$m = \sqrt{m_{\Gamma} \cdot m'_{\Gamma}}$$

или, с достаточной степенью точности,

$$m = \frac{m_{\Gamma} + m'_{\Gamma}}{2},$$

т. е. влияние неравноплечести весов оказывается исключенным.

Для исключения прогрессирующего влияния какого-либо фактора, являющегося линейной функцией времени (например, постепенного прогрева аппаратуры, падения напряжения в цепи питания, вызванного разрядом аккумуляторов или электрических батарей, потери эмиссии катодов радиоламп и т. п.) применяется способ симметричных измерений. Он заключается в том, что в течение некоторого интервала времени выполняется несколько измерений одного и того же размера, и затем берется полусумма отдельных результатов, симметричных по времени относительно середины интервала. Иногда для этого несколько измерений повторяют в обратной последовательности, и тогда аналогия с методом компенсации влияющего фактора по знаку становится очевидной, с той лишь разницей, что компенсации в середине временного интервала не происходит.

### 3.3.2. Внесение поправок

Если измерения не удастся организовать так, чтобы исключить или скомпенсировать влияющие факторы, то в показания средств измерений вносятся поправки. Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих характер поправок, обусловленных особенностями измерений.

**Пример 14.** Согласно общей теории относительности свет, проходя вблизи тел большой массы, отклоняется под влиянием их гравитационного поля от своего первоначального направления. В результате в угловые координаты некоторых звезд, полученные посредством измерений, приходится вносить так называемые релятивистские поправки. Их значения определяются расчетным путем. Правильность расчетов можно проверить экспериментально. Для этого измеряют, например, отклонение луча света Солнцем. На фоне Солнца звезды не видны, поэтому измерения проводят во время полного солнечного затмения. Схема наблюдений показана на рис.19.

Так как свет от звезды 1 отклоняется Солнцем, она видна в точке  $I'$ , смещенной в направлении звезды 2. Впервые это явление наблюдал Эддингтон 29 мая 1919 г. во время полного солнечного затмения. Угловое смещение  $1,75''$ , измеренное Эддингтоном, совпало с расчетным значением релятивистской поправки, взятой с обратным знаком.

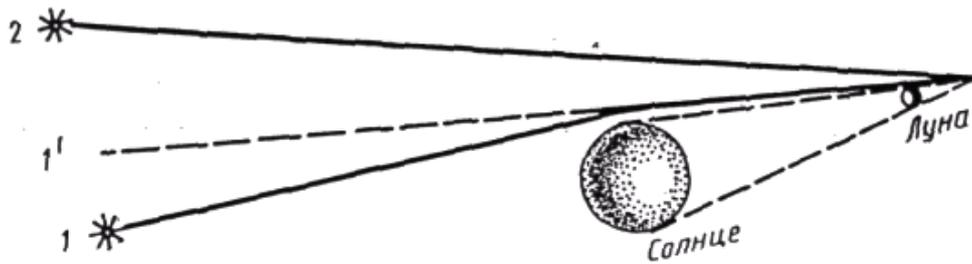


Рис. 19. Изменение направления распространения света при прохождении его луча вблизи Солнца

**Пример 15.** Координаты северного магнитного полюса, расположенного в Северо-Американском архипелаге (примерно  $74,8^\circ$  северной широты и  $99,6^\circ$  западной долготы) и южного магнитного полюса в Антарктиде (примерно  $67,5^\circ$  южной широты и  $140^\circ$  восточной долготы) не совпадают с географическими полюсами Земли. Поэтому не совпадают между собой истинные (географические) и магнитные меридианы. Угол  $d$  в плоскости горизонта между истинным и магнитным меридианами называется магнитным склонением. Он может иметь значение от 0 до  $\pi$  радиан и отсчитывается, как показано на рис. 20, от северной части истинного меридиана в восточном направлении со знаком плюс, или в западном - со знаком минус. Если курс корабля определяется по магнитному компасу, то к углу между линией курса и направлением на северный магнитный полюс добавляется поправка, равная магнитному склонению, взятому со своим знаком.

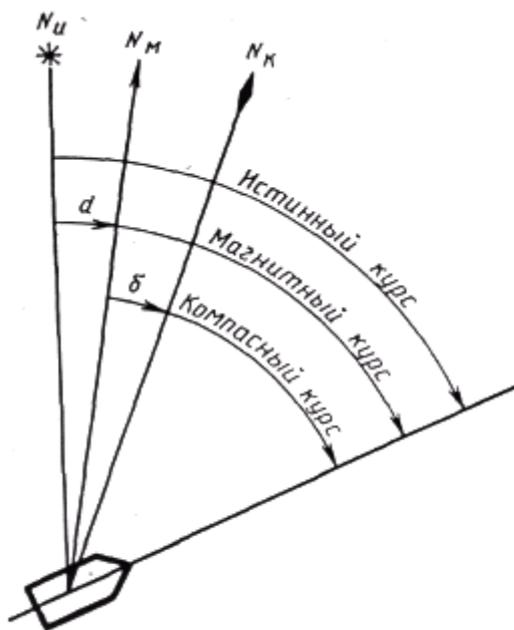


Рис. 20. Определение курса корабля по магнитному компасу

Магнитные полюса перемещаются вокруг географических, вызывая так называемые вековые изменения магнитного поля Земли и, соответственно, магнитного склонения. Период вековых изменений магнитного склонения достигает нескольких сотен лет, а амплитуда доходит до  $1/6$  рад. На морских навигационных картах приводится магнитное склонение на определенный год и его последующее ежегодное увеличение или уменьшение по абсолютной величине. По этим данным и рассчитывается поправка, закономерно изменяющаяся с течением времени.

**Пример 16.** Мощность подземных ядерных взрывов находится по амplitудам прямых и поверхностных сейсмических волн (см. рис. 21). Магнитудой называется отношение логарифма амплитуды сейсмической волны к расстоянию до места ее возбуждения. Сама по себе магнитуда не определяет мощности взрыва. Откалибровать ее как характеристику мощности ядерного заряда можно только по

экспериментальным данным.

На рис. 22 приведены калибровочные линии, построенные по точкам, соответствующим подземным взрывам известной мощности, проводившимся в СССР, США и Алжире. Поглощение и затухание прямых волн сильнее, чем поверхностных, и зависит от температуры на глубине от 25 до 150 км под полигоном. При нанесении соответствующих точек на рис. 22 учтено, что испытательный полигон в Неваде расположен в районе, где за последние несколько миллионов лет произошли геологические изменения, сопровождавшиеся деформацией и нагреванием пород. Поэтому прямые сейсмические волны сжатия от подземных взрывов в штате Невада затухают сильнее, а магнитуды их меньше, чем у прямых сейсмических волн от взрывов в местах, не подвергавшихся геологически недавнему подогреву. Если непосредственно использовать соотношение между магнитудой и мощностью взрыва в штате Невада для оценки мощности ядерных взрывов на территории Советского Союза или в других регионах с малым затуханием, то результаты измерений окажутся завышенными в 2.. 4 раза. До 1986 г. при определении экспертами правительства США мощности советских ядерных взрывов эта поправка не учитывалась. Так создавался и поддерживался миф о военном превосходстве СССР в области стратегических ядерных вооружений.

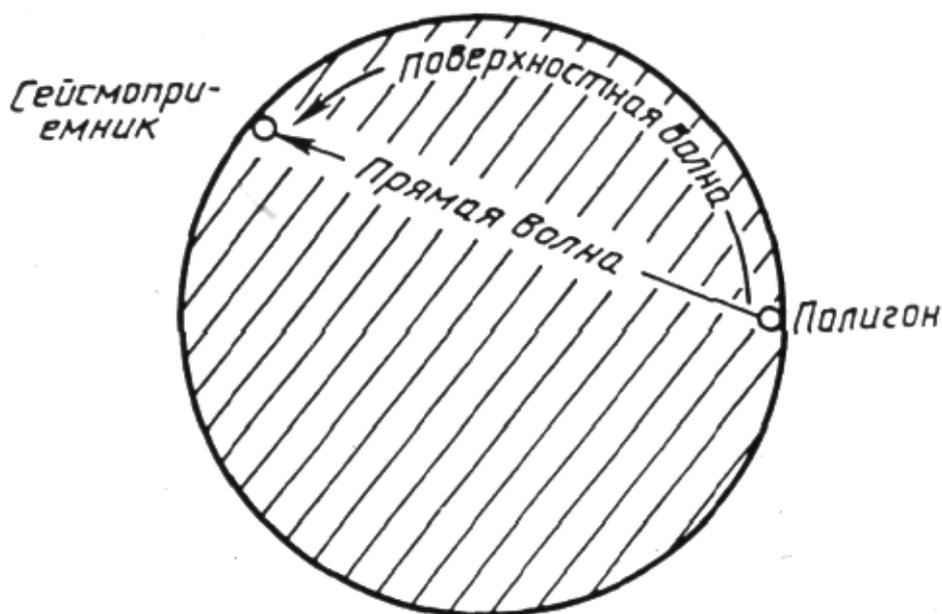


Рис. 21. Распространение сейсмических волн при подземном ядерном взрыве

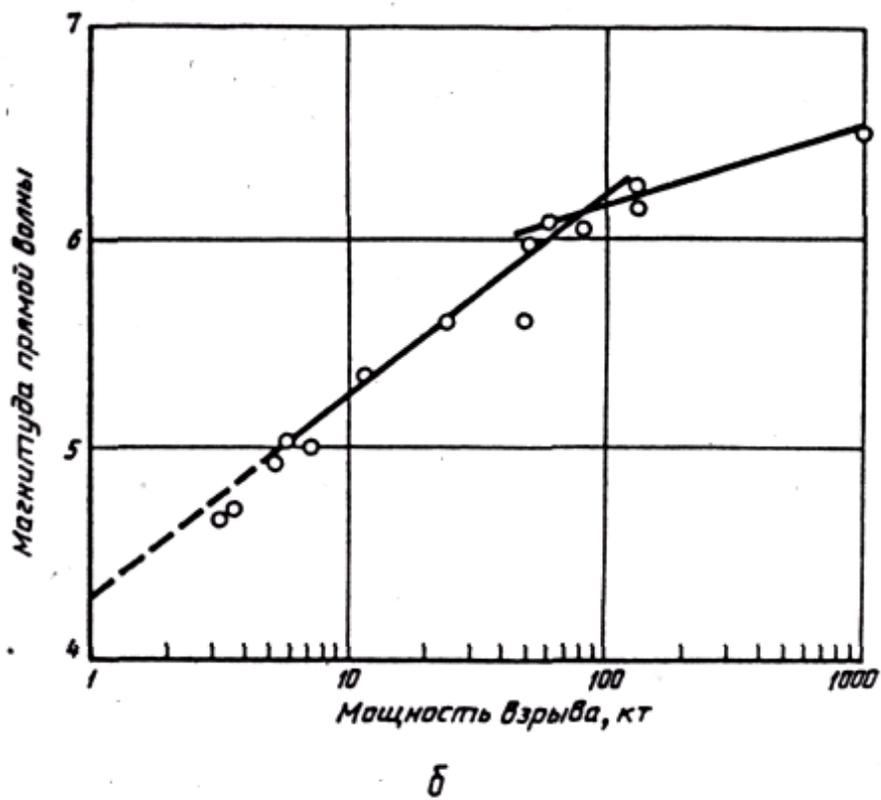
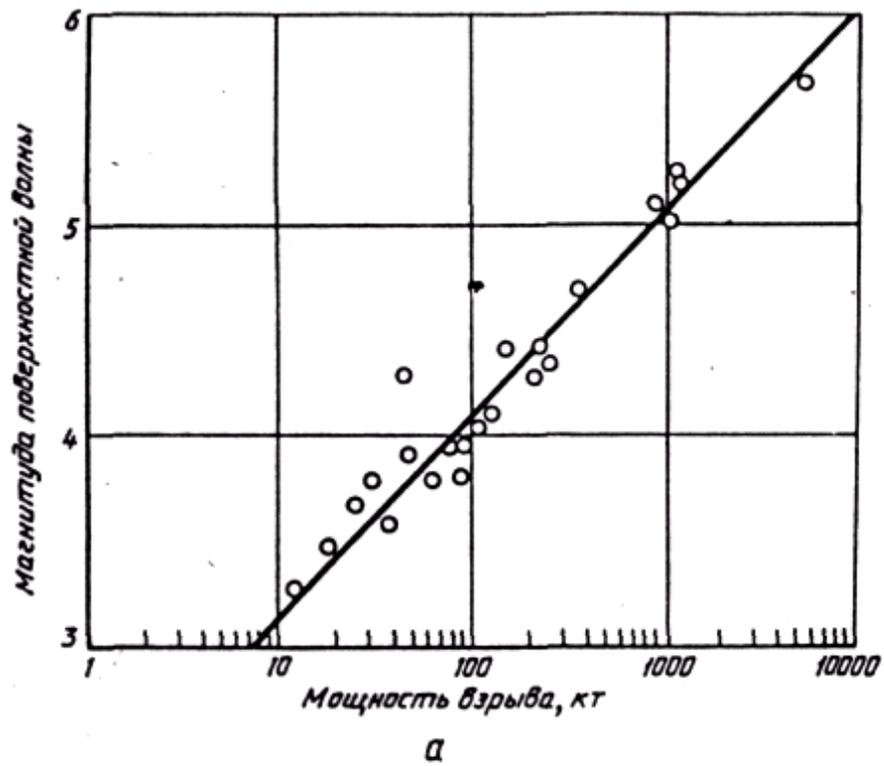


Рис. 22. Магнитуды сейсмических волн при подземных ядерных взрывах

Пример 17. При измерении ЭДС вольтметром внутреннее сопротивление

источника питания  $R_i$ , обычно не учитывается. Между тем, показание вольтметра  $U$  связано с измеряемой ЭДС соотношением

$$U = \frac{R}{R_i + R} E,$$

где  $R$  - внутреннее сопротивление вольтметра. Таким образом, даже при простейшем измерении вольтметром ЭДС его показание должно умножаться на поправочный множитель  $\frac{R_i + R}{R}$ , определяемый расчетным путем.

**Пример 18.** По измеренным значениям электрического тока, протекающего через сопротивление, и падению напряжения на нем требуется рассчитать значение этого сопротивления.

На рис. 23 показаны два возможных варианта включения измерительных приборов. В первом случае из показания амперметра нужно вычесть ток, протекающий через вольтметр (см. рис. 23, а). При большом значении сопротивления  $R$ , соизмеримом с внутренним сопротивлением вольтметра или даже превышающем его, эта поправка значительна.

Во втором случае из показания вольтметра нужно вычесть падение напряжения на амперметре (см. рис. 23, б). Эта поправка значительна при небольших значениях  $R$ , меньших внутреннего сопротивления амперметра или соизмеримых с ним.

На практике схемы, показанные на рис. 23, а и 23, б, применяют соответственно при небольших и больших значениях  $R$ , когда указанными поправками можно пренебречь.

Из рассмотренных примеров видно, что поправки могут быть аддитивными и мультипликативными (так называемые поправочные множители), постоянными и закономерно изменяющимися с течением времени существенными и несущественными, которыми можно пренебречь.

Они могут определяться теоретически и экспериментально, представлять собой отдельные числа или функции, задаваемые таблично, графически или с помощью аналитических выражений.

Влияние средства измерений, на измеряемую величину во многих случаях проявляется как возмущающий фактор. Включение электроизмерительных приборов приводит к перераспределению токов и напряжений в электрических цепях и тем самым оказывает влияние на измеряемые величины. Ртутный термометр, опущенный в пробирку с охлажденной жидкостью, подогревает ее и показывает не первоначальную температуру жидкости, а температуру, при которой устанавливается термодинамическое равновесие. Магнитная стрелка возмущает магнитное поле и т. д. Если возмущающим действием средства измерений пренебречь нельзя, учет его нередко превращается в сложную самостоятельную задачу.

Другим влияющим фактором, который нужно учитывать, является инерционность средств измерений. При измерении быстропеременных процессов многие из них не успевают реагировать на изменение входного сигнала, в результате чего выходной сигнал оказывается искаженным по сравнению с входным. Подробно этот вопрос рассматривается в разд. 6.1.

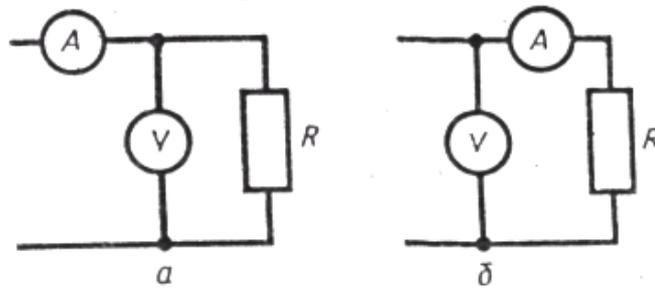


Рис. 23. Возможные схемы включения вольтметра и амперметра для определения значения сопротивления  $R$  расчетным путем

Некоторые средства измерений дают постоянно завышенные или постоянно заниженные показания. Это может быть следствием дефекта при их изготовлении, некоторой нелинейности преобразования, которое считается линейным, и многих других причин. Такие особенности средств измерений выявляются при их аттестации - всестороннем метрологическом исследовании, в процессе которого их показания при измерении одной и той же физической величины сравниваются с показаниями более высоко точного средства измерений. По итогам аттестации устанавливается поправка, которую нужно вносить в показания средства измерений. Эта поправка также может быть аддитивной и мультипликативной, числом или функцией, задаваться графиком, таблицей или формулой.

К числу влияющих факторов относятся также условия измерений. Сюда входят температура окружающей среды, влажность, атмосферное давление, электрические и магнитные поля, напряжение в сети питания, тряска, вибрация и многое другое. О том, какую роль могут играть условия измерений, говорит следующий случай.

**Пример 19.** При выполнении тренировочного полета 27 марта 1968 г. самолет УТИ МИГ-15, пилотируемый Героями Советского Союза Ю.А. Гагариным и В.С. Серегиним, попал в вихревой след другого реактивного самолета и перешел в штопор. В плотной облачности (8. . .10 баллов) с нижней границей на высоте 400. . .600 м летчики ориентировались только по приборам, показания которых в таких условиях носят неустойчивый характер. Кроме того, работа приемника воздушного давления на нерасчетных режимах, запаздывание сигналов в проводке к баровысотомеру и т. д. привели к завышению в показаниях высоты на 200. . .300 м. Полагая запас высоты достаточным, летчики выводили самолет из пикирования, не прибегая к катапультированию, пока это было еще возможно. После выхода из облачности при угле пикирования  $70. . .90^\circ$  запаса времени для катапультирования оказалось уже недостаточно. Для спасения не хватило примерно 2 с, 250.. .300 м высоты.

Влияние внешних факторов, к которым относятся условия измерений, учитывается теми же способами, которые были рассмотрены выше.

**Пример 20.** В магнитном поле Земли корабельная сталь намагничивается, и вокруг корабля создается собственное магнитное поле. Под его влиянием магнитный компас указывает направление, отличающееся от направления на северный магнитный полюс. Угол  $\delta$  в плоскости горизонта между магнитным и компасным меридианами называется девиацией магнитного компаса. Девиация, как показано на рис. 20, отсчитывается от северной части магнитного меридиана в восточном направлении со знаком плюс, а в западном - со знаком минус и может принимать значения от 0 до  $\pi$  радиан. Периодически ее уничтожают с помощью специальных магнитов - компенсаторов и железа, но так как девиация зависит от курса корабля и географической широты его места, то полностью уничтожить ее для всех условий невозможно. Остаточную девиацию на разных курсах

определяют экспериментально, сравнивая компасные направления с известными. Таблица девиации входит в «Справочные таблицы штурмана». По ней находят поправку, которая при определении курса корабля по магнитному компасу алгебраически суммируется с магнитным склонением.

### 3.3.3. Ситуационное моделирование

В разд. 3.1 решение (4) уравнения измерения (2) получилось приближенным из-за неточного знания поправки. Ситуации, в которых по какой-либо причине не хватает нужной количественной информации, часто встречаются в метрологии. Для математического описания таких ситуаций используются ситуационные модели.

Предположим, например, что неизвестно значение  $Q$  некоторой физической величины  $Q$ . Требуется представить эту ситуацию математической моделью.

Если какие-либо значения  $Q$  более вероятны, чем другие, это должно быть принято во внимание. Тогда подбирается соответствующий закон распределения вероятности  $Q$  на интервале возможных значений. Если же на этом интервале  $Q$  с одинаковой вероятностью может иметь любое значение, то закон распределения вероятности  $Q$  принимается равномерным.

Выбранный закон распределения вероятности  $Q$  является, математической моделью ситуации, состоящей в том, что значение  $Q$  неизвестно. Эта модель не является стохастической, так как  $Q$  - неслучайное значение, и статистические закономерности здесь не проявляются. Чтобы подчеркнуть это, у ситуационных моделей величину, аналогичную дисперсии, обозначают через  $u_Q^2$ .

На рис. 24 представлена графически математическая модель ситуации, состоящей в том, что значение  $Q$  с одинаковой вероятностью может быть любым на интервале от  $-Q_m$  до  $Q_m$ . Так как площадь, ограниченная осью абсцисс и графиком плотности распределения вероятности должна равняться единице, то

$$2Q_m \cdot p(Q) = 1.$$

Отсюда

$$p(Q) = \frac{1}{2Q_m}.$$

Числовые характеристики этого закона распределения вероятности:

среднее значение

$$\bar{Q} = \int_{-\infty}^{\infty} Q \cdot p(Q) dQ = \frac{1}{2Q_m} \int_{-Q_m}^{Q_m} Q dQ = \frac{Q^2}{4Q_m} \Big|_{-Q_m}^{Q_m} = 0,$$

что видно непосредственно из рисунка;

аналог дисперсии

$$u_Q^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (Q - \bar{Q})^2 p(Q) dQ = \frac{1}{2Q_m} \int_{-Q_m}^{Q_m} Q^2 dQ = \frac{Q^3}{6Q_m} \Big|_{-Q_m}^{Q_m} = \frac{Q_m^2}{3}.$$

Вместо аналога дисперсии часто используется аналог среднего квадратического отклонения

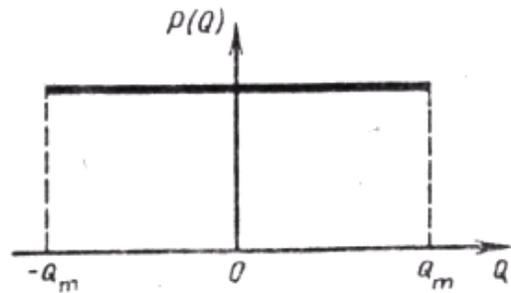
$$u_Q = +\sqrt{u_Q^2} = \frac{Q_m}{\sqrt{3}}.$$

**Пример 21.** В рабочих условиях измерений температура на 1000 К превышает нормальную. Средством измерений является металлическая линейка из тугоплавкого сплава. Чему равна температурная поправка при измерениях длины в таких условиях?

Решение. Зависимость длины линейки от температуры имеет вид:

$$l = l_H [1 + \alpha(t - t_H)]$$

Рис. 24. Центрированный закон равномерной плотности распределения вероятности



где  $l_H$  и  $t_H$  — длина линейки и температура, соответствующие нормальным условиям, а  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала, из которого изготовлена линейка. Результат сравнения неизвестного значения  $L$  с  $l$  при  $t - t_H = 1000K$  в  $(1 + 1000\alpha)$  раз меньше результата сравнения  $L$  с  $l_H$ .

Поэтому поправочный множитель (мультипликативная температурная поправка)

$$\chi = 1 + 1000\alpha.$$

Коэффициент линейного расширения сплава  $\alpha$  обычно неизвестен. По справочным данным он может быть в пределах от  $10^{-6} K^{-1}$  до  $10^{-5} K^{-1}$ . Отсутствие точных сведений об  $\alpha$  можно учесть с помощью ситуационной модели, согласно которой  $\chi$  с одинаковой вероятностью может иметь любое значение в пределах интервала  $1,001 \leq k \leq 1,01$ .  $1,001 < k \ll 1,01$ . Графическое изображение ситуационной модели дано на рис. 25, а. Числовые характеристики этого закона распределения вероятности

$$\bar{\chi} = 1,0055; u_{\chi} = 2,6 \cdot 10^{-3}.$$

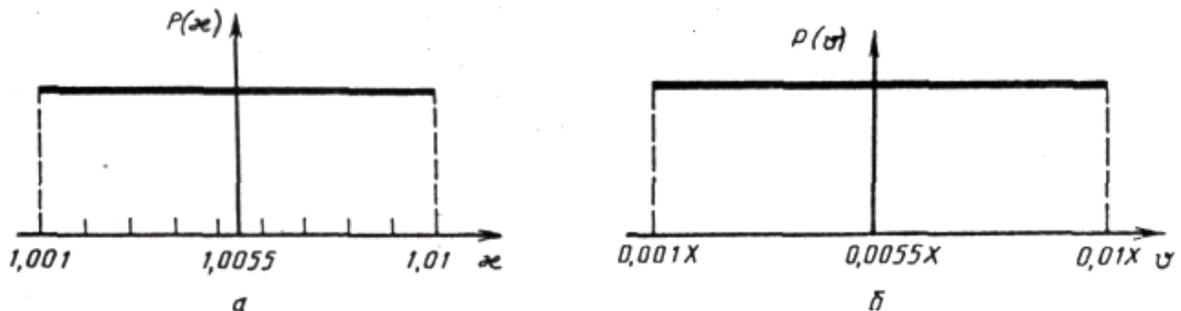


Рис. 25. Математические модели мультипликативной (а) и аддитивной (б) температурной поправки в примере 21

В рассматриваемом примере температурная поправка может быть сконструирована и как аддитивная

$$\mathcal{G} = 1000 \cdot \alpha \cdot X.$$

Графическое изображение ситуационной модели в этом случае показано на рис. 25, б, а числовые характеристики равны:

$$\bar{\mathcal{G}} = 0,0055X; u_{\mathcal{G}} = 2,6 \cdot X \cdot 10^{-3}.$$

Использование ситуационной модели является искусственным математическим приемом, позволяющем учесть дефицит информации о значении коэффициента линейного расширения  $\alpha$ . Проведя соответствующие исследования и установив значение  $\alpha$ , можно уточнить поправку, которая на самом деле является неслучайной и изображается точкой на числовой оси.

### 3.3.4. Обнаружение и исключение ошибок

Надежность эргономической системы, в которую входят человек, окружающая среда, объект измерений и средство измерений, не безгранична. В ней могут происходить сбои, отказы аппаратуры, скачки напряжения в сети питания, сейсмические сотрясения, отвлечение внимания оператора, описки в записях и многое другое, не имеющее отношения к измерениям. В результате появляются ошибки, вероятность которых, как следует из теории надежности больших систем, не так уж мала.

При однократном измерении ошибка может быть обнаружена только путем логического анализа или сопоставления результата с априорным представлением о нем. Установив и устранив причину ошибки, измерение можно повторить.

При многократном измерении одной и той же величины постоянного размера ошибки проявляются в том, что результаты отдельных измерений заметно отличаются от остальных. Иногда это отличие настолько большое, что ошибка очевидна. Остается понять и устранить ее причину или просто отбросить этот результат как заведомо неверный. Если отличие незначительное, то это может быть следствием как ошибки, так и рассеяния отсчета, а следовательно, показания и результата измерения, которые согласно основному постулату метрологии являются случайными. Нужно поэтому иметь какое-то правило, руководствуясь которым принимать решения в сомнительных случаях.

После того, как все влияющие факторы учтены и все поправки в показания внесены, рассеяние результата измерения одной и той же физической величины постоянного размера нередко бывает следствием множества причин, вклад каждой из которых незначителен по сравнению с суммарным действием всех остальных. *Центральная предельная теорема теории вероятности* утверждает, что результат измерения при этом подчиняется так называемому *нормальному закону*

$$p(Q) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}},$$

кривые плотности распределения вероятности которого при различных значениях дисперсии показаны на рис.16. Интегральная функция нормального закона распределения вероятности

$$F(Q_0) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_0} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}} dQ$$

Если условия центральной предельной теоремы выполняются, то весь массив экспериментальных данных при многократном измерении одной и той же величины постоянного размера должен группироваться около не которого среднего значения, и выпадение какого-нибудь отдельного значения результата из этого массива позволяет предположить, что он ошибочный. Найдем вероятность, с которой любое значение результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, должно находиться в пределах от  $Q_1$  до  $Q_2$ :

$$P\{Q_1 \leq Q_i \leq Q_2\} = F(Q_2) - F(Q_1) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_2} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}} dQ - \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_1} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}} dQ$$

Интегралы в этом выражении не могут быть выражены через элементарные функции. Более того, для интегральной функции нормального закона распределения нет ни таблиц, ни графиков, так как с их помощью невозможно охватить все многообразие возможных значений  $\bar{Q}$  и  $\sigma_Q^2$ . Произведем поэтому замену переменной:

$$\frac{Q-\bar{Q}}{\sigma_Q} = z; \quad \frac{Q_1-\bar{Q}}{\sigma_Q} = z_1; \quad \frac{Q_2-\bar{Q}}{\sigma_Q} = z_2.$$

Учитывая, что после такой замены  $dQ = \sigma_Q dz$ , получим:

$$P\{Q_1 \leq Q_i \leq Q_2\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_2} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_1} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = F(z_2) - F(z_1)$$

Теперь интересующая нас вероятность выражена через разность значений интегральной функции, соответствующей плотности распределения вероятности

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2},$$

характеризующей так называемый нормированный нормальный закон. Дифференциальная и интегральная функции его показаны на рис. 26, а числовые характеристики

$$\bar{z} = 0; \sigma_z^2 = 1.$$

Из рисунка 26, б видно, что

$$F(z) = 1 - F(-z).$$

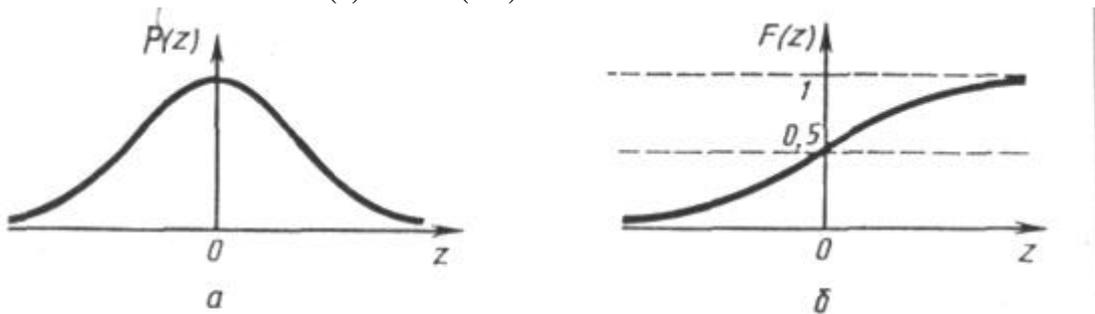


Рис. 26. Дифференциальная (а) и интегральная (б) функции нормированного нормального закона распределения вероятности

Эта функция, связанная с интегралом вероятности — функцией Лапласа (см. рис. 27)

$$L(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{1}{2}v^2} dv,$$

соотношением

$$F(z) = \frac{1}{2} + L(z),$$

Г

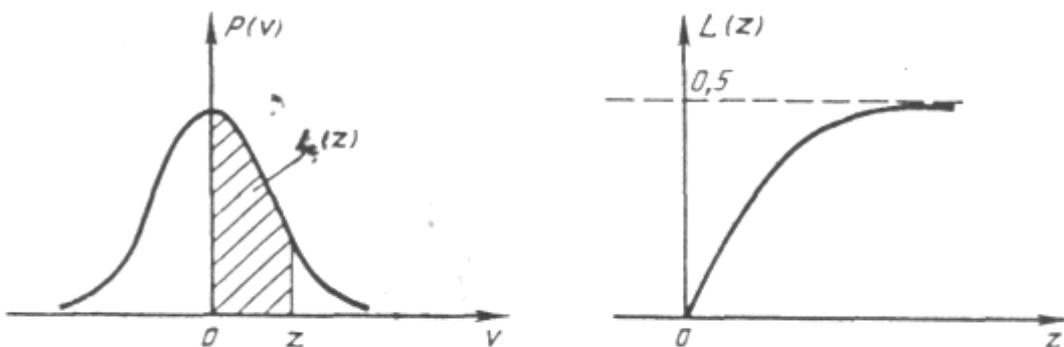


Рис. 27. К определению функции Лапласа

табулирована в диапазоне значений  $z$  от 0 до 3,3, за пределами которого в сторону больших  $z$  практически неотличима от 1. Если выбрать  $z_2 = -z_1$  и обозначить эту величину

через  $t$ , что будет соответствовать, как показано на рис. 28, выбору границ интервала  $[Q_1; Q_2]$  равноотстоящих от среднего значения  $\bar{Q}$  на  $\pm t\sigma_Q$ , т. е.

$$Q_1 = \bar{Q} - t\sigma_Q;$$

$$Q_2 = \bar{Q} + t\sigma_Q,$$

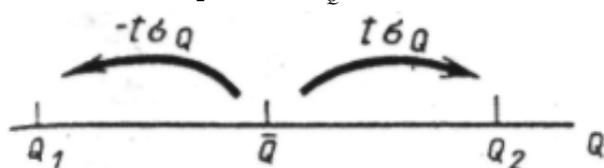


Рис. 28. Выбор параметра  $t$

то окончательно получим:

$$P\{\bar{Q} - t\sigma_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + t\sigma_Q\} = 2F(t) - 1 = 2L(t). \quad (9)$$

По табличным значениям функций, входящих в это уравнение, построена верхняя кривая на рис. 29. Параметр  $t$  играет в метрологии важную

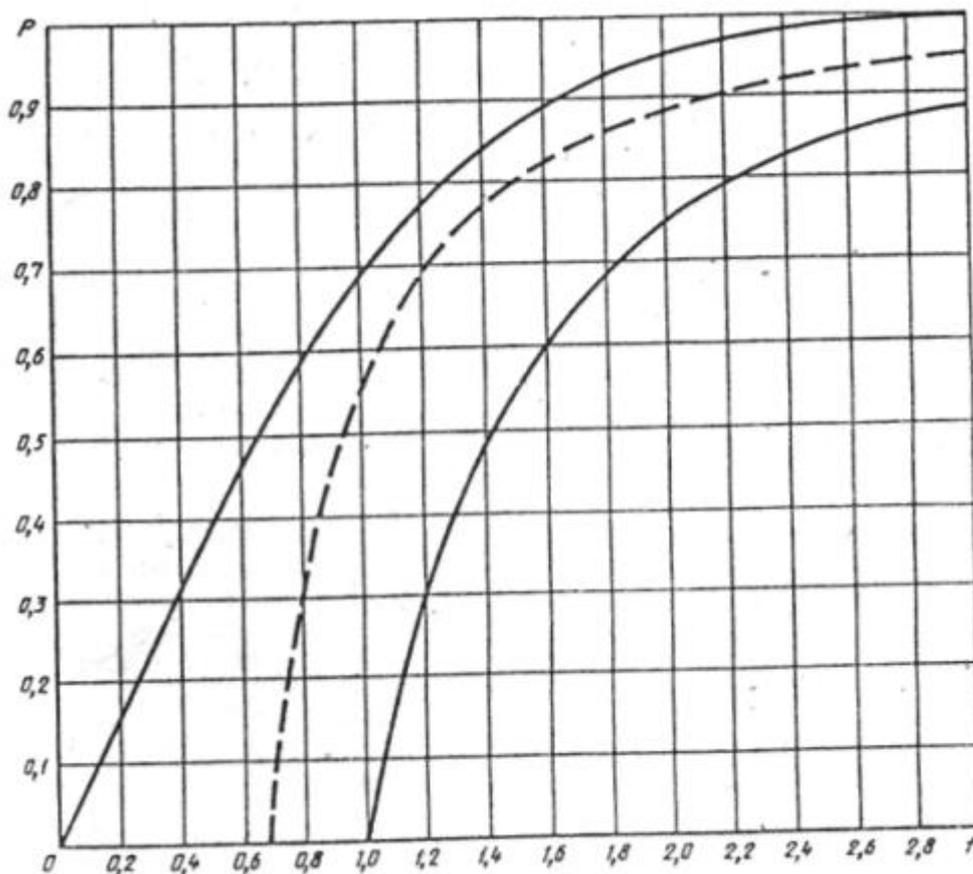


Рис. 29. Вероятность попадания отдельного значения результата измерения в окрестность среднего значения

роль. Он показывает, на сколько  $\sigma_Q$  с заданной вероятностью может отличаться отдельное значение результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, от своего среднего значения. Так, например, из графика на рис. 29 видно, что

$$\text{с } P=0,5 \text{ на } \pm \frac{2}{3} \sigma_Q;$$

$$\text{с } P=0,68 \text{ на } \pm \sigma_Q;$$

с  $P=0,95$  на  $\pm 2\sigma_Q$ ;

с  $P=0,99$  на  $\pm 2,6\sigma_Q$ ;

с  $P=0,997$  на  $\pm 3\sigma_Q$ .

Эта вероятность называется доверительной, интервал  $[\bar{Q} - t\sigma_Q; \bar{Q} + t\sigma_Q]$  — доверительным интервалом, а его границы  $Q_1$  и  $Q_2$  - доверительными границами. Из графика следует, что доверительный интервал зависит от доверительной вероятности. С очень высокой вероятностью 0,997 все значения результата измерения, подчиняющегося нормальному закону, должны группироваться в пределах доверительного интервала  $Q \pm 3\sigma_Q$ . На этом основании можно сформулировать следующее правило: если при многократном измерении одной и той же физической величины постоянного размера сомнительное значение результата измерения отличается от среднего значения больше чем на  $3\sigma_Q$ , то с вероятностью 0,997 оно является ошибочным и его следует отбросить. Это правило называется „правилом трех сигм“.

Пример 22. Одной из причин рассеяния результатов радиотехнических измерений служит «шум» первых каскадов усиления в измерительных преобразователях. Напряжение «шума» является случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения вероятности с нулевым средним значением и дисперсией, равной мощности „шума“, выделяемого на сопротивлении 1 Ом.

Определить, не содержится ли ошибок в следующих экспериментальных данных, полученных при измерении мгновенного значения шумового напряжения в отсутствие полезного сигнала: -4,2 мВ; 0,3 мВ; 5,7 мВ; -1,6 мВ; -7,2 мВ; 3,9 мВ; 2,2 мВ; - 0,1 мВ; 1,4 мВ, если мощность „шума“, выделяемая на нагрузке 1 Ом, равна 4 мкВт.

Решение. Среднее квадратическое отклонение мгновенного значения шумового напряжения составляет 2 мВ. По „правилу трех сигм“, следовательно, нужно признать, что в пятом случае допущена какая-то ошибка.

Можно, конечно, принимать решения и с меньшей вероятностью. В рассмотренном примере с вероятностью 0,99, например, допущена ошибка и в третьем случае. На практике, однако, преимущественное распространение получило «правило трех сигм». Условием его применения служит уверенность в том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности. Если такой уверенности нет, то указанное обстоятельство следует проверить. Так как ошибка искажает закон распределения вероятности результата измерения, то проверка его нормальности производится после исключения ошибки. Как это делается подробно рассмотрено в разд. 3.6.2.

В некоторых случаях известно заранее, что результат измерения подчиняется равномерному закону распределения вероятности. Например, из-за люфтов и трения в опорах подвижной части измерительного механизма он с равной вероятностью может отличаться от среднего значения на любую величину в пределах общего люфта. Последний обычно известен, так что появление больших отклонений может быть следствием только ошибок. Без дополнительной проверки они должны быть отброшены.

### **3.4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

Измерение состоит в получении информации о значении измеряемой величины. Означает ли это, что до измерения об этой величине ничего неизвестно?

Нет, не означает. Напротив, для того, чтобы провести измерение, нужно уже знать достаточно много. В первую очередь нужно хорошо себе представлять объект исследования. Внутренний диаметр полого шара не измерить ни обычной линейкой, ни микрометром. Для измерения расстояний между атомами в кристалле не годятся ни концевые, ни штриховые меры длины. Некоторые измерительные задачи вообще бессмысленно ставить. Нельзя, например, измерить ни цвет, ни вкус, ни запах электрона.

Нужно знать размерность измеряемой величины. В противном случае будет не ясно, с чем сравнивать ее размер: с метром? килограммом? секундой или другой единицей? Нужно иметь хотя бы ориентировочное представление и о ее размере: температуру в доменной печи не измерить уличным термометром; отсутствие представления о силе электрического тока при грозном разряде обернулось для Г.В. Рихмана трагедией. При постановке измерительных задач важно установить (а затем исключить, компенсировать, или как-то учесть) факторы, влияющие на результат измерения.

Информация, которой располагают до измерения; называется априорной. Она всегда есть. Если об измеряемой величине мы ничего не знаем, то ничего и не узнаем. С другой стороны, если об измеряемой величине известно все, то измерение не нужно. Необходимость измерения обусловлена дефицитом информации о количественной характеристике измеряемой величины.

Наличие априорной информации о размере измеряемой величины выражается в том, что он не может быть любым в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Всегда можно указать некоторые пределы, в которых находится значение измеряемой величины, пусть даже очень грубо, сугубо ориентировочно. Если нельзя сказать, что в этих пределах какие-то значения измеряемой величины более вероятны, чем другие, то остается принять, что с одинаковой вероятностью измеряемая величина может иметь любое значение от  $Q_1$  до  $Q_2$ , т. е. воспользоваться ситуационной моделью

$$p_0(Q) = \frac{1}{Q_2 - Q_1}$$

представленной графически на рис. 30. Дефицит информации о количественной характеристике измеряемой величины состоит в неопределенности ее значения на интервале  $[Q_1, Q_2]$ . Мера этой неопределенности - энтропия

$$H_0(Q) = \int_{-Q_1}^{Q_2} p_0(Q) \ln p_0(Q) dQ.$$

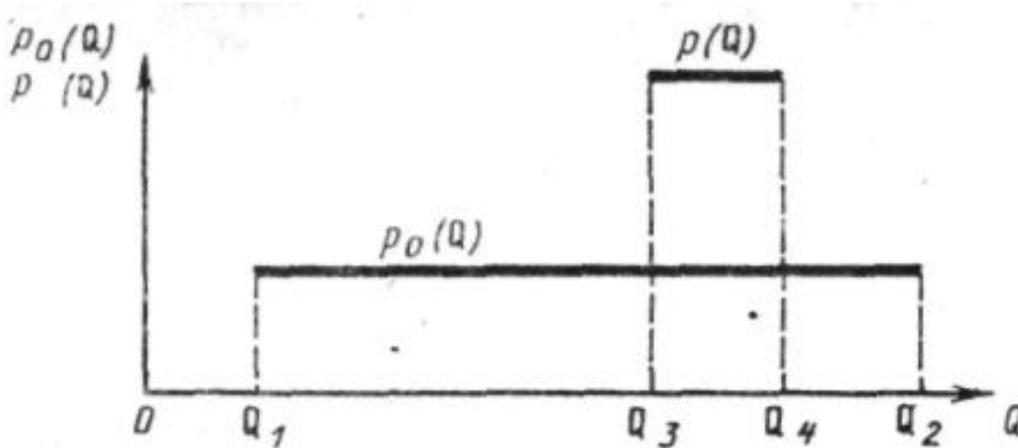


Рис. 30. Априорная  $p_0(Q)$  и апостериорная  $p(Q)$  плотности распределения вероятности значения измеряемой величины.

Таким образом, дефицит информации о значении измеряемой величины перед измерением составляет

$$H_0(Q) = - \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{1}{Q_2 - Q_1} \ln \frac{1}{Q_2 - Q_1} dQ = \ln(Q_2 - Q_1).$$

Рассмотрим теперь ситуацию, складывающуюся после выполнения измерения. Результат измерения является случайным значением измеряемой величины. Если влияние постоянно действующих и закономерно изменяющихся во времени факторов

компенсировано поправками, а ошибки исключены, то отдельные значения результата измерения являются либо завышенными, либо заниженными по чисто случайным причинам:

$$Q_1 = Q + \delta_1;$$

$$Q_2 = Q + \delta_2;$$

.....

$$Q_i = Q + \delta_i;$$

.....

$$Q_n = Q + \delta_n,$$

где случайное отклонение  $\delta$  принимает значения, разные по абсолютной величине и знаку. Среднее значение случайного отклонения  $\bar{\delta}$  равно нулю. Поэтому

$$\bar{Q} = \overline{Q + \delta} = Q$$

Таким образом, (см. рис. 31) значение измеряемой величины равно среднему значению результата измерения. Несмещенность среднего значения результата измерения относительно значения измеряемой величины обеспечивает правильность измерений.

Однако на практике вычислить среднее значение результата измерения невозможно, так как при конечном объеме экспериментальных данных невозможно интегрирование в бесконечных пределах. Невозможно, следовательно, установить и значение измеряемой величины. На практике исходят из того, что никакое значение результата измерения с выбранной доверительной вероятностью не может отличаться от среднего значения больше чем на половину доверительного интервала. Поэтому среднее значение результата измерения  $\bar{Q}$ , а следовательно, и значение измеряемой величины  $Q$  с такой же вероятностью не отличаются от любого значения  $Q_i$  больше чем на половину доверительного интервала — рис. 32. Это позволяет после выполнения измерения установить интервал  $[Q_3; Q_4]$ , в котором с выбранной вероятностью находится значение  $Q$ .

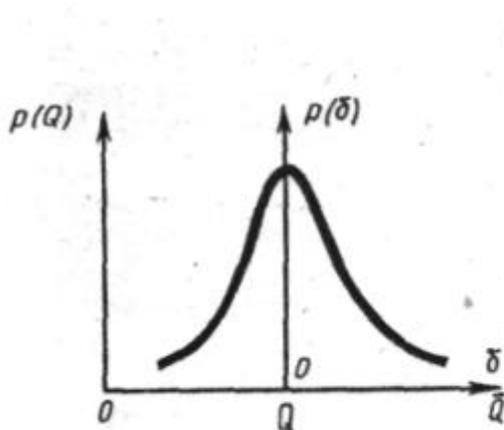


Рис. 31. Графики плотности распределения вероятности результата измерения и его случайного отклонения от значения измеряемой величины

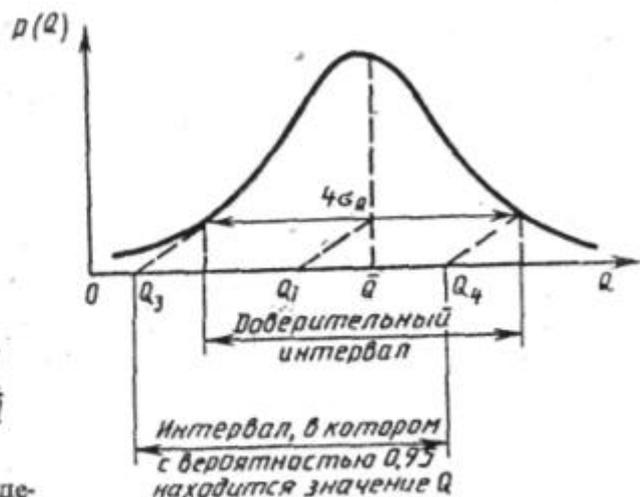


Рис. 32. Область определения  $Q$  с доверительной вероятностью 0,95

Ничего определенного относительно того, чему равно  $Q$  в пределах установленного интервала, сказать нельзя. Можно поэтому принять, что на этом интервале любые значения  $Q$  равновероятны, т. е. опять-таки воспользоваться ситуационной моделью

$$p(Q) = \frac{1}{Q_4 - Q_3},$$

показанной на рис. 30. Все значение измерения заключается в том, что интервал  $[Q_3; Q_4]$  меньше интервала  $[Q_1, Q_2]$ , в котором, как было установлено на основе анализа априорной информации, находится значение измеряемой величины. Таким образом, можно сказать, что измерение состоит в уточнении значения измеряемой величины. Однако точное значение остается неизвестным и после измерения. Остаточная неопределенность составляет

$$H(Q) = - \int_{Q_3}^{Q_4} \frac{1}{Q_4 - Q_3} \ln \frac{1}{Q_4 - Q_3} dQ = \ln(Q_4 - Q_3).$$

то есть после измерения дефицит информации о значении измеряемой величины уменьшается на

$$I = H_0(Q) - H(Q) = \ln \frac{Q_2 - Q_1}{Q_4 - Q_3}.$$

Эта величина интерпретируется как количество информации, получаемой в результате измерения, а протяженность интервалов  $[Q_1, Q_2]$  и  $[Q_3; Q_4]$  характеризует точность, с которой известно значение физической величины до и после ее измерения.

По ширине доверительного интервала, в котором с выбранной доверительной вероятностью устанавливается значение измеряемой величины, измерения делятся на измерения низкой, высокой, высшей и наивысшей точности (см. рис. 33). Технические средства, обеспечивающие высший и наивысший уровни точности, для практических измерений не используются. Подробно они рассматриваются в разд. 4. Средства измерений могут быть высокой и низкой точности, хотя такая градация весьма условна: отдельные уникальные средства измерений могут достигать наивысшего уровня точности. Кроме того нужно иметь в виду, что точность измерений определяется не только точностью средств измерений, но и многими другими факторами, рассмотренными в разд. 3.3.

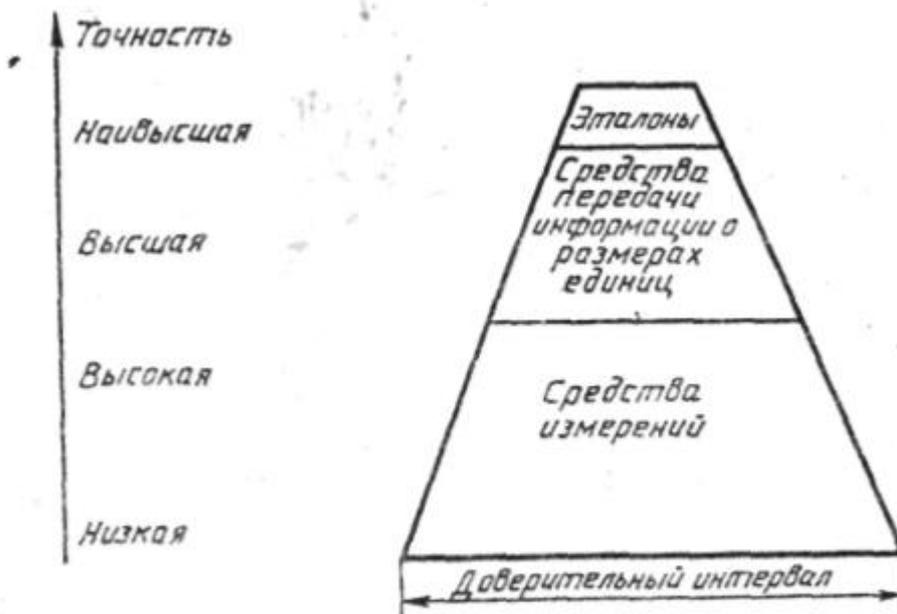


Рис. 33. Уровни точности измерений

### 3.5. ОДНОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ

Подавляющее большинство измерений являются однократными. Можно сказать, что в обиходе, в торговле, во многих областях производственной деятельности выполняются только однократные измерения. В обычных условиях их точность вполне приемлема, а простота, высокая производительность (количество измерений в единицу времени) и низкая стоимость (по оценке трудозатрат) ставят их вне конкуренции. Многие люди до конца своей жизни остаются знакомыми только с однократными измерениями.

Результат однократного измерения описывается выражением (5), приведенным в разд. 3.1. Сам по себе он ни о чем еще не говорит, так как является случайным значением измеряемой величины. Необходимым условием проведения однократного измерения служит наличие априорной информации. К ней относится, например, информация о виде закона распределения вероятности показания и мере' его рассеяния, которая извлекается из опыта предшествующих измерений. Если ее нет, то используется информация о том, насколько значение измеряемой величины может отличаться от результата  $s$  однократного измерения. Такая информация бывает представлена классом точности средства измерений (см. разд. 2.3.3). К априорной относится информация о значении аддитивной или мультипликативной поправки (для конкретности ограничимся рассмотрением аддитивной поправки  $\theta_i$ ). Если оно не известно, то это учитывается ситуационной моделью, согласно которой с одинаковой вероятностью значение поправки может быть, например, любым в пределах от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$ . Без априорной информации выполнение однократного измерения бессмысленно.

Порядок действий при однократном измерении показан на рис. 34. Предварительно проводится тщательный анализ априорной информации. В ходе этого анализа уясняется физическая сущность изучаемого явления, уточняется его модель, определяются влияющие факторы и меры, направленные на уменьшение их влияния (термостатирование, экранирование, компенсация электрических и магнитных полей и др.) значения поправок, принимается решение в пользу той или иной методики измерения, выбирается средство измерений, изучаются его метрологические характеристики и опыт выполнения подобных измерений в прошлом. Важным итогом этой предварительной работы должна стать твердая уверенность в том, что точности однократного измерения достаточно для решения поставленной задачи. Если это условие выполняется, то после необходимых приготовлений, включающих установку и подготовку к работе средства измерений, исключение или компенсацию влияющих факторов, выполняется основная измерительная процедура — получение одного значения отсчета.

Отсчет, согласно основному постулату метрологии, является случайным числом. Ни одно из отдельных его значений не дает полного представления о таком числе. Поэтому уже на этапе получения отсчета возникает дефицит измерительной информации, который может быть восполнен только за счет априорных сведений.

Единственное значение отсчета  $x_i$  дает одно единственное значение показания  $X_i$  средства измерений, имеющее ту же размерность, что и измеряемая величина. В это значение показания вносится поправка  $\theta_i$ . Если значение известно точно, то результат измерения  $Q$  будет представлен единственным значением

$$Q_i = X_i + \theta_i$$

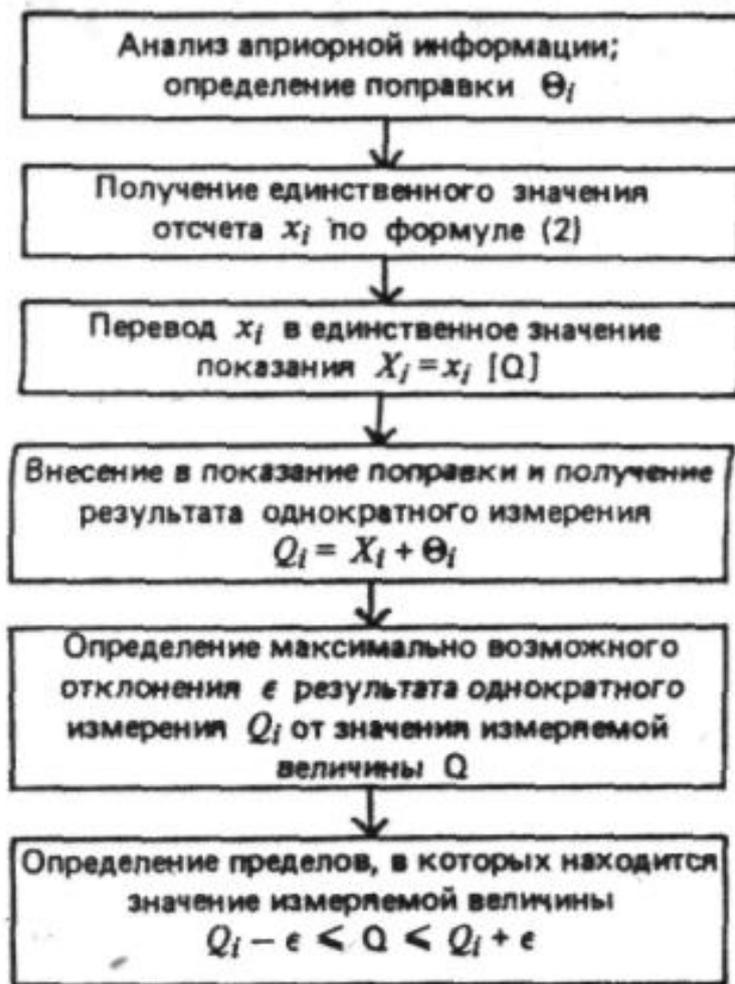


Рис. 34. Порядок выполнения однократного измерения при точно известном значении аддитивной поправки

Если значение поправки неизвестно, то при выбранной ситуационной модели результат однократного измерения  $Q_i$  с равной вероятностью может быть любым в пределах от  $X_i + \theta_{\min}$  до  $X_i + \theta_{\max}$ , ибо в последнем выражении  $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$ .

Конечной целью измерительного эксперимента является получение достоверной количественной информации о значении измеряемой величины. На пути к достижению этой цели получение результата однократного измерения служит промежуточным этапом. Дальнейшее зависит от того, как используется априорная информация. Проанализируем несколько конкретных вариантов.

Вариант 1. *Априорная информация*: отсчет, а следовательно показание подчиняются нормальному закону распределения вероятностей со средним квадратическим отклонением  $\sigma_x$ ; точное значение аддитивной поправки равно  $\theta_i$ .

В этом случае результат измерения  $Q$  подчиняется нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $\sigma_Q = \sigma_x$ , но смещенному по отношению к закону распределения вероятности показания на значение поправки  $\theta_i$  (см. формулу 5), внесение которой обеспечивает правильность измерения. Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , можно по верхней кривой на рис. 29 определить, на сколько  $\sigma_Q$  результат однократного измерения  $Q_i$  может отличаться от среднего значения результата измерения  $\bar{Q}$ , равного значению измеряемой величины  $Q$ . Обозначив половину доверительного интервала через  $e = t\sigma_Q$ , найдем, что с выбранной

вероятностью

$$Q_i - e \leq Q \leq Q_i + e.$$

Вариант 2. *Априорная информация*: отсчет, а следовательно и показание подчиняются равномерному закону распределения вероятности с размахом  $e = X_{\max} - \bar{X}$ ; точное значение аддитивной поправки равно  $\theta_i$ .

Такой вариант встречается при люфте подвижной части измерительного механизма. Результат измерения  $Q$  подчиняется равномерному закону распределения вероятности с тем же размахом  $e$ , но смещенному по отношению к закону распределения вероятности показания на значение поправки  $\theta_i$ , внесением которой обеспечивается правильность измерения. Значение измеряемой величины  $Q$ , равное среднему значению результата измерения  $\bar{Q}$ , находится в пределах

$$Q_i - e \leq Q \leq Q_i + e$$

Вариант 3. *Априорная информация*: отсчет, а следовательно и показание подчиняются неизвестному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $\sigma_x$ ; точное значение аддитивной поправки равно  $\theta_i$ .

В данном случае закон распределения вероятности результата измерения неизвестен, известно лишь его среднее квадратическое отклонение  $\sigma_Q = \sigma_x$ . Вероятность того, что результат однократного измерения  $Q_i$  окажется за пределами доверительного интервала при любом законе распределения вероятности

$$P\{Q_i - \bar{Q} > t\sigma_Q\} = \int_{-\infty}^{\bar{Q}-t\sigma_Q} p(Q)dQ + \int_{\bar{Q}+t\sigma_Q}^{\infty} p(Q)dQ.$$

Введем в рассмотрение функцию

$$\zeta(Q) = \begin{cases} 1 & \text{при } Q < \bar{Q} - t\sigma_Q; \\ 0 & \text{при } \bar{Q} - t\sigma_Q < Q < \bar{Q} + t\sigma_Q; \\ 1 & \text{при } Q > \bar{Q} + t\sigma_Q. \end{cases}$$

график которой показан на рис. 35. Это позволит перейти к более компактной записи:

$$P\{Q_i - \bar{Q} > t\sigma_Q\} = \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(Q) p(Q) dQ.$$

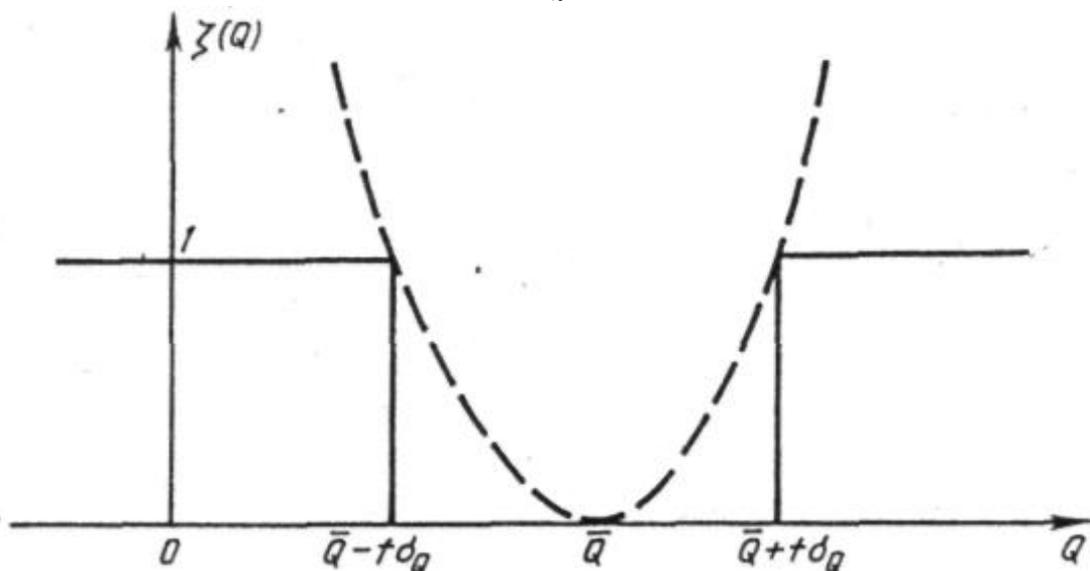


Рис. 35. К выводу неравенства П.Л. Чебышева

Результат интегрирования не уменьшится, если функцию  $\zeta(Q)$  заменить показанной на рис. 35 пунктиром квадратичной функцией  $\left(\frac{Q-\bar{Q}}{t\sigma_Q}\right)^2$

которая при всех  $Q$  не меньше  $\zeta(Q)$ . Тогда

$$P\{|Q_i - \bar{Q}| > t\sigma_Q\} \leq \frac{1}{(t\sigma_Q)^2} \int_{-\infty}^{\infty} (Q_i - \bar{Q})^2 p(Q) dQ = \frac{1}{t^2}.$$

Вероятность того, что результат однократного измерения  $Q_i$  при любом законе распределения вероятности не отличается от среднего значения больше чем на половину доверительного интервала,

$$P\{\bar{Q} - t\sigma_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + t\sigma_Q\} \leq 1 - \frac{1}{t^2}.$$

Полученная формула носит название неравенства П.Л. Чебышева. Она устанавливает нижнюю границу вероятности того, что ни при каком законе распределения вероятности случайное значение результата измерения не окажется за пределами доверительного интервала. Эта граница нанесена на рис. 29 в виде нижней кривой.

При симметричных законах распределения вероятности результата измерения неравенство П.Л. Чебышева имеет вид

$$P\{\bar{Q} - t\sigma_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + t\sigma_Q\} \geq 1 - \frac{4}{9} \cdot \frac{1}{t^2}.$$

Соответствующая граница проходит выше и левее. На рис. 29 она показана пунктиром.

Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , можно по нижней кривой на рис. 29 определить, на сколько  $\sigma_Q$  результат однократного измерения  $Q_i$  может отличаться от среднего значения результата измерения  $Q$ , равного значению измеряемой величины  $Q$ , при любом законе распределения вероятности. Обозначив, как и ранее половину доверительного интервала через  $\varepsilon = t\sigma_Q$ , найдем, что с наименьшей вероятностью

$$Q_i - \varepsilon \leq Q \leq Q_i + \varepsilon$$

Вариант 4. Априорная информация: класс точности средства измерений таков, что значение измеряемой величины не может отличаться от результата однократного измерения больше чем на  $\varepsilon$ ; точное значение аддитивной поправки равно  $\theta_i$ .

Этот вариант ничем не отличается от второго. Значение измеряемой величины

$$Q_i - \varepsilon \leq Q \leq Q_i + \varepsilon$$

Вариант 5. Априорная информация: отсчет; а следовательно, и показание подчиняются нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $\sigma_x$ ; значение аддитивной поправки находится в пределах от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$ .

Ситуационной моделью, учитывающей неопределенность значения поправки, является равномерный закон распределения вероятности  $\theta$  на интервале от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$ . Закон распределения вероятности результата измерения  $Q$  представляет собой композицию законов распределения вероятности показания и ситуационной модели. Композиция, в которую входит ситуационная модель, не подчиняется вероятностно-статистическим закономерностям. Однако по аналогии с вариантом 1 в 1981 году Международным комитетом мер и весов рекомендовано считать, что с высокой вероятностью среднее значение композиции, равное значению измеряемой величины, не отличается от результата однократного измерения больше чем на  $\varepsilon = k u_Q$  где  $u_Q = \sqrt{\sigma_x^2 + u_\theta^2}$ , а коэффициент  $k$ , аналогичный коэффициенту  $t$ , устанавливается по соглашению. Обычно он принимается равным 2... 3.

Пример 23. Единственное значение отсчета в условиях, рассмотренных в примере 21, равно 1. Из опыта предшествовавших измерений известно, что отсчет подчиняется нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $2 \cdot 10^{-3}$ . В каких пределах находится значение измеренного линейного размера?

Решение. 1. Единственное значение показания равно 1 м. Показание подчиняется нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $2 \cdot 10^{-3}$ .

2. Ситуационная модель, учитывающая дефицит информации о значении аддитивной температурной поправки, представлена графически на рис. 25, б. Ее численные характеристики  $\bar{v} = 5,5$  мм; и  $u_v = 2,6$  мм.

3. Аналог среднего квадратического отклонения результата измерения

$$u_Q = \sqrt{\sigma_x^2 + u_v^2} = 3.3 \text{ мм.}$$

4. Принимая  $k = 2$ , и выбирая в качестве результата однократного измерения  $l_i = 1000 + 5,5 = 1005,5$  мм, получим

$$998,9 \text{ мм} \leq l \leq 1012,1 \text{ мм}$$

Рассмотренный пример позволяет сделать несколько замечаний.

Замечание 1. Получение результата измерения служит промежуточным этапом, на котором измерительная информация должна представляться в форме, удобной для ее дальнейшей обработки (переработки). Такой формой является представление результата измерения с помощью числовых характеристик закона распределения вероятности. При однократном измерении чаще всего используется такая числовая характеристика законов распределения вероятности, как среднее квадратическое отклонение (или его аналог). С ее помощью определяются пределы, в которых находится значение измеряемой величины, осуществляется внесение поправки, точное значение которой неизвестно. Если пользоваться стандартными аппроксимациями законов распределения вероятности, представленными в табл. 8, то переход к этой числовой характеристике удобно осуществить с помощью коэффициентов, приведенных в третьей графе.

Замечание 2. Цель измерения состоит в уточнении значения измеряемой величины. Если измерительная информация не предназначена для дальнейшей обработки (переработки), то она должна быть представлена в форме, удобной для восприятия человеком. Такой формой является указание пределов, в которых находится значение измеренной величины. Не рекомендуется пользоваться записью  $Q = Q_i \pm \varepsilon$ , так как в силу особенностей человеческой психики при этом возникает некоторая доминант на акцент на середину интервала, для чего нет никаких оснований. Все значения  $Q$  в интервале  $Q_i - \varepsilon \leq Q \leq Q_i + \varepsilon$  равновероятны.

Замечание 3. Внесение поправки, точное значение которой неизвестно, с одной стороны смещает интервал, в пределах которого находится значение измеряемой величины, а с другой - расширяет его. Из рассмотрения рис. 36 следует, что внесение неточно известной поправки целесообразно только тогда, когда  $\bar{\theta} > \varepsilon - t\sigma_x$ .

Замечание 4 касается достоверности измерений. Под достоверностью понимается степень доверия к тому, что значение измеренной величины находится в указанном интервале. Рассмотрим два случая, чаще всего встречающиеся на практике.

Таблица 8

Аппроксимирующая функция	График плотности вероятности	$a/\sigma_x$
Нормальная (усеченная)		3,0
Треугольная		2,4
Трапециевидальная		2,3
Равномерная		1,7
Антимодальная I		1,4
Антимодальная II		1,2
Релея (усеченная)		3,3

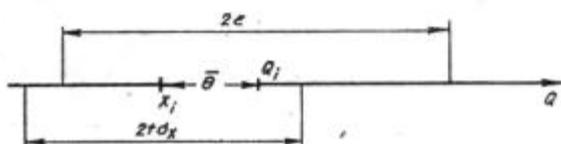


Рис. 36. Интервал, в пределах которого находится значение измеряемой величины, до и после внесения неточно известной поправки

1. Результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности (см., например, вариант 1), что бывает чаще веере при точно известном значении поправки. Точность результаты измерения (см. рис. 37) в этом случае равна точности показания, которая в свою очередь характеризует точность средства измерений. Точность измерения — ширина интервала, в котором устанавливается значение измеряемой величины — зависит от выбранной доверительной вероятности. Чем выше эта вероятность, тем с большей гарантией, с большей достоверностью устанавливается значение измеряемой величины. С вероятностью 0,95

$$Q_i - 2\sigma_Q \leq Q \leq Q + 2\sigma_Q$$

с вероятностью 0,99

$$Q_i - 2.6\sigma_Q \leq Q \leq Q + 2.6\sigma_Q$$

с вероятностью 0,997

$$Q_i - 3\sigma_Q \leq Q \leq Q + 3\sigma_Q.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае доверительная вероятно! является мерой достоверности измерений.

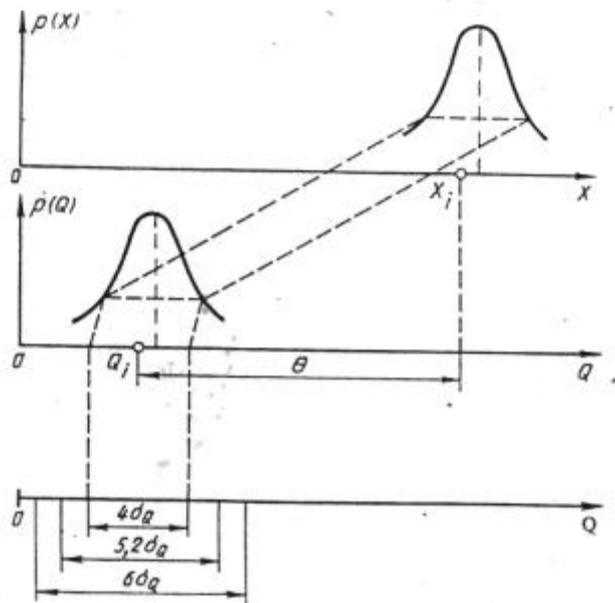


Рис. 37. К пояснению о достоверности измерения при точно известном значении поправки

2. Результат измерения описывается композицией закона распределения вероятности показания и ситуационной модели, учитывающей неточность значения поправки (рис. 38). Достоверность измерений в этом случае обеспечивается выбором коэффициента  $k$ .

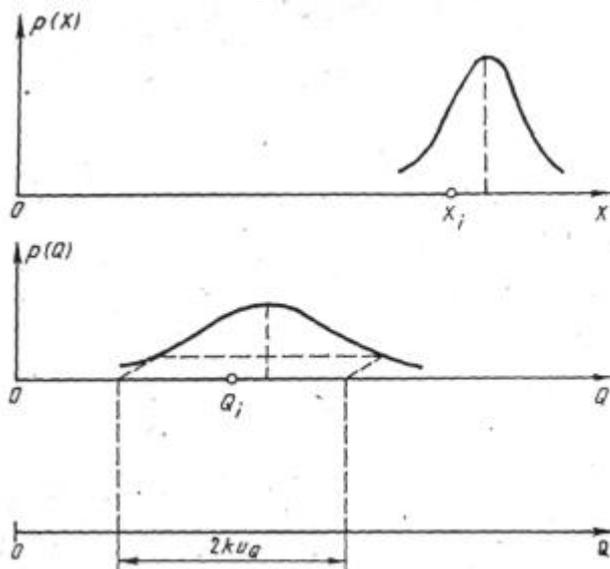


Рис.38. К пояснению достоверности измерений при неточно известном значении поправки.

■

**Замечание 5** связано с правилами округления. В метрологии принято среднее квадратическое отклонение или его аналог выражать одной значащей цифрой, например, 8; 0,5; 0,007. Две значащие цифры, например, 27; 0,016 удерживаются при особо точных измерениях и в те\* случаях, когда значащая цифра старшего разряда меньше 4 (в промежуточных вычислениях сохраняется на одну значащую цифру больше). Вследствие этого, при квадратичном суммировании

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$$

любым из слагаемых  $u_i$ , под радикалом можно пренебречь, если его учет почти не меняет  $u$ . Строго говоря,  $u$  при этом может уменьшиться до  $u'$ , но так как значение  $u$

выражается не более чем двумя значащими цифрами, то условие можно считать выполненным, если  $u - u' < 0.05u$ , откуда  $0.95u < u'$ . Возводя обе части неравенства в квадрат и принимая во внимание, что  $(u')^2 = u^2 - u_i^2$ , получим

$$0.9025u^2 < u - u_i^2;$$

$$u_i^2 < 0.0975u^2;$$

$$u_i < 0.312u.$$

Таким образом, слагаемым

$$u_i \leq \frac{1}{3}u \quad (10)$$

всегда можно пренебречь. Это правило распространяется и на сумму нескольких слагаемых.

В п. 3.3.4 отмечалось, что при измерениях никто не застрахован от ошибок. Может оказаться ошибочным и единственное значение отсчета  $x_i$  при однократном измерении. Во избежание такой ошибки однократное измерение рекомендуется 2 ... 3 раза повторить без совместной обработки полученных результатов.

### **3.6. МНОГОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ С РАВНОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТСЧЕТА**

Многократное измерение одной и той же величины постоянного раз-мера производится при повышенных требованиях к точности измерений. Такие измерения характерны для профессиональной метрологической деятельности и выполняются в основном сотрудниками государственной и ведомственных метрологических служб, а также при тонких научных экспериментах. Это сложные, трудоемкие и дорогостоящие измерения целесообразность которых должна быть всегда убедительно обоснована. Один из создателей теории информации Л. Бриллюэн в статье «Теория информации и ее приложение к фундаментальным проблемам физики» привел слова Д. Табора о том, что «ничто не дается даром, в том числе информация». В полной мере это относится и к измерительной информации.

Результат многократного измерения описывается выражением (6) приведенным в разд. 3.1. Как и результат однократного измерения, он является случайным значением измеряемой величины, но его дисперсия

$$D\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n D(Q_i) = \frac{n\sigma_Q^2}{n^2} = \frac{\sigma_Q^2}{n}$$

в  $n$  раз меньше дисперсии результата измерения  $Q$ . Благодаря такому обстоятельству, как это видно на рис.39, где выделены интервалы, соответствующие доверительной вероятности 0,95, точность определения значения измеряемой величины повышается в  $\sqrt{n}$  раз.

На рис. 39 показан случай, когда результат многократного измерения — среднее арифметическое значение результата измерения  $\bar{Q}$  — подчиняется нормальному закону распределения вероятности. Так бывает всегда, когда нормальному закону распределение вероятности подчинялся сам результат измерения  $Q$ . Наличие массива экспериментальных данных

$$Q_i = X_i + \theta_i; i \in \{1, \dots, n\}$$

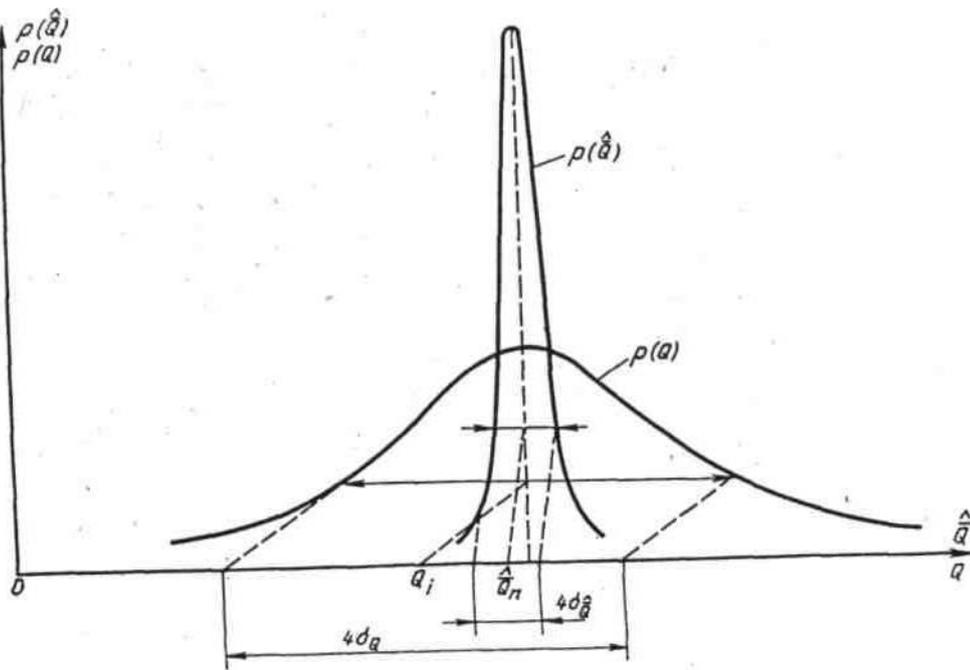


Рис. 39. Графики плотности распределения вероятности результата измерения и его среднего арифметического значения

позволяет получить апостериорную информацию о законе распределения вероятности результата измерения. В частности, может быть поставлена задача его определения. Но чаще ограничиваются проверкой нормальности закона распределения вероятности результата измерения и жертвуют точностью при отрицательных результатах проверки.

Другой возможностью, которая открывается благодаря наличию большого объема экспериментальных данных, является обнаружение и исключение ошибок по правилу „трех сигм“. Таким образом, специфическая особенность многократного измерения состоит в эффективном использовании апостериорной измерительной информации.

Последнее вовсе не означает, что необходимость в анализе априорной информации отпадает. Такой анализ обязательно предшествует многократному измерению и преследует те же цели, что и при однократном измерении, но с той разницей, что при многократном измерении информация о законе распределения вероятности результата измерения получается опытным путем.

Вслед за анализом априорной информации и тщательной подготовкой к многократному измерению получают  $n$  независимых значений отсчета. Эта основная измерительная процедура может быть организована по-разному. Если изменением измеряемой величины во времени можно пренебречь, то все значения отсчета проще всего получить путем многократного повторения операции сравнения (2) с помощью одного и того же средства измерений. Отсчет в этом случае будет описываться эмпирической плотностью распределения вероятности  $P(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  — см. пример 12, — где согласно основному постулату метрологии каждое значение отсчета является случайным числом, подчиняющимся этому закону распределения вероятности. Такие значения отсчета  $x_i$ , имеющие одинаковую дисперсию, называются равноточными. Если же из априорной информации следует, что за время измерения произойдет существенное изменение измеряемой величины, то ее измеряют одновременно несколькими средствами измерений, каждое из которых дает одно из независимых значений отсчета  $x_i$ . Так как средства измерений могут отличаться по точности, то в эмпирической плотности распределения вероятности отсчета  $P(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  случайные числа  $x_i$  могут иметь разную дисперсию. Такие значения отсчета  $x_i$  называются неравноточными. Многократное измерение с неравноточными значениями отсчета рассматривается в следующем разделе.

Порядок выполнения многократного измерения с равноточными значениями отсчета показан на рис. 40.

Все значения отсчета  $x_i$ , независимо от способа их получения, переводятся в показания  $X_i$ , в которые вносятся поправки  $\theta_i$ . Если многократное измерение выполняется одним средством измерений, то поправки могут отличаться друг от друга из-за изменения во времени влияющих факторов. Если же используются одновременно несколько средств измерений, то поправки отличаются из-за индивидуальных особенностей каждого из них. Для простоты будем считать их известными точно.

Полученный массив экспериментальных данных может содержать ошибки. Причины появления ошибок и „правило трех сигм“, которым пользуются для их выявления, рассмотрены в разд. 3.3.4. Для того, чтобы воспользоваться этим правилом, нужно знать числовые характеристики закона распределения вероятности' результата измерения — среднее значение  $\bar{Q}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_Q$ . Однако, как уже отмечалось в разд. 3.2, 3.4, вычислить их невозможно из-за конечного  $n$  и практической нереализуемости интегрирования в бесконечных пределах. Можно лишь как-то оценить эти числовые характеристики на основе ограниченного экспериментального материала, указать их приближенные значения или пределы, в которых они находятся с определенной вероятностью.

### 3.6.1. Точечные оценки числовых характеристик

Оценки числовых характеристик законов распределения вероятности случайных чисел или величин, изображаемые точкой на числовой оси, называются точечными. В отличие от самих числовых характеристик оценки являются случайными, причем их значения зависят от объема экспериментальных данных, а законы распределения вероятности - от законов распределения вероятности самих случайных чисел или значений измеряемых величин. Оценки должны удовлетворять трем требованиям: быть состоятельными, несмещенными и эффективными. Состоятельной называется оценка, которая сходится по вероятности к оцениваемой числовой характеристике. Несмещенной является оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемой числовой характеристике. Наиболее эффективной считают ту из нескольких возможных несмещенных оценок, которая имеет наименьшее рассеяние.

Рассмотрим  $n$  независимых значений  $Q_i$ , полученных при измерении физической величины постоянного размера. Пусть, как и раньше (см. разд. 3.4), каждое из них отличается от среднего значения на случайное отклонение  $\delta_i$ :

$$Q_1 = \bar{Q} + \delta_1;$$

$$Q_2 = \bar{Q} + \delta_2;$$

.....

$$Q_i = \bar{Q} + \delta_i;$$

.....

$$Q_n = \bar{Q} + \delta_n;$$

Сложив между собой левые и правые части этих уравнений и разделив их на  $n$ , получим:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \bar{Q} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

В пределе при  $n \rightarrow \infty$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{Q} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

Здесь

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{Q} = \bar{Q}; \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0,$$

так что среднее арифметическое значение результата измерения

$$\bar{Q}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

сходящееся по вероятности к  $\bar{Q}$ , при любом законе распределения вероятности результата измерения может служить состоятельной точечной оценкой среднего значения.

Математическое ожидание среднего арифметического

$$M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M(Q_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [M(\bar{Q}) + M(\delta_i)] = \bar{Q}.$$

Поэтому среднее арифметическое при любом законе распределения вероятности результата измерения является не только состоятельной, но и несмещенной оценкой среднего значения. Этим обеспечивается правильность результата многократного измерения.

Точность результата многократного измерения зависит от эффективности оценки среднего значения. Чем она эффективнее (чем меньше ее рассеяние), тем выше точность (см. рис. 39). Критерии эффективности могут быть разными. При нормальном законе распределения вероятности наиболее популярным является такой показатель эффективности (мера рассеяния), как сумма квадратов отклонений от среднего значения. Чем меньше этот показатель, тем эффективнее оценка. Это позволяет поставить задачу отыскания оценки среднего значения, наиболее эффективной по критерию

$$\sum_{j=1}^m (\bar{Q}_j - \bar{Q})^2 = \min. \quad (12)$$

Такая задача называется задачей синтеза оптимальной (т. е. наилучшей в смысле выбранного критерия) оценки среднего значения, а метод ее решения, основанный на использовании критерия (12), — методом наименьших квадратов.

Исследуем функцию в левой части выражения (12) на экстремум. Она достигает минимума при

$$\frac{\sum_{j=1}^m (\bar{Q}_j - \bar{Q})^2}{d\bar{Q}_j} = 0.$$

После возведения в квадрат и почленного дифференцирования получим

$$\sum_{j=1}^m \bar{Q}_j - m\bar{Q} = 0.$$

Если в качестве оценки  $\bar{Q}$  выбрать среднее арифметическое  $\bar{Q}_n$ , то равенство

$$\sum_{j=1}^m \left( \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} Q_i \right) - m\bar{Q} = 0$$

будет выполняться при  $n \rightarrow \infty$  в силу состоятельности этой оценки. Таким образом,

среднее арифметическое является не только состоятельной и несмещенной, но и наиболее эффективной по критерию наименьших квадратов точечной оценкой среднего значения результата измерения. В качестве точечной оценки дисперсии результата измерения по аналогии со средним арифметическим можно было бы взять

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n + \bar{Q} - \bar{Q})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Q_i - \bar{Q})^2 - (\bar{Q}_n - \bar{Q})] = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - \frac{2}{n} (\bar{Q}_n - \bar{Q}) \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{Q}_n - \bar{Q})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - \\ &- 2(\bar{Q}_n - \bar{Q}) \cdot \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i - \bar{Q} \right) + (\bar{Q}_n - \bar{Q})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - (\bar{Q}_n - \bar{Q})^2. \end{aligned}$$

При любом законе распределения вероятности результата измерения эта оценка является состоятельной, т. к. при  $n \rightarrow \infty$  второе слагаемое в правой части стремится к нулю, а первое — к  $\sigma_Q^2$ . Но

$$\begin{aligned} M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2\right) &= M\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2\right] - M(\bar{Q}_n - \bar{Q})^2 = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M(Q_i - \bar{Q})^2 - \sigma_Q^2 = \sigma_Q^2 - \frac{\sigma_Q^2}{n} = \frac{n-1}{n} \sigma_Q^2 \end{aligned}$$

т. е. такая оценка является смещенной. Несмещенную оценку можно получить, умножив ее на коэффициент  $\frac{n}{n-1}$ . При  $n \rightarrow \infty$  этот коэффициент

стремится к 1, так что несмещенная точечная оценка дисперсии при любом законе распределения вероятности результата измерения

$$S_Q^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2 \quad (13)$$

остается состоятельной. Квадратный корень из нее

$$S_Q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2}$$

называется стандартным отклонением.

Оценив среднее значение  $\bar{Q}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_Q$  результата измерения, можно, используя вместо этих числовых характеристик точечные оценки  $\bar{Q}_n$  и  $S_Q$ , по „правилу трех сигм“ проверить, не являются ли некоторые сомнительные значения  $Q_i$  ошибочными. Если окажется, что они отличаются от среднего арифметического  $\bar{Q}_n$  больше чем на  $3 S_Q$ , то их следует отбросить (см. рис. 40). После этого рассчитываются окончательные значения  $\bar{Q}_n$  и  $S_Q$ .

**Пример 24.** 15 независимых числовых значений результата измерения температуры в помещении по шкале Цельсия приведены во второй графе табл. 9.

$i$	$t_i$	$t_i - \bar{t}_{15}$	$(t_i - \bar{t}_{15})^2$	$t_i - \bar{t}_{14}$	$(t_i - \bar{t}_{14})^2$
1	20.42	+0.016	0.000256	+0.009	0.000081
2	43	+0.026	676	+0.019	361
3	40	-0.004	016	-0.011	121
4	43	+0.026	676	+0.019	361
5	42	+0.016	256	+0.009	081
6	43	+0.026	676	+0.019	361
7	39	-0.014	196	-0.021	441

8	30	-0.104	10816	—	—
9	40	-0.004	016	-0.011	121
10	43	+0.026	676	+0.019	361
11	42	+0.016	256	+0.009	081
12	41	+0.006	036	-0.001	001
13	39	-0.014	196	-0.021	441
14	39	-0.014	196	-0.021	441
15	40	-0.004	016	-0.011	121

Не допущено ли ошибок при их получении?

**Решение 1.** Среднее арифметическое результата измерения

$$\bar{t}_{15} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = 20.404.$$

2. При определении стандартного отклонения результаты вспомогательных вычислений сведем в третью и четвертую графы табл. 9.\*

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{Q}_{15})^2} = 0.033$$

3. Больше чем на  $3S_t = 0,099$  от среднего арифметического отличается восьмое значение. Следовательно, оно является ошибочным и должно быть отброшено.

4. Без восьмого значения

$$\bar{t}_{14} = 20.411$$

5. Результаты вспомогательных вычислений при повторном определении стандартного отклонения сведем в пятую и шестую графы табл.9.

$$S_t = 0,016$$

6. Ни одно из оставшихся значений  $t_i$  не отличается теперь от среднего арифметического больше чем на  $3S_t = 0,048$ . Можно, следовательно, считать, что среди них нет ошибочных.

Универсальный метод отыскания эффективных оценок числовых характеристик любых законов распределения вероятности случайных чисел или величин разработан Р.А. Фишером. Он называется методом максимального правдоподобия. Сущность этого метода заключается в следующем.

Многомерная плотность распределения вероятности системы случайных значений  $p(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  рассматривается как функция числовых характеристик закона распределения вероятности.

\* При проведении подобных вычислений рекомендуется пользоваться микрокалькулятором

Эта функция

$$L = p(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2, \dots),$$

называемая функцией правдоподобия, показывает, насколько то или иное значение каждой числовой характеристики „более правдоподобно“, чем другие. Функция правдоподобия достигает максимума при значениях переменных, являющихся их наиболее эффективными оценками. Последние, следовательно, находятся из условия

$$L = p(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2, \dots) = \max,$$

что равносильно совместному решению уравнений

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = 0;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma_Q^2} = 0;$$

.....

Для упрощения вычислений функцию правдоподобия иногда логарифмируют. Так как логарифм является монотонной функцией, то L и ln L достигают экстремума при одних и тех же значениях переменных. Наиболее эффективные оценки числовых характеристик, следовательно, могут определяться из совместного решения уравнений

$$\frac{\partial \ln L}{\partial Q} = 0;$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_Q^2} = 0;$$

.....

**Пример 25.** Определить методом максимального правдоподобия эффективные оценки среднего значения и дисперсии результата измерения, независимые равноточные значения которого подчиняются нормальному закону распределения вероятности.

**Решение 1.** Плотность распределения вероятности каждого отдельного значения результата измерения

$$p(Q_i, \bar{Q}, \sigma_Q^2) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q_i - \bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}}.$$

Поскольку все значения независимые, плотность распределения вероятности системы случайных величин

$$p(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2) = p(Q_1, \bar{Q}, \sigma_Q^2) p(Q_2, \bar{Q}, \sigma_Q^2) \dots p(Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2)$$

Таким образом функция правдоподобия

$$L(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2) = \left( \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \right)^n e^{-\frac{1}{2\sigma_Q^2} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

2. Логарифм функции правдоподобия

$$\ln L = -\frac{n}{L} \ln 2\pi - \frac{n}{2} \ln \sigma_Q^2 - \frac{1}{2\sigma_Q^2} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2$$

3. Уравнения, из которых находятся оценки:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \bar{Q}} = \frac{1}{\sigma_Q^2} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) = 0;$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_Q^2} = -\frac{n}{2\sigma_Q^2} + \frac{1}{2\sigma_Q^4} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 = 0.$$

4. Решение первого уравнения

$$\bar{Q} = \bar{Q}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

совпадает с результатом, полученным методом наименьших квадратов.

5. Решение второго уравнения

$$\bar{\sigma}_Q^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2$$

дает хотя и эффективную, но как мы видели, несколько смещенную оценку. К несмещенной оценке приводит введение поправочного множителя  $\frac{n}{n-1}$ .

### **3.6.2. Проверка нормальности закона распределения вероятности результата измерения**

При обработке экспериментальных данных существенное значение имеет вопрос о том, подчиняется или нет результат измерения нормальному закону распределения вероятности. Непротиворечивость такой гипотезы должна быть обязательно проверена.

Поскольку ошибки искажают эмпирический закон распределения вероятности результата измерения, постольку проверка предположения об его нормальности производится после исключения ошибок.

Правдоподобна или нет гипотеза о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, можно определить уже по виду гистограммы, построенной на основании экспериментальных данных. Порядок ее построения рассмотрен в примере 13. Наглядность отображения гистограммой закона распределения вероятности результата измерения зависит от соблюдения следующих правил при ее построении:

1) интервалы  $\Delta Q$ , на которые разбивается ось абсцисс, следует выбирать, по возможности, одинаковыми;

2) число интервалов  $k$  устанавливать в соответствии со следующими рекомендациями:

Число измерений	Рекомендуемое число интервалов
40-100	7-9
100-500	8-12
500-1000	10-16
1000-10000	12-22

3) масштаб гистограммы выбирать так, чтобы ее высота относилась к основанию, примерно, как 5 к 8.

Иногда по виду гистограммы можно с большой уверенностью заключить, что результат измерения подчиняется (или не подчиняется) нормальному закону распределения вероятности. Если, например, гистограмма имеет вид, показанный на рис. 41, а, то результат измерения определенно не подчиняется нормальному закону. Если же гистограмма имеет вид, показанный на рис. 41, б, то возникает сомнение: достаточно ли хорошо она соответствует теоретической кривой нормального закона распределения плотности вероятности, показанной пунктиром? Для разрешения этого сомнения нужно иметь правило, руководствуясь которым можно было бы принимать то или иное решение.

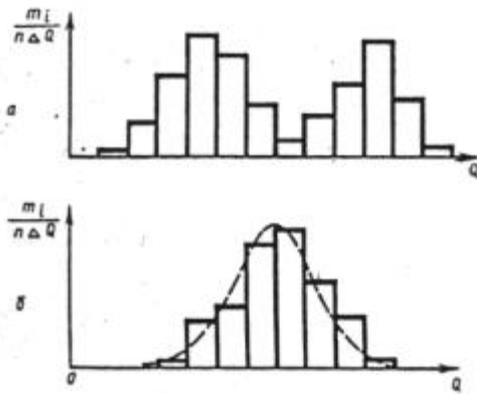


Рис. 41. Гистограммы, построенные по экспериментальным данным

Существует несколько так называемых критериев согласия, по которым проверяются гипотезы о соответствии экспериментальных данных тому или иному закону распределения вероятности результата измерения. Наиболее распространенным из них является критерий К. Пирсона. При использовании этого критерия за меру расхождения экспериментальных данных с теоретическим законом распределения вероятности результата измерения принимается сумма квадратов отклонения частот  $m_i/n$  от теоретической вероятности  $P_i$  попадания отдельного значения результата измерения в  $i$ -й интервал, причем каждое слагаемое берется с коэффициентом  $n/P_i$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n}{P_i} \left( \frac{m_i}{n} - P_i \right)^2.$$

Если расхождение случайно, то  $\chi^2$  подчиняется  $\chi^2$ -распределению (хи-квадрат распределению К. Пирсона). Кривые интегральной функции этого распределения представлены на рис. 42\*. Интегральная функция определяет вероятность того, что случайное число примет значение, меньшее аргумента этой функции. Поэтому, задавшись значением интегральной функции распределения К. Пирсона  $F(\chi_0^2)$ , можно проверить, больше или меньше ее аргумента  $\chi_0^2$  (см. рис. 42) вычисленное значение  $\chi^2$ . Если меньше, то с выбранной вероятностью  $\chi^2$  можно считать случайным числом, подчиняющимся  $\chi^2$ -распределению К. Пирсона, т. е. признать случайным расхождение между эмпирической и теоретической плотностью распределения вероятности результата измерения. Если же окажется, что  $\chi^2 > \chi_0^2$ , то с той же вероятностью придется признать, что  $\chi^2$  не подчиняется распределению К. Пирсона, т. е. гипотеза о соответствии эмпирического закона распределения вероятности теоретическому не подтверждается.

**Пример 26.** 100 независимых числовых значений результата измерения напряжения цифровым вольтметром, каждое из которых повторилось  $m$  раз приведены в первой графе табл. 10.

Таблица 10

$U$	$m$	$mU$	$U - \bar{U}_{100}$	$(U - \bar{U}_{100})^2$	$m(U - \bar{U}_{100})^2$
-----	-----	------	---------------------	-------------------------	--------------------------

8,30	1	8,30	-0,33	0,1089	0,0784	0,1089	0,1568
8,35	2	16,70	-0,28	0,0529	0,0324	0,2116	0,1620
8,40	4	33,60	-0,23	0,0169		0,1352	
8,45	5	42,25	-0,18	0,0064		0,0640	
8,50	8	68,00	-0,13	0,0009		0,0162	
8,55	10	85,50	-0,08	0,0004		0,0068	
8,60	18	154,80	-0,03	0,0049		0,0588	
8,65	17	147,05	0,02	0,0144		0,1296	
8,70	12	104,40	0,07	0,0289		0,2023	
8,75	9	78,75	0,12	0,0484		0,2904	
8,80	7	61,60	0,17	—		—	
8,85	6	53,10	0,22	0,1024		0,1024	
8,90	0	—	—				
8,95	1	8,95	0,32				

\* Здесь  $k$  соответствует числу интервалов только при проверке соответствия закона распределения вероятности результата измерения нормальному закону.

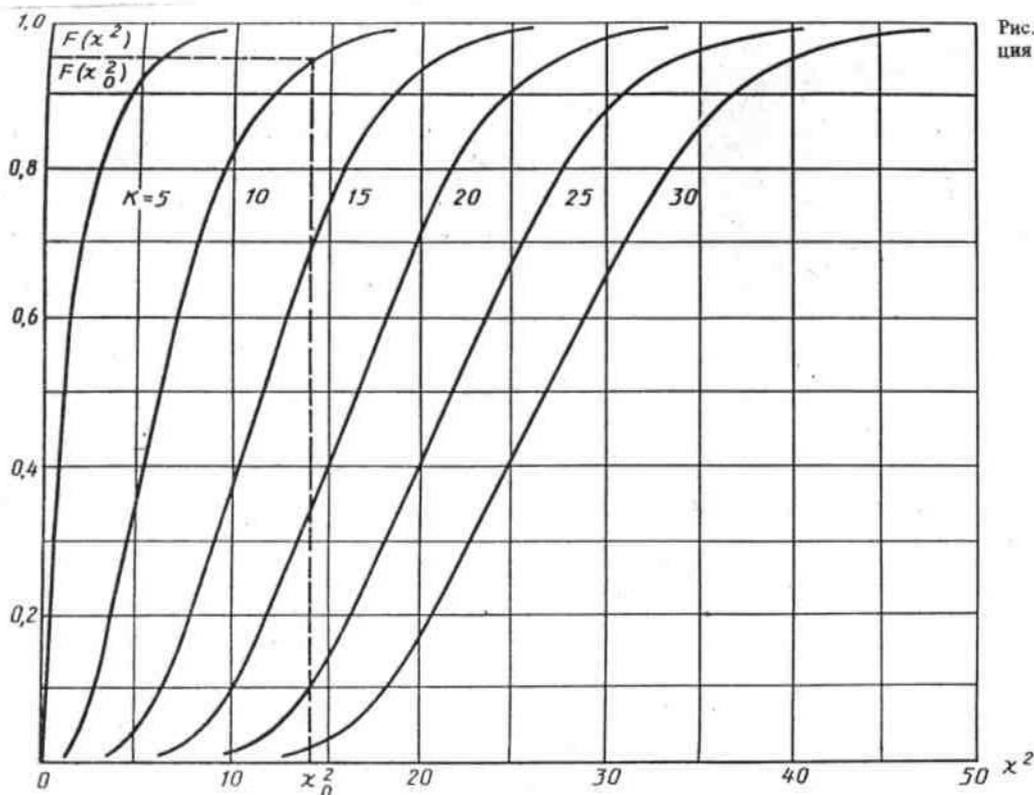


Рис. 42. Интегральная функция распределения вероятности К. Пирсона

Проверить гипотезу о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

**Решение. 1.** Используя результаты вспомогательных вычислений, сведенные в третьей графах, найдем стандартное отклонение результата измерения:

$$\bar{U}_{100} = 8.63.$$

2. Используя результаты вспомогательных вычислений в четвертой, пятой и шестой графах, найдем стандартное отклонение результата измерения:

$$S_U = 0.127.$$

3. Ни одно из значений результата измерения не отличается от среднего арифме-

тического больше чем на  $3S_u = 0,381$ . Ошибок, следовательно, можно считать, что нет.

4. При использовании критерия К. Пирсона в каждом интервале должно быть не меньше пяти независимых значений результата измерения. В соответствии с этим образуем интервалы так, как это представлено во второй графе табл. 11.

Таблица 11

$i$	Интервалы ( $U_{i-1}$ ; $U_i$ )	$m_i$	$t_i$	$L(t_i)$	$P_i$	$m_i - nP_i$	$\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$
1	( $-\infty$ ; 8,425)	7	-1,614	-0,4467	0,0533	1,67	0,523
2	(8,425; 8,475)	5	-1,220	-0,3888	0,0579	-0,79	0,108
3	(8,475; 8,525)	8	-0,827	-0,2959	0,0929	-1,29	0,179
4	(8,525; 8,575)	10	-0,433	-0,1676	0,1283	-2,83	0,624
5	(8,575; 8,625)	18	-0,039	-0,0156	0,1520	2,80	0,516
6	(8,625; 8,675)	17	0,354	0,1383	0,1539	1,61	0,168
7	(8,675; 8,725)	12	0,748	0,2728	0,1345	-1,45	0,157
8	(8,725; 8,775)	9	1,142	0,3733	0,1005	-1,05	0,110
9	(8,775; 8,825)	7	1,536	0,4377	0,0644	0,56	0,048
10	(8,825; $+\infty$ )	7	$+\infty$	0,5000	0,0623	0,77	0,095

5. Определим, на сколько  $S_u$  отстоит от среднего арифметического правая граница  $U_i$  каждого интервала:

$$t_i = \frac{U_i - U_{100}}{S_U} = \frac{U_i - 8,63}{0,127}.$$

Полученные значения параметра  $t$  внесем в четвертую графу табл. 11.

6. По значению  $t_i$  из графика на рис. 29 можно определить, с какой вероятностью отдельное значение результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, попадает в интервал  $\bar{V}_{100} \pm U_i$ . С вероятностью в два раза меньшей оно попадает в левую или правую половину этого интервала. Эта вероятность, как показано в разд. 3.3.4, определяется интегралом вероятности — функцией Лапласа  $L(t_i)$ , так что для повышения точности расчетов можно пользоваться не графиком, а таблицами функции Лапласа. Полученные из таблиц значения  $L(t_i)$  занесены в пятую графу табл. 11.

7. Теоретическая вероятность  $P_i$  попадания в  $i$ -й интервал отдельного значения результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, очевидно равна

$$P_i = L(t_i) - L(t_{i-1}).$$

Принимая во внимание, что  $L(-\infty) = -0,5$ , а  $L(\infty) = 0,5$ , поместим рассчитанные значения  $P_i$  в шестую графу табл. 11.

8. В седьмую и восьмую графы внесены результаты остальных вспомогательных вычислений. Суммирование чисел в восьмой графе дает

$$\chi^2 = 2,528.$$

9. Из графика на рис. 42 видно, что рассчитанное значение  $\chi^2 \ll \chi_0^2$ , соответствующего, например, вероятности 0,95. Таким образом можно принять гипотезу о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону.

Критерий согласия К. Пирсона широко применяется для проверки гипотез о том, что результат измерения подчиняется вполне определенному закону распределения вероятности. При  $\chi^2 \ll \chi_0^2$  соответствующая гипотеза принимается, при  $\chi^2 \geq \chi_0^2$  — отвергается. Однако даже выполнение неравенства  $\chi^2 \ll \chi_0^2$  не может служить

доказательством того, что результат измерения подчиняется этому закону распределения вероятности.

При использовании критерия К. Пирсона, как и в случае применения других критериев, возможны два рода ошибок. Ошибка первого рода состоит в отклонении верной гипотезы, а ошибка второго рода - в принятии неправильной. Для иллюстрации на рис. 43 показаны кривые плотности распределения вероятности величины  $\chi^2$  в случаях, когда проверяемая гипотеза верна — кривая 1, и когда неверна — кривая 2. Если вероятности, с которой выносятся решение, соответствует значение  $\chi_0^2$ , то при всех  $\chi^2 < \chi_0^2$  гипотеза будет приниматься, а при всех  $\chi^2 \geq \chi_0^2$  — отклоняться. Вероятности ошибок первого и второго родов при этом:

$$P_I = \int_{\chi_0^2}^{\infty} p_1(\chi^2) d\chi^2;$$

$$P_{II} = \int_{-\infty}^{\chi_0^2} p_2(\chi^2) d\chi^2.$$

Обе они зависят от значения  $\chi_0^2$ , которое в свою очередь определяется вероятностью  $P = F(\chi_0^2)$ , с которой принимается решение. С повышением этой вероятности значение  $\chi_0^2$  увеличивается, вероятность ошибки первого рода уменьшается, а ошибки второго рода — возрастает, и наоборот. Таким образом, нецелесообразно принимать решение с очень высокой степенью вероятности. Обычно  $P$  выбирается равной 0,9 ... 0,95.

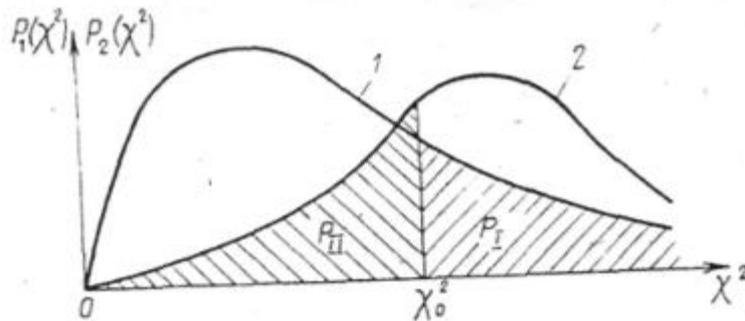


Рис. 43. Графики плотности распределения вероятности  $\chi^2$  в случаях, когда проверяемая гипотеза верна (1) и неверна (2)

При проверке нормальности закона распределения вероятности результата измерения применение критерия К. Пирсона дает хорошие результаты только, если  $n > 40 \dots 50$ . При  $10 \dots 15 < n < 40 \dots 50$  применяется так называемый составной критерий. Сначала рассчитывается

$$d = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - \bar{Q}_n|}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2}}$$

и проверяется выполнение условия

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max},$$

где  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$  зависят от вероятности  $P^*$ , с которой принимается решение, и находятся по табл. 12.

Таблица 12

n	P* = 0,90		P* = 0,95		P* = 0,99	
	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>
11	0,7409	0,8899	0,7153	0,9073	0,6675	0,9359
16	7452	8733	7236	8884	6829	9137
21	7495	8631	7304	8768	6950	9001
26	7530	8570	7360	8686	7040	8901
31	7559	8511	7404	8625	7110	8827
36	7583	8468	7440	8578	7167	8769
41	7604	8436	7470	8540	7216	8722
46	7621	8409	7496	8508	7256	8682
51	7636	8385	7518	8481	7291	8648

Если это условие соблюдается, то дополнительно проверяются „хвосты“ теоретического и эмпирического законов распределения вероятности. При  $10 < n < 20$  считается допустимым отклонение одного из независимых значений результата измерения  $Q_i$  от среднего арифметического больше чем на  $2,5 S_Q$ , при  $20 < n < 50$  — двух, что соответствует доверительной вероятности  $P^{**} \approx 0,98$ .

Несоблюдения хотя бы одного из двух условий достаточно для того, чтобы гипотеза о нормальности закона распределения вероятности результата измерения была отвергнута. В противном случае гипотеза принимается с вероятностью  $P \geq P^* + P^{**} - 1$ .

При  $n < 10 \dots 15$  гипотеза о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, не проверяется. Решение принимается на основании анализа априорной информации.

### 3.6.3. Обработка экспериментальных данных, подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности

Если итоги проверки большого массива экспериментальных данных по критерию  $\chi^2$  не противоречат гипотезе о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то можно считать, что среднее арифметическое значение результата измерения также подчиняется нормальному закону, а среднее значение среднего арифметического (см. разд. 3.6.1)

$$M(\bar{Q}_n) = \bar{Q}.$$

Как было показано в разд. 3.3.4, ни одно из случайных значений, подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности, не может отличаться от среднего значения больше чем на половину доверительного интервала. На основании формулы (9) можно написать

$$\begin{aligned} P\{\bar{Q} - t\sigma_{\bar{Q}} \leq \bar{Q}_n \leq \bar{Q} + t\sigma_{\bar{Q}}\} &= P\{-\bar{Q}_n - t\sigma_{\bar{Q}} \leq -\bar{Q} \leq -\bar{Q}_n + t\sigma_{\bar{Q}}\} = \\ &= P\{\bar{Q}_n - t\sigma_{\bar{Q}} \leq \bar{Q} \leq \bar{Q}_n + t\sigma_{\bar{Q}}\} = 2F(t) - 1. \end{aligned}$$

Заменяя среднее квадратическое отклонение среднего арифметического его оценкой

$$S_{\bar{Q}} = \frac{S_Q}{\sqrt{n}},$$

вытекающей из выражения (11), и принимая во внимание, что, как показано в разд. 3.4,  $\bar{Q} = Q$ , получим:

$$P\{\bar{Q}_n - \varepsilon \leq Q \leq \bar{Q}_n + \varepsilon\} = 2F(t) - 1,$$

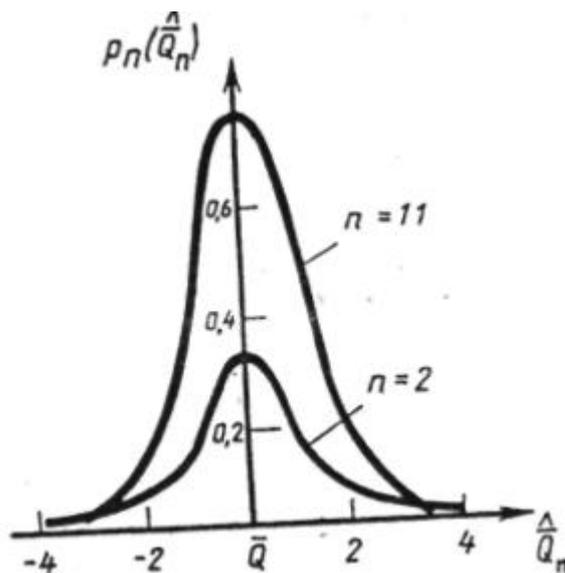
где  $\varepsilon \approx tS_{\bar{Q}}$  — половина доверительного интервала, а  $t$  при выбранной до-

верительной вероятности определяется по верхней кривой на рис.29.

Порядок соответствующих действий показан на рис. 40. Сначала находится стандартное отклонение среднего арифметического, затем выбирается доверительная вероятность и определяется соответствующее ей значение  $t$  по верхней кривой на рис. 29. С выбранной доверительной вероятностью значение измеряемой величины  $Q$  не отличается от среднего арифметического значения результата измерения больше чем на половину доверительного интервала  $\varepsilon \approx tS_{\bar{Q}}$ .

При небольшом объеме экспериментальных данных среднее арифметическое значение результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, само подчиняется закону распределения вероятности Стьюдента (псевдоним В.С. Госсета) с тем же средним-значением  $\bar{Q} = Q$ . Графики плотности распределения вероятности, соответствующие этому закону, показаны на рис. 44. При увеличении  $n$  распределение вероятности Стьюдента быстро приближается к нормальному, становясь почти неотличимым от него уже при  $n > 40 \dots 50$ .

Рис. 44. Графики плотности распределения вероятности среднего арифметического  $\bar{Q}_n$  при различных значениях  $n$



Доверительная вероятность того, что любое случайное значение среднего арифметического, подчиняющегося закону распределения вероятности Стьюдента, не отличается от среднего значения больше чем на половину доверительного интервала

$$P\{\bar{Q} - t\sigma_{\bar{Q}} \leq \bar{Q}_n \leq \bar{Q} + t\sigma_{\bar{Q}}\} = 2S_n(t) - 1,$$

где  $S_n(t)$  — интегральная функция распределения вероятности Стьюдента. По этой формуле на рис. 45 построены графики, показывающие, какое значение имеет объем выборки  $n$ . При  $n=4$ , например, вероятность того, что никакое значение среднего арифметического, подчиняющегося закону распределения вероятности Стьюдента, не отличается от среднего значения больше чем на  $2\sigma_{\bar{Q}}$ , составляет 0,86; при  $n=6$  она равна 0,9; при  $n=10$  получается равной 0,924; при  $n=20$  уже 0,94 и т. д. Верхняя кривая на рис. 45 соответствует условию  $n > 40 \dots 50$  и практически не отличается от верхней кривой на рис.29.

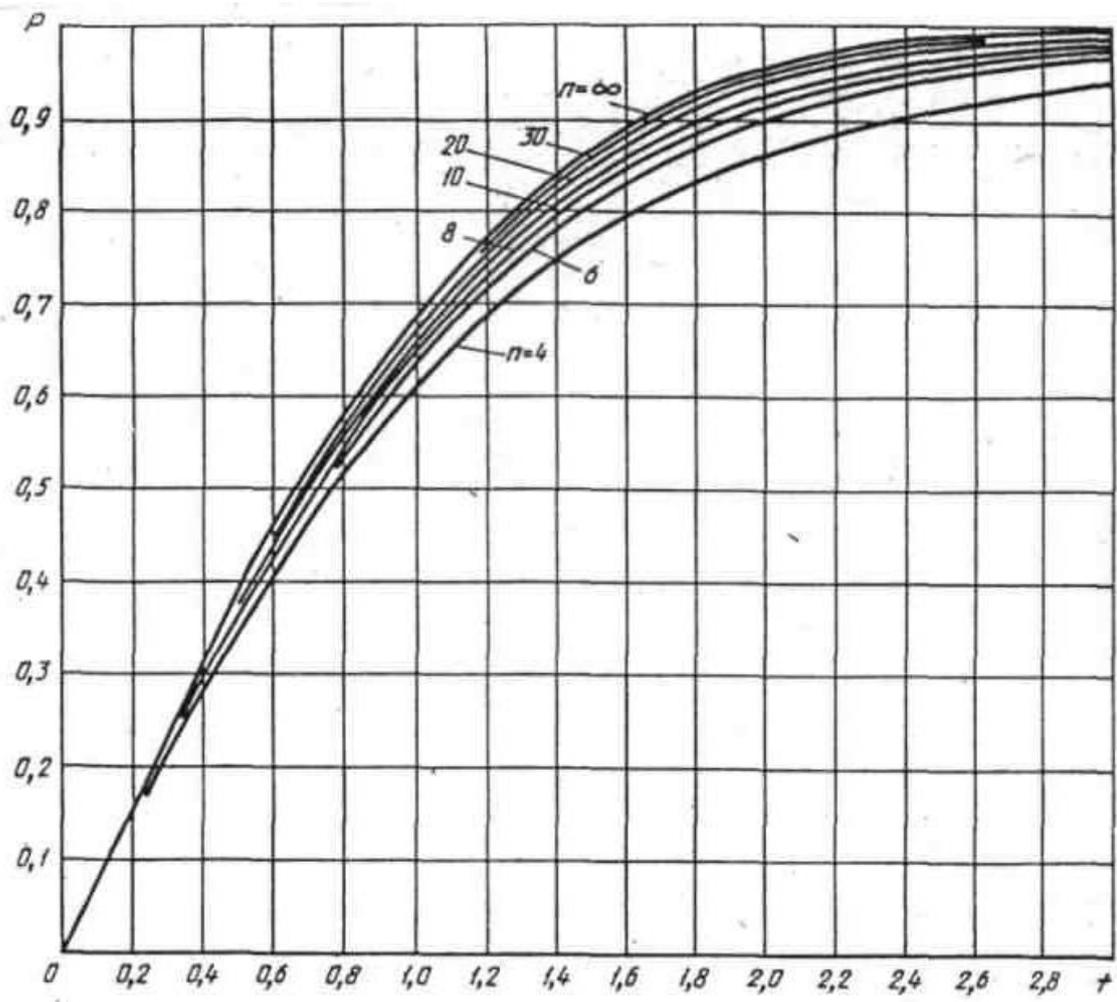


Рис. 45. Вероятность попадания среднего арифметического в окрестность среднего значения

По аналогии с предыдущим нетрудно показать, что

$$P\{\bar{Q}_n - \varepsilon \leq Q \leq \bar{Q}_n + \varepsilon\} = 2S_n(t) - 1,$$

где по-прежнему  $\varepsilon \approx tS_Q$  — половина доверительного интервала, а  $t$  при

выбранной доверительной вероятности определяется по графику на рис.45.

Порядок действий при обработке небольшого объема экспериментальных данных отличается только тем, что после выбора доверительной вероятности  $t$  с учетом  $n$  определяется по графику на другом рисунке.

При совсем незначительном количестве экспериментальных данных ( $n \leq 10...15$ ) и принятой гипотезе о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, выявление ошибок по "правилу трех сигм" не производится. Остальной порядок действий (см. рис. 40) не отличается от предыдущего. Доверительный интервал при фиксированной доверительной вероятности, как это видно из графика на рис. 45, с уменьшением объема экспериментальных данных расширяется; точность измерения при этом, следовательно, снижается, приближаясь к точности однократного измерения при  $n \rightarrow 1$ .

**3.6.4. Обработка экспериментальных данных, не подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности**

Если гипотеза о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности отвергается, то существует несколько возможностей.

1. При особо точных и ответственных измерениях может быть поставлена задача определения закона распределения вероятности результата измерения. Однозначного решения она не имеет, и вывод о том, что экспериментально найденная плотность распределения вероятности подчиняется какому-то конкретному закону, может быть сделан лишь с той или иной вероятностью. Основные требования к проведению исследования, порядок математической обработки эмпирических данных и выбора математической модели распределения установлен специальным документом Госстандарта СССР МИ 199-79. Это довольно сложная и трудоемкая процедура, требующая значительных дополнительных затрат, и необходимость ее в каждом отдельном случае должна быть технико-экономически обоснована.

После определения с той или иной вероятностью закона распределения вероятности результата измерения, методом максимального правдоподобия см. разд. 3.6.1) устанавливаются оценки его числовых характеристик и на основе их использования разрабатывается вся последующая процедура обработки экспериментальных данных. Такая обработка называется оптимальной и обеспечивает наивысшую точность при выбранных критериях.

2. Если закон распределения вероятности результата измерения незначительно отличается от нормального (чаще всего это отличие проявляется, в повышенной вероятности больших отклонений от среднего значения) то применяются так называемые робастные (устойчивые к отклонениям от нормального закона распределения вероятности) методы обработки экспериментальных данных. Все они основаны на ослаблении влияния больших отклонений от среднего значения на его оценку.

В простейшем случае большие отклонения просто отбрасываются, что приводит к усеченному нормальному закону распределения вероятности результата измерения (см. табл. 8). В этом случае оценкой среднего значения становится медиана закона распределения вероятности результата измерения

$$\bar{Q}_M = \text{med}Q = \begin{cases} \frac{Q_{n+1}}{2} \text{ при } \_ \text{нечетном } \_ n; \\ \frac{1}{2} \left( Q_{\frac{n}{2}} + Q_{\frac{n}{2}+1} \right) \text{ при } \_ \text{четном } \_ n. \end{cases}$$

В некоторых случаях большие отклонения не отбрасываются, а заменяются на ближайшие из оставшихся значений результата измерения, либо включаются в обработку с малыми весовыми коэффициентами. Порядок дальнейшей обработки экспериментальных данных не меняется. Предельным случаем усечения является оставление одного (при нечетном  $n$ ) или двух (при четном  $n$ ) значений результата измерения.

Среднее арифметическое не относится к устойчивым (робастным) оценкам. Объясняется это тем, что даже очень редкие большие отклонения (выбросы), не подчиняющиеся нормальному закону распределения вероятности, играют по критерию (12) существенную роль. Операция возведения в квадрат делает их доминирующими среди слагаемых, а эффективность оценки, полученной методом наименьших квадратов, резко падает.

Ослабление влияния больших отклонений на оценку среднего значения (т. е. повышение ее устойчивости) достигается при синтезе оценки по критерию эффективности, в котором квадратичная зависимость заменена на более слабую. Показателем эффективности (мерой рассеяния), в частности, может быть сумма отклонений от среднего значения или некоторая ее функция. Оценки, синтезированные по критерию

$$\sum_{j=1}^m \psi(\bar{Q}_j - \bar{Q}) = \min ,$$

называются М-оценками. Функция  $\psi(\bar{Q}_j - \bar{Q}) \geq 0$  при малых значениях аргумента

выбирается близкой к квадратичной, а при больших — возрастающей медленнее, чем квадратичная. В зависимости от вида этой функции различают робастные оценки Хубера, Хампела, Андрюса, Тьюки и другие. Все они слабо зависят от выбросов и отклонений от нормального закона распределения вероятности, а в случае, когда результат измерения подчиняется нормальному закону, близки к оценке среднего значения, полученных методом наименьших квадратов.

Разновидностью М-оценок являются  $l^P$ -оценки, получаемые при

$$\psi(\bar{Q}_j - \bar{Q}) = |\bar{Q}_j - \bar{Q}|^P, \quad 1 \leq P < 2.$$

В отличие от перечисленных М-оценок они более эффективны вблизи других законов распределения вероятности, отличных от нормального. В частности,  $l^1$ -оценка, или оценка наименьших модулей, получаемая из условия

$$\sum_{j=1}^m |\bar{Q}_j - \bar{Q}| = \min$$

и совпадающая с медианой, оптимальна при экспоненциальном законе распределения вероятности результата измерения.

Используются и другие робастные оценки.

3. С невысокой точностью значение измеряемой величины можно установить даже не интересуясь законом распределения вероятности результата измерения. Среднее арифметическое в этом случае может оказаться неэффективной оценкой, но его все равно целесообразно использовать, так как при всех обстоятельствах дисперсия среднего арифметического согласно соотношению (11) в  $n$  раз меньше дисперсии результата измерения, оценка которой на основании пятого свойства дисперсии (см. разд. 3.2) может быть представлена в виде

$$S_{\bar{Q}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i^2 - \bar{Q}_n^2.$$

Стандартное отклонение среднего арифметического при любом законе распределения вероятности

$$S_{\bar{Q}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i^2 - \bar{Q}_n^2} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n Q_i^2 - \bar{Q}_n^2} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^2 - \bar{Q}_n^2)}.$$

Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , по нижней кривой на рис. 29 можно определить, на сколько  $S_{\bar{Q}}$  среднее арифметическое  $\bar{Q}_n$  может отличаться от среднего значения результата измерения  $\bar{Q}$  при любом законе распределения вероятности. С наименьшей вероятностью

$$\bar{Q}_n - \varepsilon \leq Q \leq \bar{Q}_n + \varepsilon$$

где, как обычно,  $\varepsilon \approx tS_{\bar{Q}}$  - половина доверительного интервала.

Соответствующий порядок действий показан на рис.40.

### 3.6.5. Обеспечение требуемой точности измерений

Многokратное измерение одной и той же величины постоянного размера позволяет обеспечить требуемую точность. Поскольку ширина доверительного интервала зависит от количества экспериментальных данных', то, увеличивая  $n$ , можно добиться выполнения наперед заданного условия

$$\varepsilon \leq \varepsilon_0$$

Упрощенный алгоритм обработки экспериментальных данных в этом случае показан на рис. 46.

**Пример 27.** В табл. 13 приведены 10 независимых числовых значений результата

измерения линейного размера (в сантиметрах).

Таблица 13

$i$	$l_i$	$l_i - \bar{l}_{10}$	$(l_i - \bar{l}_{10})^2$
1	392	0	0
2	391	-1	1
3	395	3	9
4	392	0	0
5	389	-3	9
6	396	4	16
7	389	-3	9
8	389	-3	9
9	393	1	1
10	394	2	4

Определить его длину, если с вероятностью 0,95 точность измерения должна быть не ниже  $2\varepsilon_0 = 2$  см.

**Решение.** 1. Используя вспомогательные вычисления, сведенные в табл. 13, получим

$$\bar{l}_{10} = 392; S_l = 2.5.$$

2. Больше чем на  $3 S_l = 7,5$  от среднего арифметического не отличается ни одно из числовых значений результата измерения. Таким образом, следует признать, что ошибок нет.

3. Допустим, есть основание полагать, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

4. Стандартное отклонение среднего арифметического

$$S_{\bar{l}} = \frac{2.5}{\sqrt{10}} \approx 0.79.$$

5. При  $n = 10$  и  $P = 0,95$  по графику на рис. 45 находим  $t = 2.3$ .

6. Так как

$$\varepsilon = t S_{\bar{l}} = 1.82 > \varepsilon_0 = 1,$$

то необходимо увеличить количество экспериментальных данных.

7. Пусть  $l_{11} = 390$ . Тогда

$$\bar{l}_{11} = 391.8; S_l = 2.48.$$

8. Для проверки нормальности закона распределения вероятности результата измерения используем составной критерий. При  $n = 11$  и любой вероятности в табл. 12

$$d_{\min} < d = 0.8526 < d_{\max},$$

и ни одно из числовых значений  $l_i$ , не отличается от 391,8 больше чем на  $2.5S_l = 6.2$ . Таким образом, результаты проверки не противоречат гипотезе о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

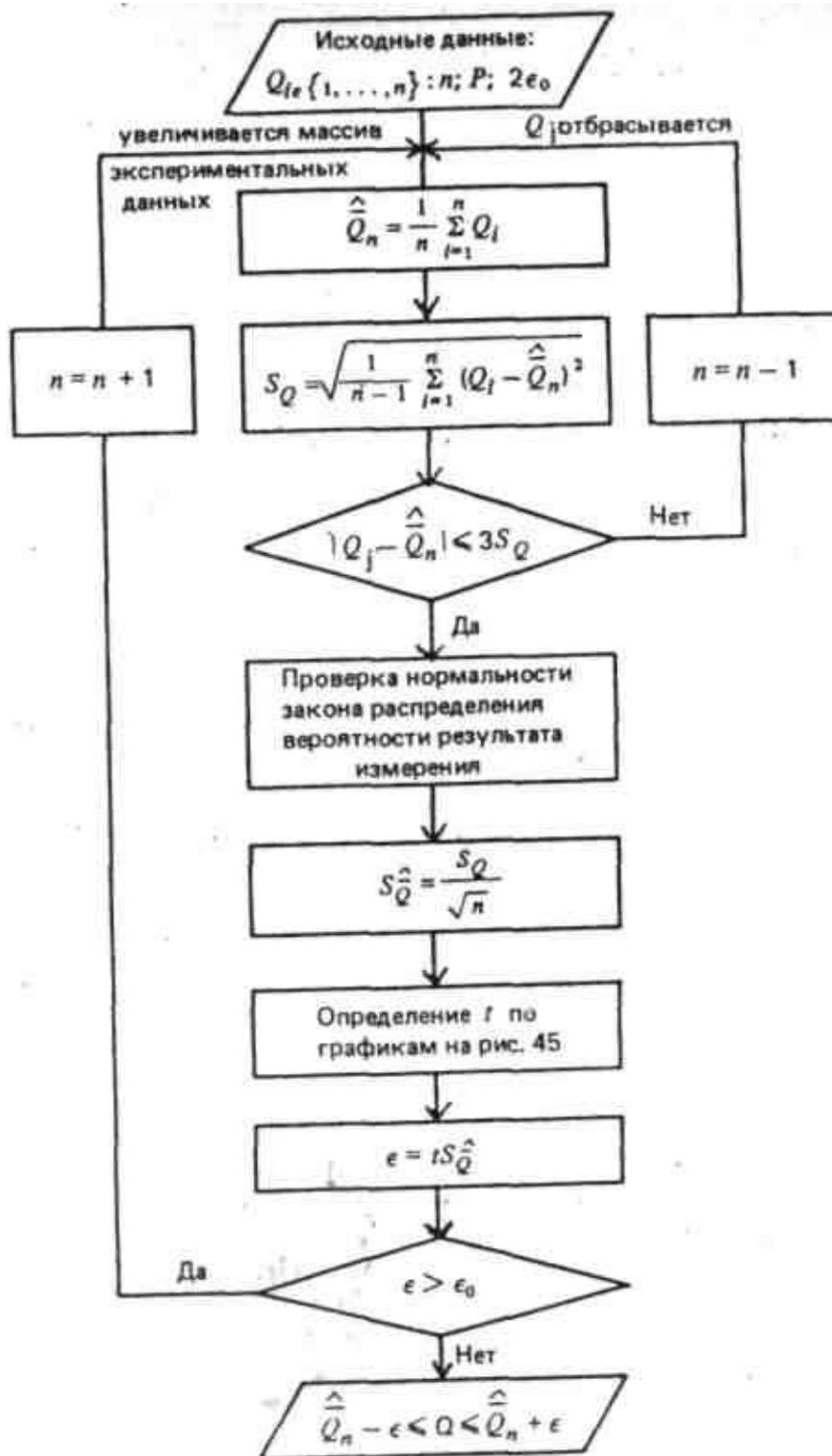


Рис. 46. Обеспечение требуемой точности при многократном измерении

9. Стандартное отклонение среднего арифметического при  $n=11$

$$S_i = \frac{2.48}{\sqrt{11}} \approx 0.75.$$

10. При  $n=11$  и  $P=0,95$   $t=2,2$ . Так как

$$\varepsilon = tS_i = 1.65 > \varepsilon_0 = 1,$$

то необходимо еще больше увеличить количество экспериментальных данных.

11. Результаты последующих действий приведены в табл.14

Таблица 14

$n$	$l_n$	$\bar{l}_n$	$S_l$	$S_i$	$t$	$\varepsilon$
12	392	391,8	2,37	0,68	2,2	1,5
13	391	391,8	2,29	0,63	2,2	1,4
14	395	392	2,35	0,63	2,15	1,35
15	391	391,9	2,28	0,59	2,15	1,27
16	393	392	2,22	0,56	2,15	1,2
17	391	391,9	2,23	0,54	2,1	1,13
18	394	392	2,16	0,51	2,1	1,07
19	392	392	2,15	0,49	2,1	1,04
20	392	392	2,14	0,48	2,1	1,01
21	391	392	2,13	0,47	2,1	0,98

Таким образом, потребовалось получить 21 числовое значение результата измерения для того, чтобы с вероятностью 0,95 установить, что  $391 \text{ см} \leq l \leq 393 \text{ см}$ . Трудоемкость подобной работы требует автоматизации измерений и обработки экспериментальных данных.

На практике беспредельно повышать таким способом точность измерения не удастся, так как рано или поздно определяющим становится не рассеяние отсчета и, следовательно, показания средства измерений, а недостаток информации (выражающийся, например, в незнании точного значения поправок и т. п.). Накапливать экспериментальные данные и уменьшать за счет этого стандартное отклонение среднего арифметического значения показания имеет смысл лишь до тех пор, пока по критерию (10) им нельзя пренебречь по сравнению с аналогом среднего квадратического отклонения, учитывающим дефицит информации (рис. 47). Точность многократного измерения, следовательно, ограничивается дефицитом информации.

**Пример 28.** При каком количестве экспериментальных данных в примере 23 можно получить максимально возможную точность измерения?

**Решение.** 1. Для достижения максимальной точности количество экспериментальных данных нужно увеличивать до тех пор, когда по критерию (10) можно будет пренебречь  $\sigma_x$  по сравнению с  $u_v$ . Из условия

$$\sigma_x \leq \frac{1}{3} u_v$$

где  $\sigma_x = 2,0$  мм;  $u_v = 2,6$  мм, получим, что  $\sigma_x$  нужно уменьшить не менее чем в 2,3 раза.

2. Накопление экспериментальных данных позволит перейти к среднему арифметическому значению показания. Для того, чтобы его стандартное отклонение

$$S_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

оказалось не менее чем в 2,3 раза меньше  $\sigma_x$ , нужно получить  $n > 2,3^2 = 5$  независимых отсчетов (не считая ошибок).

3. Для достижения еще большей точности нужно провести исследования,

направленные на уточнение температурной поправки, и уменьшить  $u_v$ .

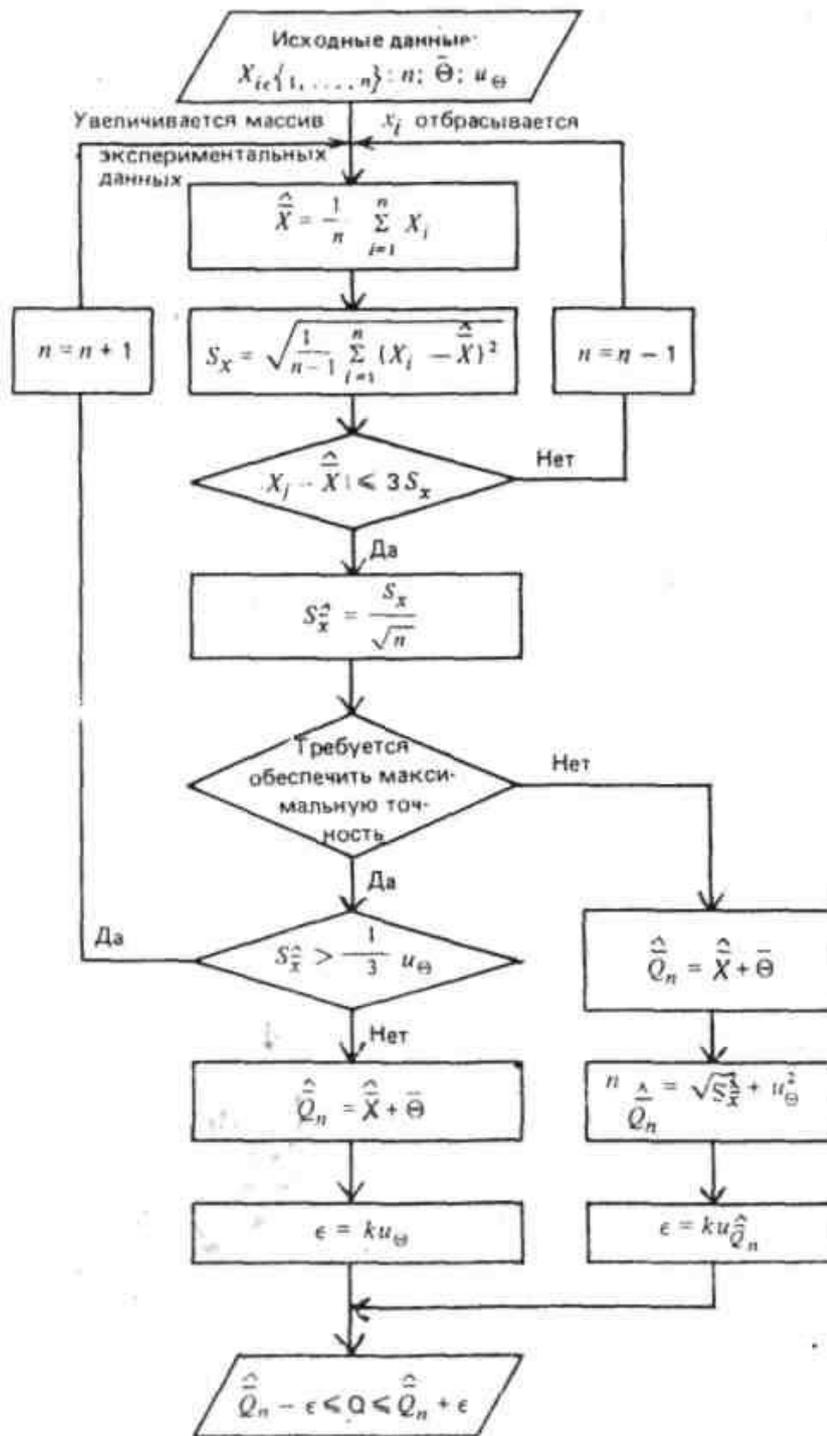


Рис. 47. Обработка экспериментальных данных при дефиците информации

### 3.7. МНОГОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ С НЕРАВНОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТСЧЕТА

При многократном измерении с неравноточными значениями отсчета, подчиняющимися нормальному закону распределения вероятности, функцию правдоподобия можно представить в виде

$$L = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \prod_{i=1}^n \sigma_{Q_i}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - \bar{Q})^2}{\sigma_{Q_i}^2}},$$

если все значения отсчета, полученные, например, с помощью разных средств измерений, являются независимыми. Для оценки среднего значения результата измерения удобнее перейти к логарифму функции правдоподобия

$$\ln L = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - \bar{Q})^2}{\sigma_{Q_i}^2} - C,$$

где  $C$  от  $\bar{Q}$  не зависит. Решая при  $\bar{Q} = \bar{Q}$  уравнение

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \bar{Q}} = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2} (Q_i - \bar{Q}) = 0,$$

получим

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2} Q_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2}}.$$

Это так называемое среднее взвешенное, в числителе которого отдельные значения результата измерения суммируются с „весами“, обратно пропорциональными их дисперсиям. Тем самым более точным значениям придается больший вес. Наличием суммы в знаменателе обеспечивается то, что в выражении

$$\bar{Q} = g_1 Q_1 + g_2 Q_2 + \dots + g_n Q_n$$

сумма всех весов

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1,$$

где нормированный вес каждого отдельного результата измерения

$$g_i = \frac{\frac{1}{\sigma_{Q_i}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2}}$$

Математическое ожидание среднего взвешенного

$$M(\bar{Q}) = M\left(\sum_{i=1}^n g_i Q_i\right) = M(g_i Q_i) = \sum_{i=1}^n g_i M(Q_i) = \bar{Q} \sum_{i=1}^n g_i = \bar{Q}.$$

Таким образом среднее взвешенное является несмещенной оценкой среднего значения результата измерения.

Дисперсия среднего взвешенного

$$\sigma^2 = D\left(\sum_{i=1}^n g_i Q_i\right) = \sum_{i=1}^n D(g_i Q_i) = \sum_{i=1}^n g_i^2 D(Q_i) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2}}.$$

**Пример 29.** Измерения образцовой меры длины, выполненные приборами разной точности, дали результаты, приведенные в табл. 15.

Известно, что результат измерения вертикальным оптиметром подчиняется нормальному закону распределения вероятности со стандартным отклонением 0,4 мкм; при измерениях машиной типа Цейсс — соответственно, 0,8 мкм; машиной типа Сип - 0,7 мкм; миниметром с ценой деления 1 мкм - 0,5 мкм. Каково отклонение размера от номинального значения?

Таблица 15

Порядковый номер измерения	Отклонение от номинального размера в мкм			
	Вертикальный оптиметр	Машина типа Цейсс	Машина типа Сип	Миниметр с ценой деления 1
1	11,3	10,8	9,8	10,4
2	—	11,1	10,7	11,2
3	—	10,9	—	10,1
4	—	—	—	9,9

**Решение.** Заменяя дисперсии в выражении для среднего взвешенного их оценками, имеем:

$$\overline{\Delta l} = \frac{\frac{1}{S_1^2} \Delta l_1 + \frac{1}{S_2^2} \Delta l_2 + \dots + \frac{1}{S_n^2} \Delta l_n}{\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} + \dots + \frac{1}{S_n^2}}$$

Подстановка известных значений  $S_i$  и измеренных отклонений  $\Delta l_i$  дает:

$$\overline{\Delta l} = \frac{\frac{1}{0.16} 11.3 + \frac{1}{0.64} (10.8 + 11.1 + 10.9) + \frac{1}{0.49} (9.8 + 10.7) + \frac{1}{0.25} (10.4 + 11.2 + 10.1 + 9.9)}{\frac{1}{0.16} + \frac{3}{0.64} + \frac{2}{0.49} + \frac{4}{0.25}} = 10.65 \text{ мкм.}$$

Стандартное отклонение  $\overline{\Delta l}$

$$S = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^2}}} = \sqrt{\frac{1}{31}} = 0.18 \text{ мкм.}$$

Поскольку все  $\Delta l_i$  подчиняются нормальному закону распределения вероятности, то нормальному закону подчиняется и их сумма. Поэтому с вероятностью  $P = 0,95$   $\overline{\Delta l} - 2S \leq \Delta l \leq \overline{\Delta l} + 2S$ . Окончательно:

$$10.3 \text{ мкм} \leq \Delta l \leq 11 \text{ мкм.}$$

### 3.8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НЕСКОЛЬКИХ СЕРИЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Иногда многократное измерение одной и той же величины постоянного размера производится в несколько этапов, разными людьми, в различных условиях, в разных местах и в разное время. Результат такого измерения определяется несколькими сериями полученных значений, которые в силу различных обстоятельств могут отличаться по

своим статистическим характеристикам. Серии называются однородными, если состоят из значений, подчиняющихся одному и тому же закону распределения вероятности. В противном случае серии считаются неоднородными.

Проверка однородности является обязательной при выборе способа совместной обработки результатов нескольких серий измерений. Организуется она обычно на уровне эмпирических моментов: сравниваются между собой средние арифметические и оценки дисперсий в каждой серии.

Различие между средними арифметическими  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  в двух разных сериях может быть случайным со средним значением, равным нулю, и дисперсией

$$\sigma_{\bar{Q}_2 - \bar{Q}_1}^2 = \frac{\sigma_{Q_1}^2}{n_1} + \frac{\sigma_{Q_2}^2}{n_2}.$$

Если экспериментальные данные в каждой серии подчиняются нормальному закону распределения вероятности, то при большом их числе ( $n_1, n_2 \gg 40 \dots 50$ ) нормальному закону подчиняются и средние арифметические  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  и их разность  $G = \bar{Q}_2 - \bar{Q}_1$ . При небольшом количестве экспериментальных данных в каждой серии средние арифметические  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  подчиняются закону распределения вероятности Стьюдента, но их разность при ( $n_1 + n_2 > 40 \dots 50$ ) можно считать, что уже подчиняется нормальному закону. Поэтому, задавшись доверительной вероятностью  $P$  и определив по верхней кривой на рис. 29 соответствующее ей значение  $t$ , находят доверительные границы  $\pm tS_G$ , за пределами которых не может оказаться разность  $\bar{Q}_2 - \bar{Q}_1$  если она случайная и подчиняется нормальному закону распределения вероятности (рис. 48). При несоблюдении этого условия нужно искать причину расхождения между  $\bar{Q}_2$  и  $\bar{Q}_1$  и в экспериментальные данные соответствующей серии вносить дополнительную поправку. Иногда большой массив экспериментальных данных (см. рис. 49) искусственно разбивают на две или большее количество серий для обнаружения посредством такой проверки прогрессирующего влияния какого-нибудь фактора.

Помимо выяснения значимости расхождения между средними арифметическими, проверка однородности серий включает сравнение оценок их дисперсий. Серии с незначимым различием оценок дисперсий называются равнорассеянными, с существенным различием — неравнорассеянными. Значимость различия оценок дисперсий в двух сериях, результаты измерения в которых подчиняются нормальному закону распределения вероятности, проверяется в порядке, приведенном на рис. 50, где первоначальные операции совпадают с показанными на рис. 48 и поэтому при проверке однородности серий выполняются один раз.

В процессе вычислений образуется отношение  $\psi$ , вероятность значений которого больших единицы, если это число случайное, подчиняется распределению Р.А. Фишера. Поэтому, выбрав значение интегральной функции распределения вероятности Р.А. Фишера, равным вероятности  $P$ , с которой принимается решение, можно проверить, больше или меньше ее аргумента  $\psi_0$ , вычисленное значение  $\psi$ . Если  $\psi < \psi_0$ , то различие оценок дисперсий в сериях можно признать случайным и с выбранной вероятностью  $P$  считать, что гипотеза о равнорассеянности серий не противоречит результатам ее проверки по критерию Р.А. Фишера. В противном случае эта гипотеза должна быть отвергнута. Значения аргумента интегральной функции распределения вероятности Р.А. Фишера приведены в табл. 16.

Равнорассеянные серии с незначимым различием между средними арифметическими считаются однородными. Если входящие в них экспериментальные результаты получены в одних и тех же условиях, это говорит о сходимости измерений, если в разных - о воспроизводимости. Под сходимостью понимается качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполненных в одинаковых условиях, под

воспроизводимостью - в разных (в различных местах, в разное время, различными методами и средствами). Если серии неоднородны (неравно рассеянные, или различие между средними арифметическими не может быть признано незначимым), об измерениях говорят, что они не сходятся (или не воспроизводятся).

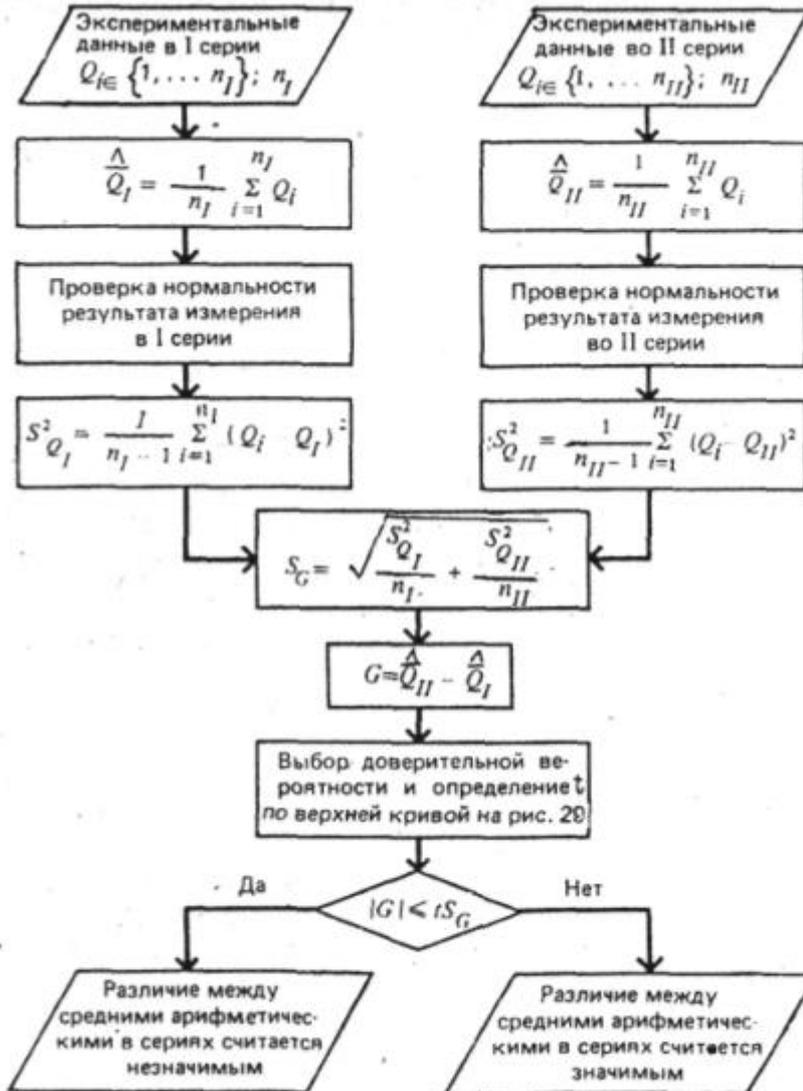


Рис. 48. Проверка значимости различия между средними арифметическими в двух сериях

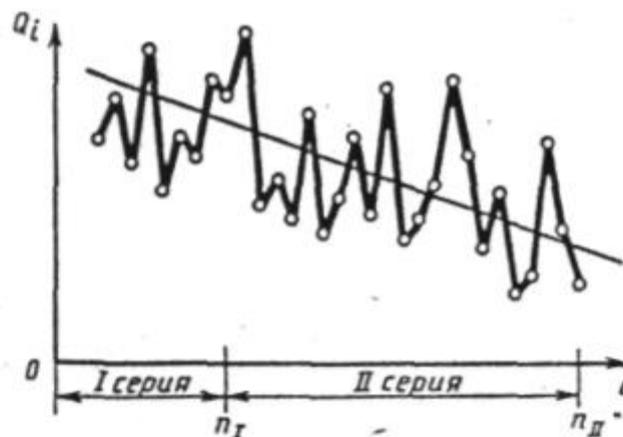


Рис. 49. Разделение массива экспериментальных данных на две серии с целью обнаружения прогрессирующего действия влияющего фактора

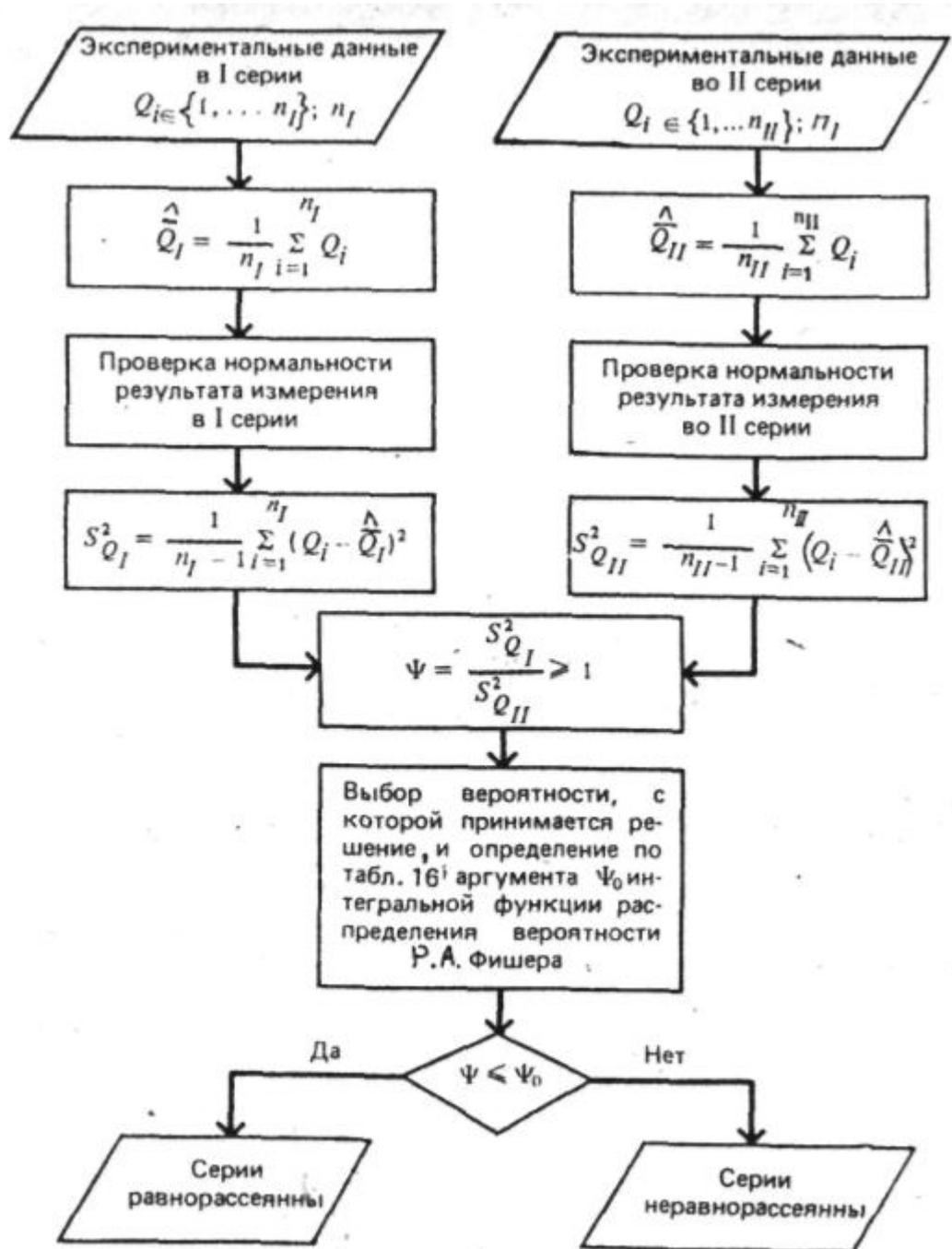


Рис. 50. Проверка равнорассеянности результатов измерений в двух сериях

$n_2$	P	$n_1$												
		2	3	4	5	6	7	9	13	16	21	25	51	$\infty$
2	0,90	39,9	49,5	53,6	55,8	57,2	58,2	59,4	60,7	61,2	61,7	62,0	62,7	63,3
	0,95	161	200	216	225	230	234	239	244	246	248	249	252	254
3	0,90	8,53	9,00	9,16	9,24	9,29	9,33	9,37	9,41	9,42	9,44	9,45	9,47	9,49
	0,95	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5
	0,99	98,5	99,0	99,2	99,2	99,3	99,3	99,4	99,4	99,4	99,4	99,5	99,5	99,5
4	0,90	5,54	5,46	5,39	5,34	5,31	5,28	5,25	5,22	5,20	5,18	5,18	5,15	5,13
	0,95	10,1	9,55	9,28	9,28	9,10	8,94	8,85	8,74	8,70	8,66	8,64	8,58	8,53
	0,99	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,5	27,1	26,9	26,7	26,6	26,4	26,1
5	0,90	4,54	4,32	4,19	4,11	4,05	4,01	3,95	3,90	3,87	3,84	3,83	3,80	3,76
	0,95	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,86	5,80	5,77	5,70	5,63
	0,99	21,2	18,0	16,7	16,0	15,5	15,2	14,8	14,4	14,2	14,0	13,9	13,7	13,5
6	0,90	4,06	3,78	3,62	3,52	3,45	3,40	3,34	3,27	3,24	3,21	3,19	3,15	3,10
	0,95	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,62	4,56	4,53	4,44	4,36
	0,99	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	10,3	9,89	9,72	9,55	9,47	9,24	9,02
7	0,90	3,78	3,46	3,29	3,18	3,11	3,05	2,98	2,90	2,87	2,84	2,82	2,77	2,72
	0,95	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,94	3,87	3,84	3,75	3,67
	0,99	13,7	10,9	9,78	9,15	8,75	8,47	8,10	7,72	7,56	7,40	7,31	7,09	6,88
9	0,90	3,46	3,11	2,92	2,81	2,73	2,67	2,59	2,50	2,46	2,42	2,40	2,35	2,29
	0,95	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,22	3,15	3,12	3,02	2,93
	0,99	11,3	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,03	5,67	5,52	5,36	5,28	5,07	4,86
13	0,90	3,18	2,81	2,61	2,48	2,39	2,33	2,24	2,15	2,10	2,06	2,04	1,97	1,90
	0,95	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,62	2,54	2,51	2,40	2,30
	0,99	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,50	4,16	4,01	3,86	3,78	3,57	3,36
16	0,90	2,07	2,70	2,49	2,36	2,27	2,21	2,12	2,02	1,97	1,92	1,90	1,83	1,76
	0,95	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,48	2,40	2,33	2,29	2,18	2,07
	0,99	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,00	3,67	3,52	3,37	3,29	3,08	2,87
21	0,90	2,97	2,59	2,38	2,25	2,16	2,09	2,00	1,89	1,84	1,79	1,77	1,69	1,61
	0,95	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,20	2,12	2,08	1,97	1,84
	0,99	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,56	3,23	3,09	2,94	2,86	2,64	2,42
25	0,90	2,93	2,54	2,33	2,19	2,10	2,04	1,94	1,83	1,78	1,73	1,70	1,62	1,53
	0,95	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,18	2,11	2,03	1,98	1,86	1,73
	0,99	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,36	3,03	2,89	2,74	2,66	2,44	2,21
51	0,90	2,79	2,39	2,18	2,04	1,95	1,87	1,77	1,66	1,60	1,54	1,51	1,41	1,29
	0,95	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,10	1,92	1,84	1,75	1,70	1,56	1,39
	0,99	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,82	2,50	2,35	2,20	2,12	1,88	1,60
$\infty$	0,90	2,71	2,30	2,08	1,94	1,85	1,77	1,67	1,55	1,49	1,42	1,38	1,26	1,00
	0,95	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	1,94	1,75	1,67	1,57	1,52	1,35	1,00
	0,99	6,63	4,61	3,78	3,32	3,02	2,80	2,51	2,18	2,04	1,88	1,79	1,52	1,00

Ценность измерительной информации вызывает стремление использовать экспериментальный материал, содержащийся во всех сериях измерений.

Экспериментальные данные, входящие в однородные серии, можно рассматривать и обрабатывать как единый массив. Для сокращения вычислений при этом целесообразно использовать полученные ранее результаты:

$$\bar{Q} = \frac{n_1 \bar{Q}_1 + n_2 \bar{Q}_2}{N};$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \left[ (n_1 - 1)S_{Q_1}^2 + (n_2 - 1)S_{Q_2}^2 + n_1(\bar{Q}_1 - \bar{Q})^2 + n_2(\bar{Q}_2 - \bar{Q})^2 \right]},$$

Где  $N=n_1+n_2$ .

При обработке неравнорассеянных серий с незначимо различающимися средними арифметическими учитывается особая ценность измерений, выполненных с большей точностью. Дисперсия (рассеяние) в таких сериях меньше. Для учета этого в оценку среднего значения всего массива экспериментальных данных включают средние арифметические серий с „весами“, обратно пропорциональными оценкам их дисперсий:

$$\bar{Q} = \frac{\frac{1}{S_1^2} \bar{Q}_1 + \frac{1}{S_2^2} \bar{Q}_2 + \dots + \frac{1}{S_l^2} \bar{Q}_l}{\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} + \dots + \frac{1}{S_l^2}}.$$

Это уже знакомое по предыдущему разделу среднее взвешенное. Стандартное отклонение среднего взвешенного

$$S = \sqrt{\frac{1}{\sum_{j=1}^l \frac{1}{S_j^2}}}$$

Порядок обработки экспериментальных данных  $Q_{i \in \{1, \dots, m_j\}}$  входящих в  $j \in \{1, \dots, l\}$  неравнорассеянных серий с незначимым различием средних арифметических, показан на рис. 51.

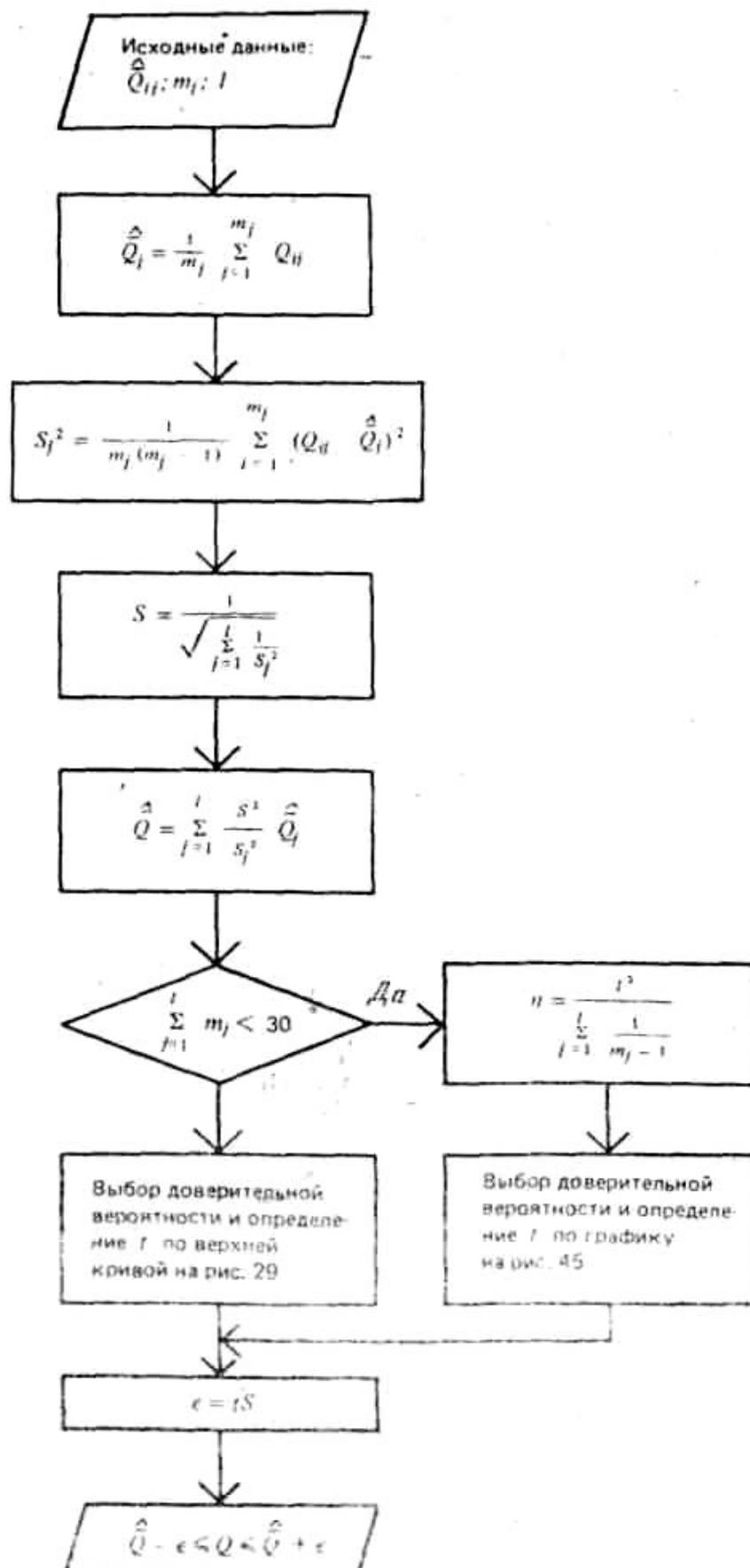


Рис. 51. Обработка экспериментальных данных, входящих в неравнорассеянные серии

## ГЛАВА 4

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

#### 4.1. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ

Под единством измерений понимается такое их состояние, при котором обеспечивается достоверность измерений, а значения измеряемых величин выражаются в узаконенных единицах.

Постановлением Совета Министров СССР от 4 апреля 1983 г. № 273 „Об обеспечении единства измерений в стране" \_работы по обеспечению единства измерений, проводимые на предприятиях, в организациях и учреждениях отнесены к основным видам работ. Этим и другими постановлениями правительства предусмотрен комплекс правовых, организационных и технических мер, направленных на обеспечение единства измерений в стране.

Правовой основой обеспечения единства измерений служит законодательная метрология — свод государственных актов и нормативно-технических документов различного уровня, регламентирующих метрологические правила, требования и нормы.

Гарантией обеспечения единства измерений в стране является экономический механизм саморегулирования народного хозяйства, а также государственная и производственная дисциплина, предусматривающие экономические санкции, материальную, административную и уголовную ответственность за нарушение требований законодательной метрологии.

В организационном плане единство измерений обеспечивается Метрологической службой СССР, состоящей из государственной и ведомственных метрологических служб.

Технической базой обеспечения единства измерений является система воспроизведения единиц физических величин и передачи информации об их размерах всем без исключения средствам измерений в стране.

В соответствии с основным уравнением измерения (2) главная измерительная процедура сводится к сравнению неизвестного размера с известным, в качестве которого выступает размер соответствующей единицы СИ. Информация об этих единицах и их размерах содержится в нормативно-технических документах, в частности, в ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78). Чем ближе используемый для сравнения размер единицы к ее определению, тем точнее в этих единицах будет выражено значение измеряемой физической величины. Этим объясняются высокие требования к точности воспроизведения единиц, удовлетворение которых составляет одно из важнейших направлений постоянных метрологических работ.

Размеры единиц могут воспроизводиться там же, где выполняются измерения, либо информация о них должна передаваться с места их централизованного хранения или воспроизведения. В зависимости от этого различают децентрализованное и централизованное воспроизведение единиц. Примером децентрализованного воспроизведения может служить воспроизведение единицы площади  $1 \text{ м}^2$ . Децентрализованно воспроизводятся единицы многих производных физических величин (при этом информация о размерах основных единиц передается с места централизованного хранения или воспроизведения).

Централизованное воспроизведение единиц осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых эталонами. Эталон — это техническое устройство, обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы с целью передачи информации о ее размере средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона. Эталон, воспроизводящий единицу с наивысшей в стране точностью, называется первичным. Эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий в этих условиях первичный эталон, называется специальным. Официально

утвержденные в качестве исходных для страны первичный или специальный эталоны называются государственными.

#### 4.2. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Основные единицы в настоящее время воспроизводятся только централизованно. Эталоны основных единиц воспроизводят их обычно в соответствии с определением. Каждый эталон состоит из воспроизводящей части и приспособлений или устройств, обеспечивающих съем и передачу информации о размере единицы. Во всех без исключения случаях результат воспроизведения является случайной величиной.

Основных единиц в Международной системе семь: секунда, метр, килограмм, кельвин, кандела, ампер и моль. Соответственно должно было бы быть и семь государственных первичных эталонов основных единиц. Однако в эталоне моля нет необходимости. В 0,012 кг изотопа углерода-12 содержится  $6,022 \cdot 10^{23}$  атомов. Это число называется числом Авогадро. Если число структурных элементов, составляющих вещество, известно, то деление его на число Авогадро дает количество вещества в молях. Можно при необходимости воспроизвести 1 моль любого вещества как  $6,022 \cdot 10^{23}$  его структурных элементов. Масса одного моля водорода, например, составляет 2 г, кислорода — 32 г, воды - 18 г и т. д.

Государственный первичный эталон единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза воспроизводит основную единицу СИ секунду в соответствии с ее определением (см. разд. 1.5). Принципиальная схема воспроизводящей части эталона показана на рис. 52. Атомы цезия-133 испускаются нагретым источником 1. Пучок этих атомов попадает в область неоднородного магнитного поля, создаваемого магнитом 2. Угол отклонения атомов в таком магнитном поле определяется их магнитным моментом. Поэтому неоднородное магнитное поле позволяет выделить из пучка атомы, находящиеся на определенном энергетическом уровне. Эти атомы направляются в объемный резонатор 3, пролетая через

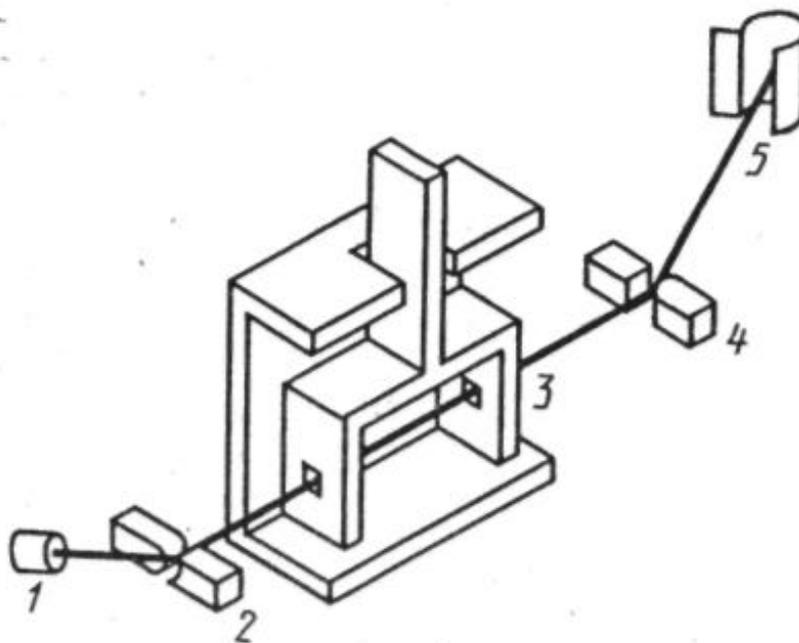


Рис. 52. Принципиальная схема цезиевого репера частоты

который взаимодействуют с переменным электромагнитным полем сверхвысокой

частоты. Частота электромагнитных колебаний в резонаторе может регулироваться в небольших пределах. При совпадении ее с частотой, соответствующей энергии квантовых переходов, происходит поглощение энергии СВЧ-поля, и атомы цезия-133 переходят в основное состояние. Отклоняющей магнитной системой 4 они "направляются на детектор 5. Ток детектора при настройке резонатора на частоту квантовых переходов оказывается максимальным. Этой частоте приписывается значение 9192631770 Гц, а промежуток времени, равный 9192631770 периодам сверхвысокочастотных колебаний, принимается равным 1 с.

Выбор числа 9192631770 объясняется следующим образом. До 1960 г. секунда определялась «как 1/86400 часть средних солнечных суток (среднего значения суток в течение года). Стандартное отклонение этой случайной величины составляет  $10^{-7}$  с. С 1960 по 1967 гг. за секунду принималась 1/31556925,9747 часть тропического года — промежутка времени между двумя последовательными прохождением Солнцем точки весеннего равноденствия. Продолжительность тропического года не постоянна, поэтому для расчетов был выбран конкретный 1900 г. Период обращения Земли вокруг Солнца более стабилен, чем Земли вокруг оси. Поэтому стандартное отклонение секунды при воспроизведении по новому определению уменьшилось до  $10^{-10}$  с. Стремление к еще большему повышению точности воспроизведения секунды побудило XIII Генеральную конференцию по мерам и весам принять в 1967 г. современное ее определение, стандартное отклонение при котором составляет  $10^{-13}$  с. Размер секунды решено было при этом не менять, чем и объясняется цифра 9192631770, связывающая события элементарного и планетарного уровней.

Долговременная стабильность цезиевого репера частоты невелика. Поэтому для хранения единиц времени и частоты в состав государственного первичного эталона входит водородный мазер. Принцип действия его показан на рис. 53. В стеклянной трубке 1 под действием высокочастотного электрического разряда происходит диссоциация молекул водорода. Пучок

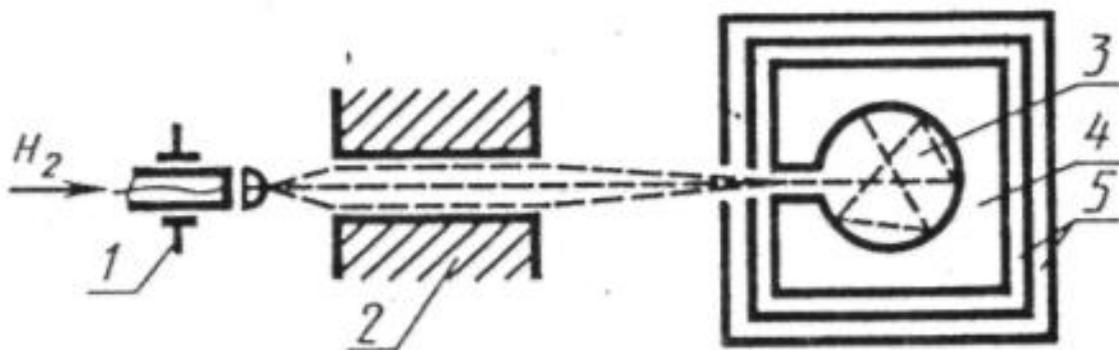


Рис. 53. Принципиальная схема мазера на атомарном водороде

атомов водорода через коллиматор попадает в неоднородное магнитное поле шестиполюсного осевого магнита 2, где претерпевает пространственную сортировку. В результате последней на вход накопительной ячейки 3, расположенной в объемном резонаторе 4, попадают лишь атомы водорода, находящиеся на верхнем энергетическом уровне. Находящийся внутри многослойного экрана 5 высокочастотный резонатор настроен на частоту используемого квантового перехода. Взаимодействие возбужденных атомов с высокочастотным полем резонатора (в течение примерно 1 с) приводит к их переходу на нижний энергетический уровень с одновременным излучением квантов энергии на резонансной частоте 1420405751,8 Гц. Это вызывает самовозбуждение генератора, частота которого отличается высокой стабильностью. Ее значение периодически поверяется по цезиевому реперу.

Наряду с водородным мазером для хранения шкал времени в состав государственного первичного эталона единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза

входит группа квантово-механических часов. Это непрерывно действующий сложный технический комплекс, главное внимание в котором уделено поддержанию длительного режима работы с высокой стабильностью показаний. Кроме того, в состав эталона входит аппаратура для передачи информации о размерах единиц при внутренних и внешних сравнениях (лазеры, СВЧ-генераторы, квантовые часы) и средства обеспечения. Диапазон временных интервалов, воспроизводимых эталоном, составляет  $10^{-9} \dots 10^8$  с.

Принятое XVII Генеральной конференцией по мерам и весам в 1983 г. новое определение метра (см. разд. 1.5) позволило выразить эту единицу СИ через единицу времени — секунду. Однако секунда воспроизводится в сверхвысокочастотном диапазоне радиоволн, а метр по определению должен воспроизводиться в оптическом. Оптические частоты на 3—4 порядка выше СВЧ. Потребовалось, образно говоря, из одного диапазона в другой перекинуть мост для передачи эталонной точности. Входящий в состав государственного первичного эталона единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза радиооптический частотный мост (РОЧМ) решает эту задачу в несколько этапов, на каждом из которых используется принцип повышения частоты, общий для всех синтезаторов частот — смещение на нелинейном элементе высокочастотных гармоник опорных сигналов. На первом этапе эталонная точность воспроизведения единиц передается в субмиллиметровый диапазон. При этом частота 3557147,5 МГц  $D_2O$ -лазера, работающего на длине волны  $\lambda = 84$  мкм, с помощью лазера на парах синильной кислоты HCN ( $\lambda = 337$  мкм) и клистронов с номинальными частотами 74 и 8,2 ГГц привязывается посредством специальной системы фазовой синхронизации к эталонной частоте цезиевого репера. На втором этапе эталонная точность передается из субмиллиметрового в инфракрасный диапазон электромагнитных волн. Для этого используется стабилизированный  $CO_2$ -лазер ( $\lambda = 10,6$  мкм), частота которого привязывается к восьмой гармонике  $D_2O$ -лазера и синхронизируется с частотой цезиевого репера. Специальной системой фазовой автоподстройки к частоте этого лазера привязывается частота  $CO_2$ -лазера с  $\lambda = 10,2$  мкм, третья гармоника которой суммируется с частотой клистронов 48 ГГц и сравнивается на нелинейном элементе с частотой мощного гелий-неонового лазера, синхронизированного по стабилизированному He—Ne/ $CH_4$ -лазеру с длиной волны излучения  $\lambda = 3,39$  мкм. В результате измерения частоты биений последнее звено РОЧМ — He—Ne/ $CH_4$ -лазер аттестуется по первичному цезиевому реперу. В итоге частотный диапазон государственного первичного эталона единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза расширяется от 1 до  $10^{14}$  Гц.

Расширить с помощью РОЧМ диапазон воспроизведения единиц времени и частоты до видимой части спектра электромагнитных волн не удастся. Между тем именно оптический диапазон наиболее удобен для перехода интерферометрическим методом от длин волн электромагнитного излучения к концевым и штриховым мерам длины. Поэтому по He—Ne/ $CH_4$ -лазеру, входящему в состав государственного первичного эталона времени и частоты и шкалы времени Советского Союза аттестуется гелий-неоновый лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения иода-127. Излучение He—Ne/ $I_2$ -лазера относится уже к видимой части диапазона ( $\lambda = 0,633$  мкм). На специальной установке, основу которой составляет вакуумированный модуляционный интерферометр Фабри-Перо, сравнивается количество длин волн излучения лазера He—Ne/ $CH_4$  и He—Ne/ $I_2$ , укладываемых на одном и том же элементе длины. По их отношению с эталонной точностью определяется длина волны излучения He—Ne/ $I_2$ -лазера. Затем с помощью интерференционного компаратора на основании измерения порядка интерференции  $N$  аттестуются концевые и штриховые меры длины, согласно соотношению  $L = N \lambda$ .

Таким образом, воспроизведение единиц времени, частоты и длины осуществляется единым техническим комплексом — государственным первичным эталоном единиц времени, частоты и длины. Особенностью его является то, что часть эталона, включающая цезиевый репер, водородный мазер, квантово-механические часы и РОЧМ,

находится под Москвой, в НПО „Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений“ (НПО „ВНИИФТРИ“), а другая часть, в которую входит установка для измерения отношения длин волн инфракрасного и оптического лазеров и интерференционный компаратор, - в Ленинграде в НПО „ВНИИМ им. Д. И. Менделеева“. Такая территориальная разобщенность эталона потребовала введения в его состав перевозного He-Ne/CH<sub>4</sub> -лазера, длина волны излучения которого устанавливается по выходному He-Ne/CH<sub>4</sub> -лазеру РОЧМ и служит для измерения длины волны излучения He-Ne/I<sub>2</sub>-лазера. Единица длины - метр воспроизводится со стандартным отклонением  $S = 5 \cdot 10^{-10}$  м, что почти на порядок меньше стандартного отклонения результата воспроизведения метра по старому определению с помощью криптоновой лампы ( $4 \cdot 10^{-9}$  м). В перспективе предполагается повысить точность воспроизведения метра еще не менее чем на порядок.

Единица массы — килограмм — воспроизводится до сих пор гирей из платиноиридиевого сплава (90 % Pt и 10 % Ir), изготовленной в 1883 г. английской фирмой Джонсон, Маттей и К° и полученной по жребию Россией в 1889 г. согласно Метрической конвенции. Гиря, фотография которой приведена на рис. 54, имеет форму цилиндра с высотой и диаметром основания, равными 39 мм. Она хранится на кварцевой подставке под двумя стеклянными колпаками в стальном шкафу особого сейфа, находящегося в термостатированном помещении НПО „ВНИИМ им. Д. И. Менделеева“.

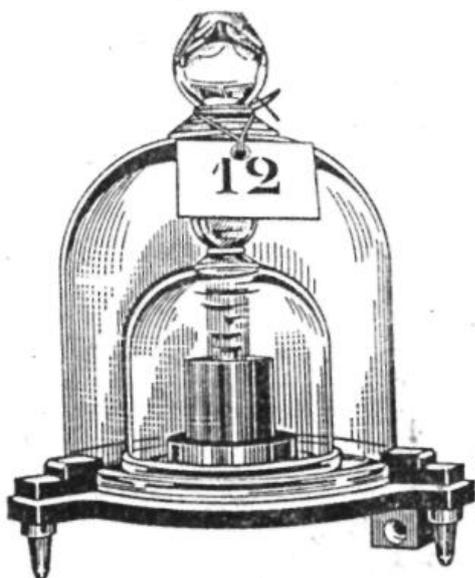


Рис. 54. Платиноиридиевая гиря, входящая в состав государственного первичного эталона единицы массы — килограмма

В состав государственного первичного эталона единицы массы кроме гири входят эталонные весы, на которых один раз в 10 лет с помощью манипуляторов дистанционно сличаются с эталонной гирей эталоны-копии. Несмотря на все предосторожности, как показывают результаты международных сличений, за 90 лет масса эталонной гири, воспроизводящей килограмм со стандартным отклонением  $(1. \dots 2)10^{-8}$  кг, увеличилась на 0,02 мг. Объясняется это адсорбцией молекул из окружающей среды, оседанием пыли на поверхность гири и образованием тонкой коррозионной пленки. В перспективе предполагается перейти к воспроизведению единицы массы через счетное число атомов какого-нибудь химического элемента, скорее всего изотопа кремния-28. Для этого, однако, необходимо повысить точность определения числа Авогадро, на что сейчас направлены усилия многих метрологических лабораторий в мире.

Воспроизведение единицы термодинамической температуры - Кельвина как  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды не представляет особого труда. Температуру тройной точки воды удается поддерживать со стандартным отклонением 0,2 мК, чем и определяется стандартное отклонение воспроизведения Кельвина, составляющее примерно  $10^{-3}$  К. Трудности возникают тогда, когда появляется необходимость измерить температуру, отличающуюся от 273,16 К. Свойство нагретости тел можно представить в виде отдельных частей только мысленно. На практике для определения количественной характеристики этого свойства используют тепловое расширение тел (например, столба ртути или спирта), изменение электрического сопротивления и т. п. Термометрические свойства различных веществ (газов, жидкостей, твердых тел) сложным образом и недостаточно точно отражают изменение в широком диапазоне их термодинамической температуры. Поэтому на температурной шкале устанавливается несколько реперных точек, температура в которых

определяется газовым термометром, использующим соотношение между объемом, давлением и температурой идеального газа. Это наиболее точные, но очень трудоемкие измерения, выполняемые лишь в немногих ведущих метрологических лабораториях мира. Основная сложность их состоит в учете несоответствия реального газа идеальному. В промежутках между реперными точками температура измеряется с помощью термометрических веществ, градуированных по этим точкам.

С 1968 г. по решению XIII Генеральной конференции по мерам и весам Международная практическая температурная шкала (МПТШ-68)\* включает 12 реперных точек, значение температуры в которых приведено ниже.

Реперная точка	Температура, К
Тройная точка водорода	13,81
Точка кипения водорода при давлении 33330,6 Па	17,042
Точка кипения водорода при нормальном давлении	20,28
Точка кипения неона	27,102
Тройная точка кислорода	54,361
Точка кипения кислорода	90,188
Тройная точка океанской воды	273,16
Точка кипения океанской воды	373,15
Точка затвердевания олова	505,118
Точка затвердевания цинка	692,73
Точка затвердевания серебра	1235,08
Точка затвердевания золота	1337,58

В диапазоне 1,5 .. 4,2 К воспроизведение температуры обеспечивается государственным специальным эталоном единицы температуры на ос нове шкалы<sup>4</sup> Не 1958 г.

В диапазоне 4,2 ... 13,81 К температура воспроизводится государст-

---

\*Согласно резолюции № 7 XVIII Генеральной конференции по мерам и весам, 1089 г. Международным комитетом мер и весов была принята Международная температурная шкала (МТШ-90), которая с 1990 г. должна стать основой измерений температуры, заменив действующие МПТШ-68 и Предварительную температурную шкалу (ПТШ-76).

---

венным специальным эталоном единицы температуры на основе температурной шкалы германиевого термометра сопротивления.

В диапазоне 13,81 . . . 273,15 К государственным первичным эталоном единицы температуры воспроизводится шесть реперных точек, а значение температуры в интервалах между ними определяется эталонным платиновым термометром сопротивления.

Все эти эталоны хранятся в НПО „Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений“.

В диапазоне 273,15 . . . 1337,58 К государственным первичным эталоном единицы температуры, хранящимся в НПО „ВНИИМ им. Д. И. Менделеева“, воспроизводятся тройная точка воды, а также точки затвердевания олова, цинка, серебра и золота. В промежутках между ними значение температуры устанавливается платиновым термометром.

В диапазоне 1337,58 . . . 2800 К этим же эталоном значение температуры определяется по яркости накала рабочего тела температурной лампы, которая градуируется последовательным удвоением яркости черного тела при температуре затвердевания золота. Этот эталон утвержден в качестве эталона СЭВ.

В диапазоне 10000 . . . 150000 К в Харьковском научно-производственном объединении „Метрология" создан государственный специальный эталон единицы температуры, предназначенный для обеспечения единства измерений температуры плазменных источников излучения.

Перспективы дальнейшего совершенствования эталонов в области контактной термометрии (273,15 . . . 1337,58 К) связаны с созданием более точного газового термометра. Рассматривается также возможность использования для создания государственных эталонов термометрических свойств электрического сопротивления, напряжение шумов которого имеет квантовую природу, и температурной зависимости частоты ядерного квадрупольного резонанса.

Единица силы света — кандела по последнему определению, данному XVI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1979 г., воспроизводится в НПО „ВНИИОФИ" государственным первичным эталоном, утвержденным в 1983 г. Основу эталона составляет модель черного тела при температуре 2700 К. Излучение черного тела при такой температуре мало отличается по своему спектральному составу от излучения ламп накаливания, широко используемых в качестве источников света. Это облегчает аттестацию последних в качестве вторичных эталонов.

Спектральную составляющую излучения черного тела на частоте  $540 \cdot 10^{12}$  Гц (длина волны 555,016 нм) выделяют светофильтром, а энергию ее контролируют радиометром. Стандартное отклонение при воспроизведении канделы составляет  $10^{-3}$  кд.

Единица силы электрического тока — ампер — по определению воспроизводится не может, так как в нем фигурируют проводники „бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения". Однако, в некоторых частных случаях (например, в случае двух соленоидов) можно рассчитать силу взаимодействия электрических токов, протекающих по проводникам конечных размеров, с достаточно высокой точностью.

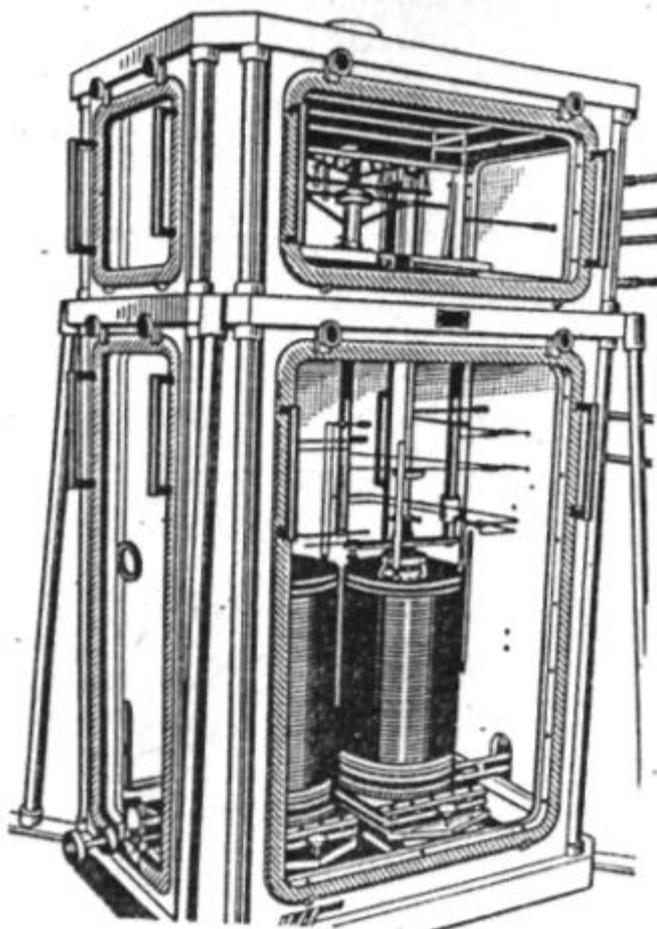


Рис. 55. Государственный первичный эталон единицы силы электрического тока — ампера

В государственном первичном эталоне единицы силы электрического тока — ампера, хранящемся в НПО „ВНИИМ им. Д.И. Менделеева“, используется взаимодействие электрических токов в последовательно соединенных коаксиальных соленоидах (катушках) с однослойной обмоткой (рис. 55). Наружный соленоид неподвижен, а внутренний, подвешенный к одному из плеч коромысла весов, при включении электрического тока втягивается внутрь неподвижного с силой

$$F = kI^2,$$

где расчетный коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от геометрических соотношений в электродинамической системе. На равноплечих весах эта сила уравнивается массой гирь. Согласно расчетам, при массе уравнивающих гирь около 8 г сила электрического тока составляет 1 ампер. Стандартное отклонение при воспроизведении ампера государственным первичным эталоном не превышает  $4 \cdot 10^{-6}$  А.

В дальнейшем предполагается в качестве основной единицы СИ вместо ампера утвердить единицу электрического напряжения - вольт.

#### **4.3. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ О РАЗМЕРАХ ЕДИНИЦ**

Как уже указывалось, исходная информация о размерах единиц содержится в нормативных документах СТ СЭВ 1052-78 и ГОСТ 8.417-81. Как и любая другая информация, она может передаваться письменно или устно, с помощью технических средств (например, радио, телевидения, телетайпа) или без них. Опосредованно она содержится в конструкторской документации, поступающей на заводы-изготовители средств измерений. При выпуске средств измерений в обращение информация о размере соответствующей единицы СИ оказывается заложенной либо в номинальное значение меры, либо в значения отметок на шкале отсчетного устрой-, ства, либо в градуировочные

таблицы, графики и т. п. В таком виде эта информация хранится средствами измерений на протяжении всего периода их эксплуатации. Правильность и точность заложенной в средства измерений информации о размере единиц устанавливается на государственных испытаниях головных образцов средств измерений, предназначенных для серийного производства, или при метрологической аттестации таких средств измерений, которые выпускаются единичными экземплярами, либо являются уникальными. Сохранность этой информации контролируется при первичной и всех последующих поверках средств измерений.

К метрологическим видам работ относится непосредственная передача информации о размере единиц от эталонов средствам измерений. Осуществляется она путем сравнения показаний с заведомо более точно известным значением соответствующей физической величины.

Иногда в результате непосредственной передачи информации о размере единиц мерам и отметкам шкал отсчетных устройств средств измерений приписываются значения, выраженные в этих единицах. Такая процедура называется градуировкой. В некоторых случаях составляются градуировочные графики или таблицы. Если высокоточным мерам или отметкам шкал отсчетных устройств прецизионных средств измерений уже приписаны определенные значения (например, при выпуске), то в ходе их аттестации определяются поправки, которые при измерениях должны вноситься в показания. Без таких поправок результаты измерений будут неправильными.

Использовать для градуировки, аттестации и поверки средств измерений непосредственно государственные первичные эталоны нельзя. Эти эталоны являются национальным достоянием, ценностями особой государственной значимости. Их хранят в метрологических институтах страны в специальных так называемых эталонных помещениях, где поддерживается строгий режим по влажности, температуре, вибрациям и другим влияющим величинам. Для обслуживания государственных эталонов из числа ведущих специалистов-метрологов назначаются ученые — хранители эталонов, облеченные особыми полномочиями. Используются государственные эталоны для воспроизведения единиц и передачи информации об их размерах достаточно редко, с соблюдением мер предосторожности, исключающих выход эталонов из строя. Таким образом, производительность их невелика, и для передачи информации о размере единиц обширному парку средств

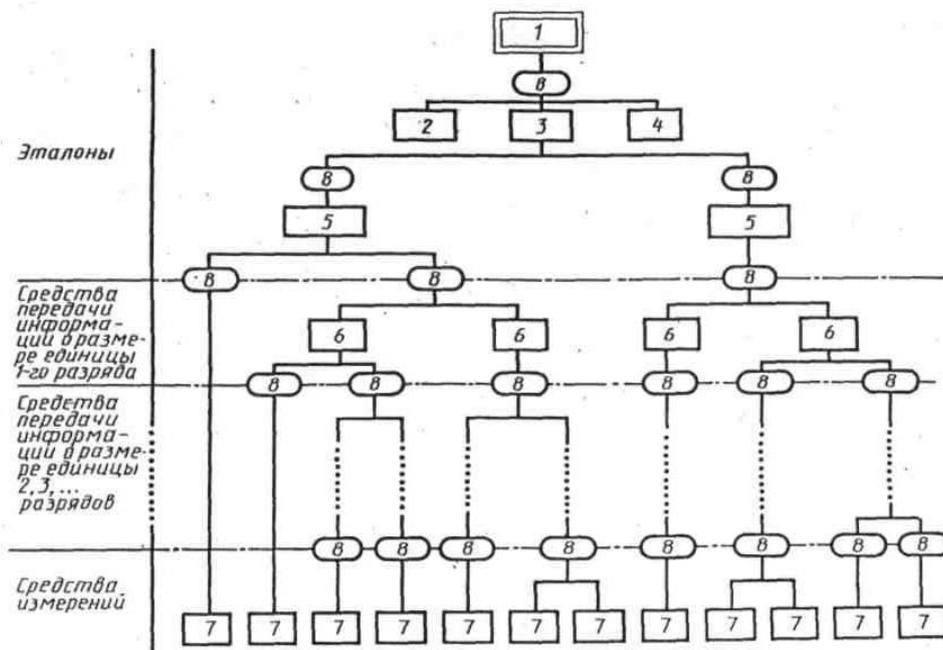


Рис. 56. Передача информации о размере единицы (вариант):  
 1 – государственный первичный или специальный эталон; 2 – эталон-свидетель; 3 – эталон-копия; 4 – эталон сравнения; 5 – рабочие эталоны; 6 – средства передачи информации о размере единицы; 7 – средства измерений; 8 – методы передачи информации о размере единицы

измерений приходится прибегать к многоступенчатой процедуре, схема которой показана на рис. 56.

По размеру единицы, воспроизводимому государственным эталоном, устанавливаются значения физических величин, воспроизводимые вторичными эталонами. Среди вторичных эталонов различают эталоны-свидетели, предназначенные для проверки сохранности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты; эталоны сравнения, применяемые для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличимы друг с другом, и эталоны-копии, используемые для передачи информации о размере единицы рабочим эталонам (рабочим называется эталон, от которого непосредственно получают информацию о размере единицы нижестоящие по схеме технические средства). Наименования эталонов с указанием стандартного отклонения случайного результата воспроизведения ими единицы физической величины, заключенные в прямоугольные рамки, размещаются в верхней части схемы, в так называемом поле эталонов.

Средства, предназначенные для дальнейшей передачи информации о размере единицы, расположены на рис. 56 под полем эталонов. Принято называть их образцовыми средствами измерений. Такое название нельзя признать удачным, т. к. во-первых, процедура передачи информации о размере единицы не соответствует определению измерения, а во-вторых, применение для практических измерений средств передачи информации о размере единицы и эталонов запрещено. По точности эти средства подразделяются на несколько разрядов. Средства наиболее высокой точности относятся к первому разряду, меньшей — ко второму, еще меньшей — к третьему и т. д.

Характеристики точности, например, стандартное отклонение передаваемого размера, обусловленное свойствами средств передачи информации о нем, указываются в прямоугольной рамке под наименованием самого средства. Номенклатура и количество этих средств должны обеспечить передачу информации о размере единицы всем без исключения средствам измерений, которым это необходимо. В число последних не входят, например, промежуточные измерительные преобразователи, хотя, как и любые другие средства измерений они подлежат обязательной поверке. Из этого примера видно, что поверка и передача информации о размере единицы — не одно и то же. Поэтому выражение «поверочная схема» применительно к схеме передачи информации о размере

единицы является неудачным.

Средства измерений располагаются в нижнем поле на рис. 56 в порядке (слева направо) понижения их точности. Класс точности (см. разд. 2.3.3) или стандартное отклонение показания, обусловленное свойствами средства измерений, указывается в одной рамке с наименованием. Для передачи информации о размере единицы средства измерений использовать нельзя.

Следует подчеркнуть условность различия между средствами измерений и средствами передачи информации о размере единицы. Лишь в немногих случаях последние заранее проектируются и выпускаются как таковые. Чаще в качестве их аттестуются обычные средства измерений, отличающиеся высокой стабильностью и воспроизводимостью показаний, тщательно изученными и по возможности улучшенными метрологическими характеристиками (см. разд. 2.3).

В качестве методов передачи информации о размере единиц (их названия заключаются в овальные рамки на схеме, показанной на рис. 56) используются методы непосредственного сличения (т. е. сличения меры с мерой или показаний двух приборов без применения специальных технических средств), сличения с помощью компаратора и т. п. Результат сличения является случайной величиной. Для того, чтобы после определения поправки рассеянием результата сличения можно было пренебречь, его стандартное отклонение, согласно критерию (10), должно быть как минимум в три раза меньше стандартного отклонения, характеризующего точность средства, находящегося в нижнем поле на рис. 56. Запас по точности эталона в 10 ... 30 раз позволяет иметь две ступени передачи, запас в 30 . . . 100 раз — три ступени и т. д. При определении числа ступеней, необходимого количества рабочих эталонов и других средств передачи информации о размере единиц учитываются номенклатура, численность и размещение средств измерений в стране, производительность эталонов и средств передачи информации о размере единиц, организационные, производственные, экономические возможности и много другое, так что на практике указанные соотношения не играют определяющей роли.

Схемы, регламентирующие передачу информации о размере единицы всему парку средств измерений в стране, называются государственными; охватывающие только средства измерений, находящиеся в обращении в отдельном министерстве или ведомстве, — ведомственными; распространяющиеся на средства измерений, закрепленные за конкретным метрологическим органом, — локальными. Ведомственная схема, как правило, возглавляется рабочим эталоном, а локальная — средством передачи информации о размере единицы, называемым исходным. И та и другая входят составной частью в государственную схему, возглавляемую государственным эталоном.

Единство измерений обеспечивается благодаря следующим обстоятельствам. С одной стороны, то, что значение измеренной величины находится в определенном интервале, устанавливается с необходимой достоверностью. С другой стороны, поправка  $\theta$  к показанию  $X$  средства измерений уточняет результат измерения  $Q$ , приводя его к такому значению, которое в тех же условиях было бы получено более точным средством измерений. Придавая результатам измерений, показаниям и поправкам индексы, соответствующие разрядам в цепи передачи информации о размере единицы, при четырех ступенчатой передаче, например, получим:

$$\begin{aligned}Q &= X + \theta = X + (Q_{III} - X) = Q_{III}; \\Q_{III} &= X_{III} + \theta_{III} = X_{III} + (Q_{II} - X_{III}) = Q_{II}; \\Q_{II} &= X_{II} + \theta_{II} = X_{II} + (Q_I - X_{II}) = Q_I; \\Q_I &= X_I + \theta_I = X_I + (Q_3 - X_I) = Q_3,\end{aligned}$$

где  $Q_3$  — случайное значение результата измерения, которое было бы получено при сравнении неизвестного размера с размером единицы, воспроизводимым эталоном. Воспроизводимый размер не вполне точно соответствует определению единицы по СТ

СЭВ 1052-78 или ГОСТ 8.417-81, что учитывается поправкой  $\theta_3$ , устанавливаемой при метрологической аттестации эталона. Поэтому

$$Q_3 = X_3 + \theta_3 = X_3 + (Q_0 - X_3) = Q_0,$$

где  $Q_0$  - случайное значение результата измерения, которое было бы получено при сравнении неизвестного размера с размером единицы, соответствующим определению. Таким образом, если при передаче информации о размере единицы правильно определены и учтены все поправки, то любое измерение действительно сводится к сравнению неизвестного размера с единицей, установленной стандартом, т. е. к выражению значения измеряемой физической величины в узаконенных единицах.

Эталоны недоступны специалистам на производстве, а средства измерений, какой бы фактической точностью они ни обладали, не могут быть аттестованы по более высокому классу точности, чем средства, с помощью которых они аттестуются. Между тем, на каждой ступени передачи информации о размере единицы точность теряется в 3 ... 5 раз (иногда в 1,25 ... 10 раз). Таким образом, при многоступенчатой передаче эталонная точность не доходит до потребителя. Поэтому для высокоточных средств измерений число ступеней может быть сокращено, вплоть до передачи им, информации о размерах единиц непосредственно от рабочих эталонов. В целом система, основанная только на централизованном воспроизведении единиц и передаче информации об их размерах средствам измерений громоздка, неудобна, дорога и малоэффективна. Ее содержание и совершенствование представляет сложную организационно-техническую и народнохозяйственную проблему. В будущем следует ожидать повышение роли децентрализованного воспроизведения единиц.

## ГЛАВА 5

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ НАД РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 5.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С ОДНИМ РЕЗУЛЬТАТОМ ИЗМЕРЕНИЯ

При математических действиях над результатами измерений нужно учитывать, что последние являются случайными значениями измеренных величин. Обращение с результатами измерений как с неслучайными значениями приводит к ошибкам. Некоторые из них будут рассмотрены на конкретных примерах.

Начнем с умножения результата измерения на постоянный множитель.

**Пример 30.** Удвоить результат измерения  $r$ , эмпирическое распределение вероятности числового значения которого представлено табл.17.

Таблица 17

$r$	$m$	$P$
3	20	0.2
4	50	0.5
5	30	0.3

**Решение.** Результатом умножения случайного числа  $r$  на 2 будет новое случайное число  $2r$ , распределение вероятности которого:

$2r$	$P$
6	0.2
8	0.5
10	0.3

Графически оно показано на рис. 57. Вероятность удвоенных по сравнению с  $r$  значений остается прежней. Оценки числовых характеристик теоретической модели эмпирического распределения вероятности, представленного табл.17,

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i = \frac{30 \cdot 20 + 40 \cdot 50 + 5 \cdot 30}{100} = 4.1;$$

$$S_r^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2 - \bar{r}^2 = \frac{9 \cdot 20 + 16 \cdot 50 + 25 \cdot 30}{100} - 16.8 = 0.5,$$

так как нет никаких оснований полагать, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности. Оценки числовых характеристик теоретической модели нового случайного числа

$$\overline{2r} = 8.2; S_{2r}^2 = 2,$$

следовательно

$$\overline{2r} = 2\bar{r}; S_{2r}^2 = 4S_r^2.$$

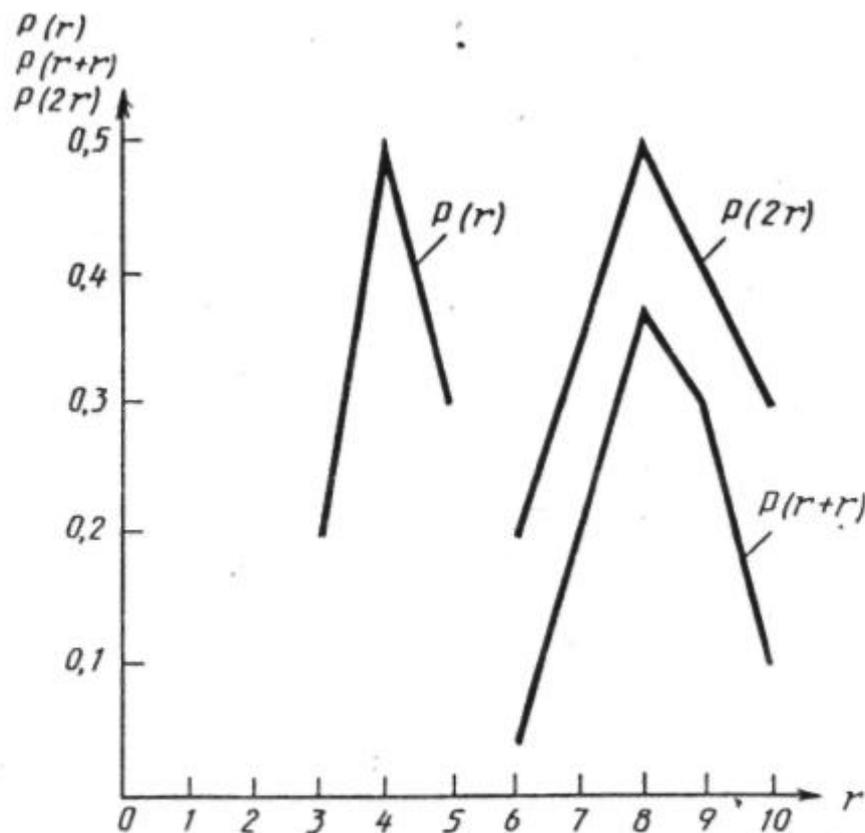


Рис. 57. Распределение вероятности  $P(r)$ ,  $P(2r)$  и  $P(r+r)$  в примерах 30 и 36

Таким образом для оценок справедливы свойства самих числовых характеристик (см. п. 3.2): среднее арифметическое произведения постоянного множителя  $a$  и результата измерения  $A$  равно произведению постоянного множителя и среднего арифметического результата измерения.

то есть, если

$$Q = aA,$$

то

$$\overline{Q} = a\bar{A}.$$

В равной мере стандартное отклонение произведения постоянного множителя  $a$  и результата измерения  $A$  равно произведению модуля постоянного множителя и

стандартного отклонения результата измерения:

$$S_Q = |a|S_A.$$

Теперь рассмотрим операцию возведения результата измерения в квадрат. Под квадратом результата измерения  $A$  понимается случайная величина

$$Q = A^2,$$

которая с вероятностями  $P_i$ , соответствующими значениям  $A_i$  принимает значения, равные  $Q_i$ .

**Пример 31.** Возвести в квадрат результат измерения, рассмотренный в предыдущем примере.

**Решение.** Распределение вероятности числовых значений  $r^2$  выглядит следующим образом:

$r^2$	$P$
9	0.2
16	0.5
25	0.3

Оценки числовых характеристик теоретической модели этого распределения вероятности,

$$\bar{r}^2 = 17.3; S_{r^2} = 5.7.$$

**Пример 32.** Определить площадь круга, распределение вероятности числовых значений радиуса которого представлено табл. 17.

**Решение.** Распределение вероятности числовых значений площади круга  $S = \pi r^2$  получаем, используя табл. 17:

$S$	$P$
28.3	0.2
50.3	0.5
78.5	0.3

Оценки числовых характеристик теоретической модели этого распределения вероятности

$$\bar{S} = 54.4; S_S = 17.7.$$

Стандартное отклонение среднего арифметического значения площади круга

$$S_S = 1.8.$$

Так как закон распределения вероятности  $s$  неизвестен, то на основании неравенства П.Л. Чебышева с вероятностью, больше чем 0,9,

$$\bar{s} - 3.2S_S \leq s \leq \bar{s} + 3.2S_S$$

Отсюда с вероятностью не менее 0,9

$$48.7 \leq s \leq 60.1.$$

Рассмотренные примеры показывают, что при функциональном преобразовании результата измерения

$$Q = f(A) \tag{14}$$

происходит трансформация его эмпирического закона распределения вероятности в соответствии с правилом

$$P(Q_i) = P(A_i).$$

Если результат измерения  $A$  задан теоретической моделью эмпирического закона распределения вероятности, то используется то, что интегральная функция распределения вероятности  $F(Q)$  представляет собой вероятность того, что

$$f(A) < Q.$$

Решение этого неравенства относительно  $A$  устанавливает пределы, в которых находится  $A$  с той же вероятностью. Последняя равна интегралу от плотности распределения вероятности  $p_A(A)$  в установленных пределах.

**Пример 33.** Определить трансформацию плотности распределения вероятности  $p_A(A)$  результата измерения  $A$  после линейного преобразования  $Q = aA + b$

**Решение.** 1.  $F(Q) = P\{aA + b < Q\}$ .

2. С вероятностью  $F(Q)$  результат измерения

$$A < \frac{Q-b}{a} \text{ при } a > 0;$$

$$A > \frac{Q-b}{a} \text{ при } a < 0.$$

Отсюда

$$F(Q) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\frac{Q-b}{a}} p_A(A) dA & \text{при } a > 0; \\ \int_{\frac{Q-b}{a}}^{\infty} p_A(A) dA & \text{при } a < 0. \end{cases}$$

3. После перестановки пределов в последнем интеграле и дифференцирования получаем:

$$p(Q) = \frac{1}{|a|} p_A\left(\frac{Q-b}{a}\right).$$

Таким образом, как это можно было заметить еще на примере 30, при линейном преобразовании результата измерения форма графика распределения вероятности не меняется, а происходит только его смещение по оси абсцисс и компрессия с сохранением площади под кривой, равной 1.

Результат, полученный в примере 33, применительно к любой монотонной функции (14) обобщается следующим образом:

$$p(Q) = \left| \frac{df^{-1}(Q)}{dQ} \right| p_A[f^{-1}(Q)],$$

где  $f^{-1}$  — функция, обратная функции  $f$ . В примере 33  $f^{-1} = \frac{Q-b}{a}$ . Если  $f^{-1}$  — многозначная функция, то это отражается на пределах, в которых находится  $A$  с вероятностью  $F(Q)$ .

**Пример 34.** Определить трансформацию нормированного нормального закона распределения вероятности, которому подчиняется результат измерения  $A$ , после нелинейного преобразования  $Q=A^2$ .

**Решение.** 1.  $F(Q) = P\{A^2 < Q\}$ .

2. Пределы, в которых выполняется неравенство, устанавливаются функцией  $A = \pm\sqrt{Q}$ , обратной возведению  $A$  в квадрат (рис. 58). Поэтому

$$F(Q) = \int_{-\sqrt{Q}}^{\sqrt{Q}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{A^2}{2}} dA = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{Q}} e^{-\frac{A^2}{2}} dA - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-\sqrt{Q}} e^{-\frac{A^2}{2}} dA.$$

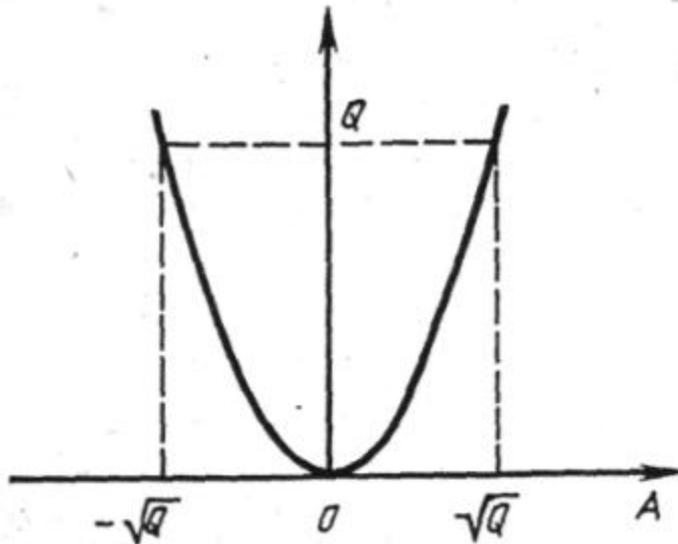


Рис. 58. Графическое решение уравнения, обратного возведению  $A$  в квадрат

3. После дифференцирования получаем

$$p(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Q}} e^{-\frac{Q}{2}}$$

Для сравнения графики плотности исходного и преобразованного распределения вероятности показаны на рис. 59.

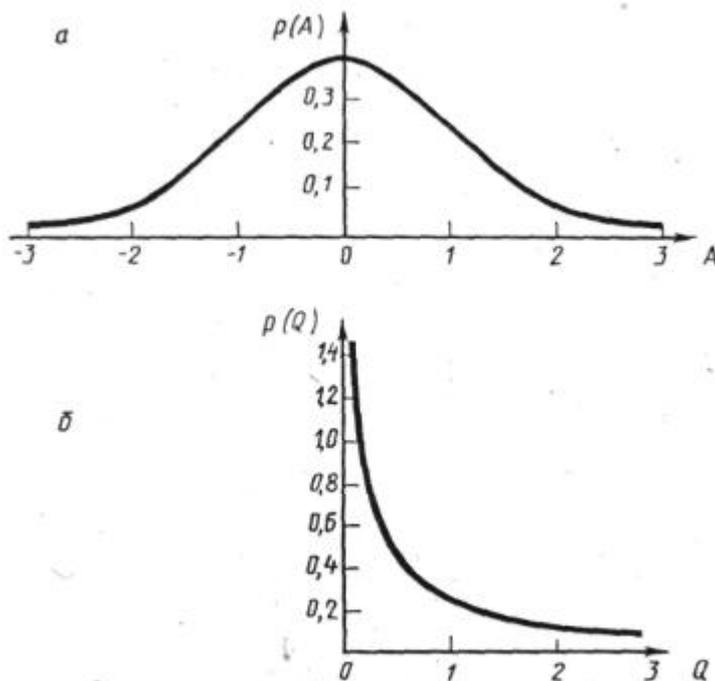


Рис. 59. Графики плотности распределения вероятности результата измерения, подчиняющегося нормированному нормальному закону (а) и квадрата этого результата измерения (б)

На практике преобразованиями законов распределения вероятности результатов измерений интересуются сравнительно редко. Обычно ограничиваются расчётами на уровне оценок числовых характеристик законов распределений.

**Пример 35.** По данным примера 30 определить числовое значение длины окружности  $l$  с радиусом  $r$ .

**Решение.** 1.  $\bar{l} = 2\pi\bar{r} = 25.7; S_l = 2\pi S_r = 4.4.$

2. Стандартное отклонение среднего арифметического значения длины окружности  $S_l = S_l / \sqrt{n} = 0.44.$

3. Согласно неравенству П. Л. Чебышева с вероятностью не менее 0,9  $24.3 \leq l \leq 27.1.$

## 5.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С НЕСКОЛЬКИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

Начнем со сложения результатов измерений.

**Пример 36.** Распределение вероятности числового значения результата измерения одной из сторон прямоугольника представлено табл. 17. Независимое измерение прилежащей стороны дало в точности такой же результат, т. е. прямоугольник является квадратом. Определить его полупериметр.

**Решение.** Полупериметр квадрата является величиной, значение которой равно сумме двух других значений  $r_1$  и  $r_2$ , каждое из которых задано распределением вероятности, представленным табл. 17. По условию  $r_1 = r_2 = r$ . При  $r_1 = 3$  второе слагаемое  $r_2$  может иметь любое из трех числовых значений, приведенных в табл. 17. Вероятность того, что  $r_1 + r_2 = 3 + 3 = 6$  равна  $0,2 \cdot 0,2 = 0,04$ ; вероятность того, что  $r_1 + r_2 = 3 + 4 = 7$  составляет  $0,2 \cdot 0,5 = 0,10$ ; вероятность того, что  $r_1 + r_2 = 3 + 5 = 8$  определяется таким же образом:  $0,2 \cdot 0,3 = 0,06$ . Аналогичные варианты возникают при  $r_1 = 4$  и  $r_1 = 5$ . Все они сведены в табл. 18.

Таблица 18

$r_1$	$r_2$	$r_1 + r_2$	$P = P_1 \cdot P_2$
3	3	6	$0,2 \cdot 0,2 = 0,04$
3	4	7	$0,2 \cdot 0,5 = 0,10$
3	5	8	$0,2 \cdot 0,3 = 0,06$
4	3	7	$0,5 \cdot 0,2 = 0,10$
4	4	8	$0,5 \cdot 0,5 = 0,25$
4	5	9	$0,5 \cdot 0,3 = 0,15$
5	3	8	$0,3 \cdot 0,2 = 0,06$
5	4	9	$0,3 \cdot 0,5 = 0,15$
5	5	10	$0,3 \cdot 0,3 = 0,09$

Из табл. 18 видно, что

$$P\{r_1 + r_2 = 6\} = 0.04;$$

$$P\{r_1 + r_2 = 7\} = 0.1 + 0.1 = 0.2;$$

$$P\{r_1 + r_2 = 8\} = 0.06 + 0.25 + 0.06 = 0.37;$$

$$P\{r_1 + r_2 = 9\} = 0.15 + 0.15 = 0.3;$$

$$P\{r_1 + r_2 = 10\} = 0.09.$$

Таким образом, числовое значение полупериметра как суммы значений двух прилежащих сторон, полученных путем независимого измерения последних, подчиняется следующему распределению вероятности

$$r_1 + r_2 \qquad P$$

6	0,04
7	0,20
8	0,37
9	0,30
10	0,09

На рис. 57 распределения вероятности числовых значений полупериметра и сторон квадрата представлены графически. Далее

$$\overline{r_1 + r_2} = \frac{6 \cdot 4 + 7 \cdot 20 + 8 \cdot 37 + 9 \cdot 30 + 10 \cdot 9}{100} = 8.2;$$

$$S_{r_1+r_2}^2 = \frac{36 \cdot 4 + 49 \cdot 20 + 64 \cdot 37 + 81 \cdot 30 + 100 \cdot 9}{100} - 67.24 = 1.$$

Таким образом для оценок, как и для самих числовых характеристик, среднее арифметическое суммы независимых результатов измерений

$$Q = A + B + \dots$$

равно сумме их средних арифметических:

$$\overline{Q} = \overline{A} + \overline{B} + \dots$$

а квадрат стандартного отклонения - сумме квадратов стандартных отклонений:

$$S_Q^2 = S_A^2 + S_B^2 + \dots$$

Стандартное отклонение среднего арифметического значения периметра

$$S_{\overline{r_1+r_2}} = \frac{S_{r_1+r_2}}{\sqrt{n}} = 0.1.$$

Согласно неравенству П. Л. Чебышева с вероятностью не менее 0,9

$$7.96 \leq r_1 + r_2 \leq 8.5$$

Пример 37. В табл. 19 приведено 100 независимых значений результата взвешивания консервированного продукта вместе со стеклянной банкой и крышкой  $m_\sigma$ -брутто, в табл. 20 - только банки и крышки (тары).

Таблица 19

$m_\sigma$ , кг	$m$	$P_\sigma$
3,98	30	0,3
4,00	50	0,5
4,03	10	0,1
4,04	10	0,1

Таблица 20

$m_T$ , кг	$m$	$P_T$
0,88	20	0,2
0,90	70	0,7
0,93	10	0,1

Определить массу консервированного продукта  $m_H$  - нетто.

**Решение.** Масса консервированного продукта  $m_H$  равна разности двух результатов измерений

$$m_H = m_\sigma - m_T$$

распределения вероятности которых заданы таблично. По тому же принципу, по которому составлена табл. 18, составим табл. 21.

Таблица 21

$m_{\delta}$ , кг	$m_{\tau}$ , кг	$m_H$ , кг	$P_H = P_{\delta} \cdot P_{\tau}$
3,98	0,88	3,10	$0,3 \cdot 0,2 = 0,06$
3,98	0,90	3,08	$0,3 \cdot 0,7 = 0,21$
3,98	0,93	3,05	$0,3 \cdot 0,1 = 0,03$
4,00	0,88	3,12	$0,5 \cdot 0,2 = 0,10$
4,00	0,90	3,10	$0,5 \cdot 0,7 = 0,35$
4,00	0,93	3,07	$0,5 \cdot 0,1 = 0,05$
4,03	0,88	3,15	$0,1 \cdot 0,2 = 0,02$
4,03	0,90	3,13	$0,1 \cdot 0,7 = 0,07$
4,03	0,93	3,10	$0,1 \cdot 0,1 = 0,01$
4,04	0,88	3,16	$0,1 \cdot 0,2 = 0,02$
4,04	0,90	3,14	$0,1 \cdot 0,7 = 0,07$
4,04	0,93	3,11	$0,1 \cdot 0,1 = 0,01$

По данным табл. 21 распределение вероятности массы консервированного продукта можно представить следующим образом:

$m_H$ , кг	$P_H$	$m_H$ , кг	$P_H$
3,05	0,03	3,12	0,10
3,07	0,05	3,13	0,07
3,08	0,21	3,14	0,07
3,10	0,42	3,15	0,02
3,11	0,01	3,16	0,02

или графически, как показано на рис. 60. Оценки числовых характеристик теоретической модели, соответствующей этому эмпирическому распределению вероятности

$$\overline{m_H} = 3,1 \text{ кг}; S_{m_H}^2 = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг}^2.$$

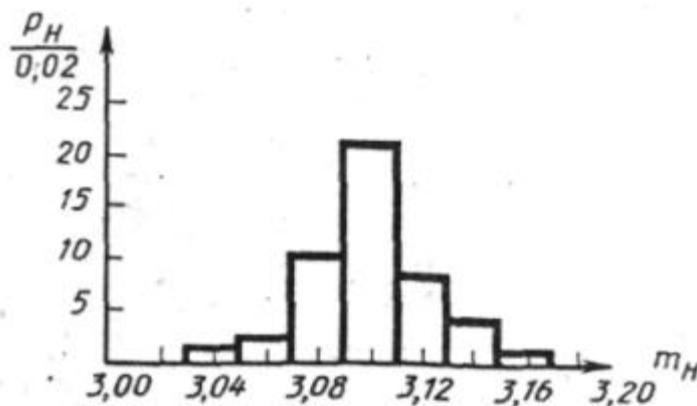


Рис. 60. Гистограмма распределения вероятности разности двух результатов измерений в примере 37

Так как эмпирическим распределениям вероятности, представленным табл. 19 и 20, соответствуют

$$\overline{m_{\delta}} = 4,0 \text{ кг}; S_{m_{\delta}}^2 = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ кг}^2,$$

$$\overline{m_{\tau}} = 0,9 \text{ кг}; S_{m_{\tau}}^2 = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ кг}^2,$$

то действительно среднее арифметическое разности независимых результатов измерений  $Q = A - B$

равно разности их средних арифметических:

$$\bar{Q} = \bar{A} - \bar{B}$$

а квадрат стандартного отклонения — сумме квадратов стандартных отклонений:

$$S_Q^2 = S_A^2 + S_B^2.$$

На этом основании, принимая во внимание, что

$$\bar{m}_\delta = 4,0 \text{ кг}; S_{m_\delta}^2 = \frac{S_{m_\delta}^2}{n} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг}^2,$$

$$\bar{m}_T = 0,9 \text{ кг}; S_{m_T}^2 = \frac{S_{m_T}^2}{n} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг}^2,$$

можно было бы получить

$$\bar{m}_H = \bar{m}_\delta - \bar{m}_T = 3,1 \text{ кг};$$

$$S_H^2 = S_{m_\delta}^2 + S_{m_T}^2 = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг}^2,$$

что соответствует результату, который вытекает непосредственно из оценок числовых характеристик теоретической модели эмпирического распределения вероятности, представленного на с. 151. Судя по гистограмме,  $m_H$  подчиняется нормальному закону распределения вероятности, (что можно проверить по критерию К. Пирсона).

Следовательно, нормальному закону подчиняется и  $\bar{m}_H$ . Поэтому с вероятностью 0,95 масса консервированного продукта

$$3,095 \text{ кг} \leq \bar{m}_H \leq 3,105 \text{ кг}.$$

Из сравнения распределений вероятности  $P(r+r)$  и  $P(2r)$  на рис. 57 и оценок дисперсий  $S_{r+r}^2$  и  $S_{2r}^2$  в примерах 36 и 30 видно, что

$$r + r \neq 2r$$

или в общем случае

$$\sum_{i=1}^n Q_i \neq nQ, \text{ где } Q_i = Q.$$

Игнорирование этого обстоятельства приводит к ошибкам. Например, с вероятностью 0,95 масса 10000 банок консервов, рассмотренных в примере 37, вычисленная по аддитивному алгоритму, составляет  $(40000 \pm \pm 0,4)$  кг, а по мультипликативному -  $(40000+40)$  кг. Нельзя рассчитывать по мультипликативному алгоритму электрическое сопротивление цепи, состоящей из нескольких одинаковых сопротивлений, соединенных последовательно между собой; суммарную электрическую емкость параллельного соединения нескольких одинаковых конденсаторов и т. д., если числовые значения соответствующих величин заданы или определены как случайные числа. В равной мере нельзя заменить суммированием умножение случайного числа на неслучайный постоянный множитель. Например, вес товарной партии консервов, рассмотренной выше, с вероятностью 0,95 составляет примерно  $(4 \cdot 10^5 \pm 4)$  Н, а не  $(4 \cdot 10^5 \pm 1)$  Н.

Закон распределения вероятности суммы независимых результатов измерений называется композицией законов распределения вероятности слагаемых. Для определения композиции различных законов распределения вероятности результатов измерений широко используется метод характеристических функций.

Характеристической функцией случайной величины  $Q$  называется математическое ожидание случайной величины  $e^{jwQ}$ , где  $w$  - неслучайный параметр. Если  $Q$  - сумма независимых результатов измерений  $A, B, \dots$ , то

$$M(e^{jwQ}) = M(e^{jwA} \cdot e^{jwB} \cdot \dots),$$

где сомножители так же независимы, как и результаты измерений. Поэтому

$$M(e^{jwQ}) = M(e^{jwA}) \cdot M(e^{jwB}) \cdot \dots$$

Если характеристическую функцию определить как спектр плотности распределения вероятности результата измерения:

$$M(e^{-jwQ}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jwQ} p_Q(Q) dQ = p_Q^*(w),$$

то

$$p_Q^*(w) = p_A^*(w) \cdot p_B^*(w) \cdot \dots,$$

т. е. спектр плотности распределения вероятности суммы независимых результатов измерений равен произведению спектров плотности распределения вероятности слагаемых. Плотность распределения вероятности композиции нескольких законов распределения независимых результатов измерений находится обратным преобразованием Фурье:

$$p_Q(Q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p_Q^*(w) e^{jwQ} dw.$$

Пользуясь методом характеристических функций, можно показать, что композицией одинаковых равномерных законов распределения вероятности, которым подчиняются два независимых результата измерений, является треугольный закон (рис. 61), называемый законом распределения вероятности Симпсона. Композицией двух равномерных законов распределения вероятности независимых результатов измерений с неодинаковым

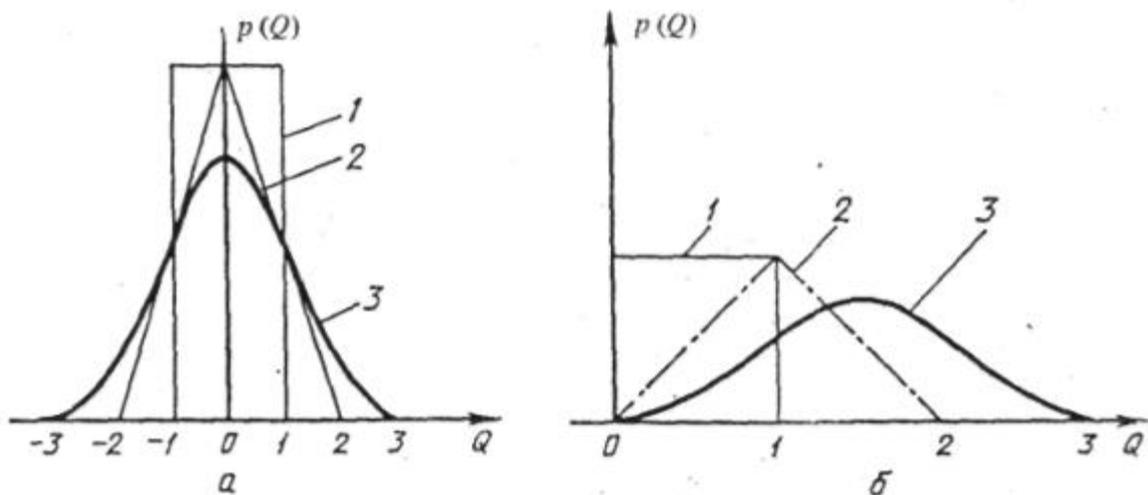


Рис. 61. Равномерная плотность распределения вероятности результата измерения (1) и плотность распределения вероятности композиции двух (2) и трех (3) таких законов распределения вероятности (а – при  $\bar{Q} = 0$ ; б – при  $\bar{Q} = 0,5$ )

размахом является трапециевидальный закон. Это обстоятельство часто используется при учете дефицита информации. Рассматривая произведение большого числа характеристических функций, можно убедиться в том, что независимо от вида сомножителей оно стремится к характеристической функции, соответствующей нормальному закону распределения вероятности. Это фундаментальное положение носит название центральной предельной теоремы. На рис. 61 видно, как быстро нормализуется композиция одинаковых равномерных законов распределения вероятности. При числе слагаемых больше 4-х уже можно считать, что она практически подчиняется нормальному закону.

На практике с распределениями вероятности результатов измерений оперируют только при очень точных вычислениях. Обычно ограничиваются расчетами на уровне

оценок числовых характеристик.

**Пример 38.** При однократном взвешивании продукта в таре, рассмотренной в примере 37, на противоположную чашу настольных циферблатных весов поставлены две гири по  $(2 \pm 0,01)$  кг. Стрелочный указатель весов остановился на отметке шкалы 300 г. Определить массу продукта  $m_H$ , если известно, что показание весов подчиняется нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением 5 г.

**Решение.** 1. По стрелочному указателю (без учета массы гирь и тары) масса продукта с вероятностью 0,95 находится в пределах  $(300 \pm 10)$  г. Представим эту ситуацию равномерным законом распределения вероятности на интервале от 290 до 310 г со средним значением и аналогом дисперсии, равными соответственно

$$\bar{m} = 300 \text{ г};$$

$$u_m^2 = \frac{10^2}{3} = 33,3 \text{ г}^2.$$

2. Чему равна масса каждой гири в интервале от 1,99 кг до 2,01 кг неизвестно. Представим и эту ситуацию математической моделью в виде равномерного закона распределения вероятности на интервале от 1,99 кг до 2,01 кг со средним значением и аналогом дисперсии

$$\bar{m}_g = 2 \cdot 10^3 \text{ г};$$

$$u_{m_g}^2 = 33,3 \text{ г}^2.$$

3. С учетом массы гирь и тары масса продукта будет представлена математической моделью в виде закона распределения вероятности со средним значением и аналогом дисперсии

$$\bar{m}_H = \bar{m} + \bar{m}_g + \bar{m}_g - \bar{m}_g;$$

$$u_{m_H}^2 = u_m^2 + u_{m_g}^2 + u_{m_g}^2 + S_{m_g}^2.$$

В данном случае неслучайное значение массы продукта  $m_H \neq \bar{m}_H$  г. к. ситуационная модель не подчиняется статистическим закономерностям, а учитывает недостаток (дефицит) информации. В соответствии с рекомендацией Международного комитета мер и весов (см. разд. 3.5) примем

$$\bar{m}_H - k u_{m_H} \leq m_H \leq \bar{m}_H + k u_{m_H}$$

где значение коэффициента  $k$  устанавливается по соглашению. Положив, как и раньше,  $k = 2$  и проведя вычисление

$$\bar{m}_H = \sqrt{33,3 + 33,3 + 33,3 + 170} \text{ г}.$$

Получим

$$3,38 \text{ кг} \leq m_H \leq 3,42 \text{ кг}.$$

Подобные вычисления широко используются при внесении аддитивных поправок, точные значения которых неизвестны.

Умножение двух результатов измерений один на другой рассмотрим на примере, когда они равны между собой.

**Пример 39.** Определить площадь квадрата по данным, приведенным в примере 36.

**Решение.** Площадь квадрата  $s$  равна произведению его сторон

$$s = r_1 \cdot r_2,$$

распределение вероятности числовых значений каждой из которых представлено табл. 17. По тому же принципу, по которому составлены табл. 18 и 21, составим табл. 22.

$r_1$	$r_2$	$s$	$P = P_1 \cdot P_2$
3	3	9	$0,2 \cdot 0,2 = 0,04$
3	4	12	$0,2 \cdot 0,5 = 0,10$
3	5	15	$0,2 \cdot 0,3 = 0,06$
4	3	12	$0,5 \cdot 0,2 = 0,10$
4	4	16	$0,5 \cdot 0,5 = 0,25$
4	5	20	$0,5 \cdot 0,3 = 0,15$
5	3	15	$0,3 \cdot 0,2 = 0,06$
5	4	20	$0,3 \cdot 0,5 = 0,15$
5	5	25	$0,3 \cdot 0,3 = 0,09$

Используя данные табл. 22, распределение вероятности площади квадрата можно представить следующим образом:

$s$	$P$	$s$	$P$
9	0,04	16	0,25
12	0,20	20	0,30
15	0,12	25	0,09

среднего значения теоретической модели, этого эмпирического распределения

$$\bar{S} = 16,8.$$

а стандартное отклонение

$$S_s = 4,1.$$

Сравнивая этот результат с результатом, полученным в примере 31, убеждаемся, что

$$r \cdot r \neq r^2,$$

или в общем случае

$$\prod_{i=1}^n Q_i \neq Q^n,$$

Игнорирование этого обстоятельства приводит к еще более серьезным ошибкам, чем при замене аддитивного алгоритма мультипликативным, или наоборот.

Стандартное отклонение среднего арифметического значения площади квадрата

$$S_s = 0,41.$$

Так как закон распределения вероятности среднего арифметического неизвестен, воспользуемся неравенством П.Л. Чебышева: с вероятностью не менее 0,9

$$16,5 \leq S \leq 17,1.$$

$$\text{где } Q_i = Q.$$

Сопоставляя результат, полученный в последнем примере, с исходными данными в примере 30, видим, что оценки математических ожиданий обладают таким же свойством, как и сами математические ожидания: среднее арифметическое произведения нескольких независимых результатов измерений равно произведению их средних арифметических

$$\bar{Q} = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \dots$$

Характеристика рассеяния произведения связана с характеристиками рассеяния множителей более сложной зависимостью, которая будет рассмотрена позже.

На основании рассмотренных примеров 36, 37, и 39 можно заключить, что если

$$Q = f(A, B, \dots),$$

где независимые результаты измерений  $A, B, \dots$  заданы эмпирическими законами распределения вероятности, полученными с помощью цифровых измерительных

приборов, то распределение вероятности

$$P(Q_K) = \sum P(A_i) \cdot P(B_i) \dots,$$

$$Q_K = f(A_i, B_j, \dots)$$

где суммируются только те произведения  $P(A_i)P(B_i) \dots$ , для которых

$$Q_K = f(A_i, B_j, \dots) = Q_K.$$

Если результаты измерений  $A, B, \dots$  заданы теоретическими моделями эмпирических законов распределения вероятности, то следует опять-таки воспользоваться тем, что интегральная функция распределения вероятности  $F(Q)$  представляет собой вероятность того, что

$$f(A, B, \dots) < Q.$$

Это неравенство в многомерном пространстве выполняется для всех точек с координатами  $A, B, \dots$ , геометрическим местом которых является область  $G$ , ограниченная гиперповерхностью

$$f(A, B, \dots) = Q.$$

Поэтому через плотность совместного распределения вероятности результатов измерений  $p(A, B, \dots)$  интересующая нас вероятность выражается следующим образом:

$$F(Q) = \int \dots \int_G p(A, B, \dots) dA dB \dots$$

Если результаты измерений  $A, B, \dots$ , независимы, то

$$F(Q) = \int \dots \int_G p_A(A) p_B(B) \dots dA dB \dots \quad (15)$$

**Пример 40.** Найти плотность распределения вероятности суммы двух независимых результатов измерений  $A$  и  $B$ , первый из которых подчиняется нормированному нормальному закону, а второй - равномерному закону распределения вероятности на интервале  $(-1, 1)$ .

**Решение.** 1. Интегральная функция распределения вероятности  $F(Q)$  композиции двух рассматриваемых в примере законов представляет собой вероятность того что

$$A + B < Q.$$

Это неравенство, выполняется для всех точек с координатами  $(A, B)$ , геометрическим местом которых является область  $G$ , представляющая собой полуплоскость, лежащую ниже прямой  $A + B = Q$  (рис. 62).

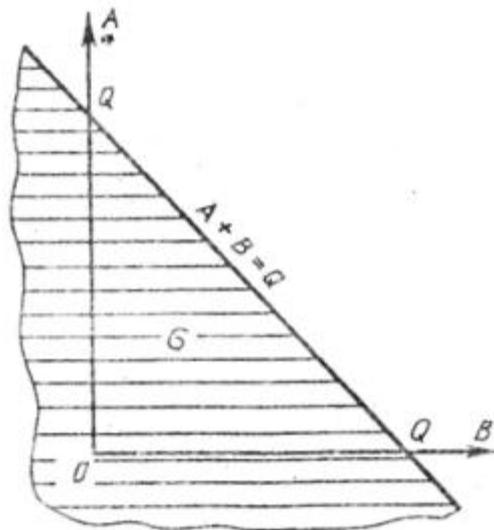


Рис. 62. Графическое решение неравенства  $A + B < Q$  в примере 40

2. Выполняя в (15) интегрирование сначала по  $B$  (при постоянном  $A$ ), а затем по  $A$  (или в обратном порядке) получим:

$$F(Q) = \int_{-\infty}^{\infty} p_A(A) dA \int_{-\infty}^{Q-A} p_B(B) dB = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(B) dB \int_{-\infty}^{Q-B} p_A(A) dA$$

Отсюда плотность распределения вероятности суммы двух независимых результатов измерений

$$p_Q(Q) = \frac{dF(Q)}{dQ} = \int_{-\infty}^{\infty} p_A(A) p_B(Q-A) dA = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(B) p_A(Q-B) dB.$$

3. Так как в рассматриваемом примере  $p_B(B) \neq 0$  лишь в промежутке  $(-1, 1)$ , то

$$p_Q(Q) = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(B) p_A(Q-B) dB = \int_{-1}^1 \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-B)^2}{2}} dB.$$

Подстановкой  $B = Q + v$ ;  $dB = dv$  последний интеграл приводится к виду:

$$p_Q(Q) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \int_{-(1+Q)}^{1-Q} e^{-\frac{1}{2}v^2} dv = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{1-Q} e^{-\frac{1}{2}v^2} dv - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-(1+Q)} e^{-\frac{1}{2}v^2} dv \right).$$

Отсюда

$$p_Q(Q) = \frac{1}{2} [L(1-Q) - L(-1-Q)] = \frac{1}{2} [L(1-Q) + L(1+Q)],$$

где  $L$  - функция Лапласа. График плотности распределения вероятности композиции нормированного нормального и равномерного на интервале  $(-1, 1)$  законов распределения вероятности независимых результатов измерений показан на рис. 63.

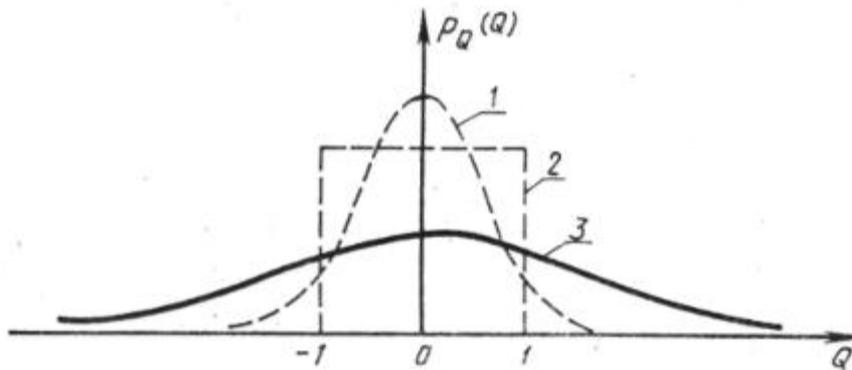


Рис. 63. График плотности распределения вероятности (3) композиции нормированного нормального (1) и равномерного (2) законов распределения

Любые математические операции над результатами измерений связаны с преобразованиями их законов распределения вероятности. При сложных функциях большого числа результатов измерений это сопряжено с преодолением значительных технических трудностей. Поэтому в таких случаях часто ограничиваются приближенными вычислениями на уровне оценок числовых характеристик.

Пусть, например,

$$Q = f(A, B),$$

где  $A$  и  $B$  по-прежнему некоторые результаты измерений. Вводя в рассмотрение показания и поправки, можем написать:

$$A = X + \theta_x; B = Y\theta_y; Q = Z + \theta_z.$$

где поправки будем для простоты считать известными точно постоянными величинами, а

$$X = \bar{X} + \delta_x; Y = \bar{Y} + \delta_y; Z = \bar{Z} + \delta_z.$$

$$\bar{Z} + \theta_z + \delta_z = f(\bar{X} + \theta_x + \delta_x; \bar{Y} + \theta_y + \delta_y)$$

Идея приближенных вычислений состоит в том, что сложную функцию представляют рядом, в котором ограничиваются первыми членами разложения. В данном случае, считая поправки и случайные отклонения от средних значений, малыми по сравнению с  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$ , разложим функцию  $f$  в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} \bar{Z} + \theta_z + \delta_z = f(\bar{X}, \bar{Y}) + \frac{\partial f}{\partial X}(\theta_x + \delta_x) + \frac{\partial f}{\partial Y}(\theta_y + \delta_y) + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2}(\theta_x + \delta_x)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2}(\theta_y + \delta_y)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

Первые слагаемые в правой и левой частях этого выражения не зависят от поправок и случайных отклонений от средних значений. Поэтому

$$\bar{Z} = f(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (17)$$

Как обычно, вместе средних значений  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  могут быть использованы лишь их оценки. Это позволит получить оценку  $\bar{Z}$ , дисперсия которой будет минимальной, если из всех возможных оценок  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  будут выбраны имеющие наименьшую дисперсию. Таковыми являются средние арифметические показаний средств измерений. Поэтому эффективная оценка  $\bar{Z}$  получается в результате подстановки в формулу (17) средних арифметических:

$$\bar{Z} = f(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (18)$$

Для определения поправки  $\theta_z$  вычтем уравнение (17) из уравнения (16):

$$\theta_z + \delta_z = \frac{\partial f}{\partial X}(\theta_x + \delta_x) + \frac{\partial f}{\partial Y}(\theta_y + \delta_y) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2}(\theta_x + \delta_x)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2}(\theta_y + \delta_y)^2 + \dots \quad (19)$$

и усредним левую и правую части получившегося выражения:

$$\begin{aligned} \theta_z = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} (\overline{(\theta_x + \delta_x)^2}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} (\overline{(\theta_y + \delta_y)^2}) + \dots = \\ = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \theta_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \sigma_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \sigma_y^2 + \dots \end{aligned} \quad (20)$$

Отсюда видно, что даже если  $\theta_x = \theta_y = 0$ , все равно может возникнуть необходимость во внесении поправки

$$\theta_z \approx \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \sigma_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \sigma_y^2,$$

если только ею нельзя пренебречь. Возникновение  $\theta$  поправки на неточность вычислений, объясняемое наличием квадратичных членов разложения, является важной особенностью приближенных вычислений на уровне оценок числовых характеристик.

Вычтем теперь уравнение (20) из уравнения (19), ограничившись линейными членами разложения. Получим

$$\delta_z = \frac{\partial f}{\partial X} \delta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \delta_y.$$

Усреднение квадрата левой и правой частей этого выражения позволяет найти приближенное значение дисперсии результата функционального преобразования:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 = \overline{\delta_z^2} = \overline{\left( \frac{\partial f}{\partial X} \delta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \delta_y \right)^2} = \\ = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 \sigma_x^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \overline{\delta_x \delta_y} + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 \sigma_y^2 = \\ = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 \sigma_x^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} R + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 \sigma_y^2 \end{aligned}$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — средние квадратические отклонения результатов измерений А и В; R — центральный момент второго порядка совместного распределения случайных значений А и В.

Общее правило образования центральных моментов совместного распределения двух случайных чисел  $x$  и  $y$ :

$$\overline{(x - \bar{x})^{r-k} (y - \bar{y})^k} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^{r-k} (y - \bar{y})^k p(x, y) dx dy, r > k,$$

где  $r$  — номер или порядок момента. Смешанный момент второго порядка

$$R = \overline{(x - \bar{x})(y - \bar{y})} = \overline{\delta_x \delta_y}$$

называется корреляционным и служит мерой линейной статистической связи между двумя случайными числами, которая в отличие от функциональной, указывает на то, что по каким-то причинам случайные числа обнаруживают тенденцию к синхронному изменению, причем не обязательно в одном направлении. Например, увеличение случайных значений  $x$  сопровождается и некоторым увеличением (рис. 64, а, или наоборот уменьшением — рис. 64, б) случайных значений  $y$ . Обычно это бывает следствием влияния какого-то общего фактора, например, изменения температуры в помещении, где проводятся измерения, или падения напряжения в сети питания и т. п. В первом случае корреляционный момент больше нуля, и говорят о положительной корреляции между случайными числами, во втором — об отрицательной корреляции. Наконец, если в значениях, принимаемых случайными числами, не усматривается никакой статистической связи, их корреляционный момент равен нулю. Такие случайные числа считаются независимыми — рис. 64, в. Обратное утверждение о том, что при  $R = 0$  случайные числа или величины независимы, неверно. Так, корреляционный момент случайных величин А и Q в примере 34

$$R = \overline{(x - \bar{x})(y - \bar{y})} = \overline{A(A^2 - \bar{A}^2)} = \mu\sigma_A^3 - \bar{A}\sigma_A^2 = 0,$$

поскольку для симметричных распределений асимметрия  $\mu$  равна нулю, однако эти величины связаны между собой зависимостью  $Q=A^2$ . Только в частном случае, когда случайные числа или величины подчиняются нормальному закону распределения вероятности, выполнение условия  $R=0$  означает их независимость.

На практике вместо смешанного центрального момента второго порядка может быть вычислена лишь его оценка

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y}.$$

Переходя в выражениях (20) и (21) к оценкам, получим:

$$\theta_z = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \theta_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} S_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} S_y^2 + \dots;$$

$$S_z^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 S_x^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 S_y^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \bar{R};$$

$$S_z = \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 S_x^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 S_y^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \bar{R}}$$

где частные производные называются функциями влияния.

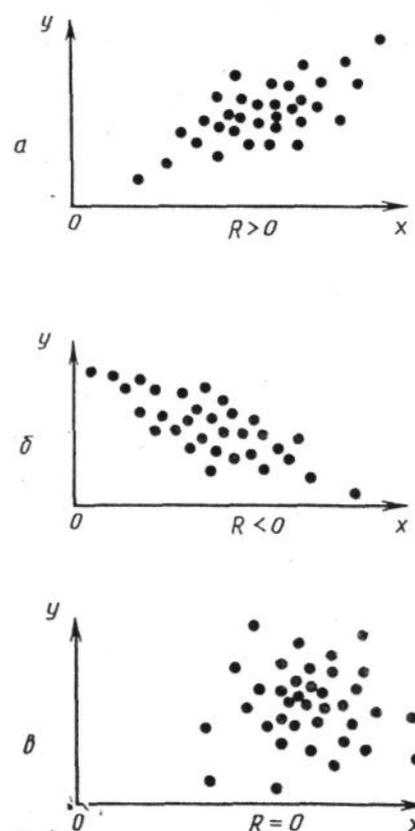


Рис. 64. Варианты статистической связи между двумя случайными числами.

В случае большого числа независимых результатов измерений

$$S_z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^2 S_y^2 + \dots} \quad (22)$$

**Пример 41.** Найти стандартное отклонение площади квадрата в примере 39 по формуле (22).

**Решение.** Так как  $s = r_1 r_2$  то  $\frac{\partial s}{\partial r_1} = r_2$ ;  $\frac{\partial s}{\partial r_2} = r_1$ . Используя вместо  $r_1$  и  $r_2$

их средние арифметические  $\bar{r}_1 = \bar{r}_2 = \bar{r}$ , получим

$$S_s = \sqrt{\bar{r}^2 S_r^2 + \bar{r}^2 S_r^2} = \bar{r} S_r \sqrt{2}.$$

Числовые значения  $\bar{r}$  и  $S_r^2$  вычислены в примере 30. Подставляя их, найдем

$$S_s = 4.1,$$

что соответствует ранее полученному результату.

**Пример 42.** Решить пример 31 методом приближенных вычислений на уровне оценок числовых характеристик.

**Решение.** 1. Согласно выражению (18),

$$\bar{r}^2 = \bar{r}^2 = 4.1^2 = 16.8.$$

Поправка на неточность этого значения

$$\theta_{r^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} r^2 \right) S_r^2 = S_r^2 = 0.5,$$

откуда окончательно

$$\bar{r}^2 = 16.8 + 0.5 \approx 17.3,$$

что соответствует результату, полученному в примере 31.

2. По формуле (22)

$$S_{r^2} = \sqrt{\left( \frac{\partial r^2}{\partial r} S_r \right)^2} = \sqrt{4r^2 S_r^2} = 2r S_r = 5.77,$$

где расхождение в последнем знаке с результатом, полученным в примере 31, свидетельствует о приближенном характере вычислений.

**Пример 43.** С какой скоростью должно вращаться тело в примере 1, чтобы центробежная сила равнялась 2Н? Результаты измерения массы тела и радиуса окружности (в метрах) приведены в табл. 20 и 17.

**Решение.** 1. На основании решения примера 1

$$v = \sqrt{\frac{rF}{m_T}}.$$

2. Согласно формуле (18)

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{\bar{r}F}{\bar{m}_T}} = \sqrt{\frac{4.1 \cdot 2}{0.9}} = 3.02 \text{ м/сек.}$$

Поправка, компенсирующая неточность вычисления этого значения,

$$\theta_v = -\frac{1}{8} \sqrt{\frac{F}{\bar{m}_T \bar{r}}} S_r^2 - \frac{1}{8} \sqrt{\frac{\bar{r}}{\bar{m}_T F^3}} S_F^2 + \frac{3}{8} \sqrt{\frac{\bar{r}F}{\bar{m}_T^5}} S_{m_T}^2 = -0.01 \text{ м/сек.}$$

так как  $S_r^2 = 0,5 \text{ м}^2$ ;  $S_F^2 = 0$ ;  $S_{m_T}^2 = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$ . Следовательно,

$$\bar{v} = 3.01 \text{ м/сек}$$

3. По формуле (22)

$$S_v = \sqrt{\frac{1}{4} \frac{F}{m_T r} S_r^2 + \frac{1}{4} \frac{r}{m_T F^3} S_F^2 + \frac{1}{4} \frac{rF}{m_T} S_{m_T}^2} = 0.26 \text{ м/сек.}$$

4. Стандартное отклонение  $\bar{v}$

$$S_v = 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ м/сек.}$$

Поскольку закон распределения вероятности  $v$  неизвестен, то на основании неравенства П.Л. Чебышева с вероятностью, большей 0,9

$$2.9 \text{ м/сек} \leq v \leq 3.1 \text{ м/сек.}$$

### 5.3. РЕШЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Наиболее общим случаем функционального преобразования результатов измерений является преобразование одной многомерной величины, изображаемой точкой с координатами  $A, B, C, \dots$  в  $n$ -мерном пространстве, в другую многомерную величину-  $Q$ , изображаемую точкой с координатами  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  в  $m$ -мерном пространстве. Результаты измерений  $A, B, C, \dots$  образуют одну систему случайных значений, а координаты  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  — другую, причем  $m \leq n$ .

Многомерная интегральная функция распределения вероятности системы случайных значений  $F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$  в рассматриваемом случае представляет собой вероятность того, что

$$f_1(A, B, C, \dots) < Q_1;$$

$$f_2(A, B, C, \dots) < Q_2;$$

.....

$$f_m(A, B, C, \dots) < Q_m;$$

Совокупность этих неравенств определяет некоторую область  $G$  в  $m$ -мерном пространстве, причем ни одно из неравенств не нарушается, если точки с координатами  $A, B, C, \dots$  находятся в пределах этой области. Вероятность последнего

$$F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \int \dots \int_G p(A, B, C, \dots) dA dB dC \dots$$

Если результаты измерений независимы, то

$$F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \int \dots \int_G p_A(A) p_B(B) p_C(C) \dots dA dB dC \dots$$

Плотность распределения вероятности системы случайных значений

$$p(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \frac{\partial^m F}{\partial Q_1 \dots \partial Q_m}.$$

На практике иногда представляет интерес вероятностно-статистическое описание каждого из значений  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  в отдельности. Эта задача решается путем интегрирования  $F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$  по остальным переменным. В то же время, преобразование одной системы случайных значений  $(A, B, C, \dots)$  в другую  $(Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$  может быть представлено совокупностью уравнений

$$f_1(A, B, C, \dots) = Q_1;$$

$$f_2(A, B, C, \dots) = Q_2;$$

.....

$$f_m(A, B, C, \dots) = Q_m,$$

не предполагающей их совместного решения. Каждое из этих уравнений, называемых

совокупными, решается методами, рассмотренными в разд. 5.2.

Если совокупные уравнения являются линейными, то преобразование одной системы случайных значений в другую может быть представлено в матричной форме, например,

$$\begin{array}{l} Q_1 \\ Q_2 \\ 0 \end{array} \left| \begin{array}{ccc} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \cdot \begin{array}{l} A \\ B \\ C \end{array},$$

где  $d_{ij}$  — коэффициенты в совокупных уравнениях.

Принципиально другим является случай, когда требуется определить значения  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ , связанные со значениями  $A, B, \dots$ , определяемыми посредством измерений, системой линейных уравнений

$$\begin{cases} f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_m, A, B, \dots) = 0; \\ f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_m, A, B, \dots) = 0; \\ \dots \dots \dots \\ f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_m, A, B, \dots) = 0, \end{cases}$$

предполагающей их совместное решение. После подстановки в эти уравнения, называемые совместными, полученных экспериментально значений  $A, B, \dots$  они принимают вид:

$$\begin{cases} f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = 0; \\ f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = 0; \\ \dots \dots \dots \\ f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = 0, \end{cases}$$

где знак равенства носит уже чисто условный характер, т. к. коэффициенты, входящие в эти уравнения, выражены через результаты измерений, не равные в точности значениям  $A, B, \dots$ . Поэтому эти уравнения называются условными. Идея их решения методом наименьших квадратов принадлежит Гауссу.

Если в условные уравнения ввести поправки  $\theta_i$ , обращая их в строгие тождества и называемые в данном случае невязками, то метод наименьших квадратов будет состоять в том, чтобы найти такие оценки  $\overline{Q}_1, \overline{Q}_2, \dots, \overline{Q}_m$ , значений  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ , при которых сумма квадратов невязок была бы минимальной, т. е. в уравнениях

$$\begin{cases} f_1(\overline{Q}_1, \overline{Q}_2, \dots, \overline{Q}_m) + \theta_1 = 0; \\ f_2(\overline{Q}_1, \overline{Q}_2, \dots, \overline{Q}_m) + \theta_2 = 0; \\ \dots \dots \dots \\ f_n(\overline{Q}_1, \overline{Q}_2, \dots, \overline{Q}_m) + \theta_n = 0, \end{cases}$$

величины  $\theta_i$  удовлетворяли бы условию

$$\sum_{i=1}^n \theta_i^2 = \min.$$

Так как

$$\theta_i = f_i(\overline{Q}_1, \overline{Q}_2, \dots, \overline{Q}_m)$$

то требование минимизации суммы квадратов невязок можно записать следующим образом\*:

$$\sum_{i=1}^n \theta_i^2 = \sum_{i=1}^n f_i^2(\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_m) = \min.$$

Функция нескольких переменных  $f_i^2$  достигает минимума в точке, где все ее частные производные равны нулю. Поэтому оценки интересующих нас значений находятся в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial Q_1} = 0; \\ \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial Q_2} = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial Q_m} = 0. \end{cases}$$

\* Если условные уравнения неравноценны, то каждое из них берется со своим весом  $g_j$ . В этом случае минимизируется

$$\sum_{i=1}^n g_i^2 \theta_i^2 = \sum_{i=1}^n g_i^2 f_i^2(\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_m) = \min.$$

Порядок дальнейших расчетов не меняется.

Веса условных уравнений выбираются обратно пропорциональными их дисперсиям, но так, чтобы

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1.$$

Обозначим коэффициенты при неизвестных в условных уравнениях через  $q_{ij}$ , а свободный член через  $l_i$ . Тогда последние уравнения можно будет представить в виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (q_{i1} \bar{Q}_1 + q_{i2} \bar{Q}_2 + \dots + q_{im} \bar{Q}_m - l_i) q_{i1} = 0; \\ \sum_{i=1}^n (q_{i1} \bar{Q}_1 + q_{i2} \bar{Q}_2 + \dots + q_{im} \bar{Q}_m - l_i) q_{i2} = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^n (q_{i1} \bar{Q}_1 + q_{i2} \bar{Q}_2 + \dots + q_{im} \bar{Q}_m - l_i) q_{im} = 0. \end{cases}$$

Раскрыв в них скобки, получим систему так называемых нормальных уравнений

$$\begin{cases} \bar{Q}_1 \sum_{i=1}^n q_{i1} q_{i1} + \bar{Q}_2 \sum_{i=1}^n q_{i1} q_{i2} + \dots + \bar{Q}_m \sum_{i=1}^n q_{i1} q_{im} = \sum_{i=1}^n q_{i1} l_i; \\ \bar{Q}_1 \sum_{i=1}^n q_{i2} q_{i1} + \bar{Q}_2 \sum_{i=1}^n q_{i2} q_{i2} + \dots + \bar{Q}_m \sum_{i=1}^n q_{i2} q_{im} = \sum_{i=1}^n q_{i2} l_i; \\ \dots\dots\dots \\ \bar{Q}_1 \sum_{i=1}^n q_{im} q_{i1} + \bar{Q}_2 \sum_{i=1}^n q_{im} q_{i2} + \dots + \bar{Q}_m \sum_{i=1}^n q_{im} q_{im} = \sum_{i=1}^n q_{im} l_i; \\ \sum_{i=1}^n (q_{i1} \bar{Q}_1 + q_{i2} \bar{Q}_2 + \dots + q_{im} \bar{Q}_m - l_i) q_{im} = 0. \end{cases}$$

которая будет более обозримой, если суммирование по  $i$  обозначить квадратными скобками. При таком обозначении, введенном Гауссом,



$$\begin{cases} \bar{m}_\sigma - 3,98 + \theta_1 = 0; \\ \bar{m}_T - 0,9 + \theta_2 = 0; \\ m_\sigma - m_T - 3,12 + \theta_3 = 0; \\ m_\sigma + m_T - 4,96 + \theta_4 = 0. \end{cases}$$

3. Суммирование произведений каждой функции  $f_i$  на ее производную по первой переменной  $\bar{m}_\sigma$  дает

$$(\bar{m}_\sigma - 3,98) \cdot 1 + 0 + (\bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3,12) \cdot 1 + (\bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4,96) \cdot 1 = 0,$$

по второй ( $\bar{m}_T$ ) —

$$0 + (\bar{m}_T - 0,9) \cdot 1 - (\bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3,12) \cdot 1 + (\bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4,96) \cdot 1 = 0,$$

Таким образом, система нормальных уравнений имеет вид:

$$3\bar{m}_\sigma + 0 = 12,06;$$

$$0 + 3\bar{m}_T = 2,74.$$

4. Каждое из полученных нормальных уравнений дает значение одной из искомым оценок, но, следуя общей схеме расчетов, напомним

$$\bar{m}_\sigma = \frac{\begin{vmatrix} 12,06 & 0 \\ 2,74 & 3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{vmatrix}} = \frac{36,18}{9} = 4,02; \bar{m}_T = \frac{\begin{vmatrix} 3 & 12,06 \\ 0 & 2,74 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{vmatrix}} = \frac{8,22}{9} = 0,91.$$

5. При таких значениях оценок невязки

$$\theta_1 = -0,04; \theta_2 = -0,01; \theta_3 = 0,01; \theta_4 = 0,03,$$

а сумма их квадратов

$$\sum_{i=1}^n \theta_i^2 = 0,0016 + 0,0001 + 0,0001 + 0,0009 = 0,0027.$$

6. Стандартное отклонение первой оценки

$$S_{\bar{m}_\sigma} = \sqrt{\frac{1}{4-2} \cdot \frac{3}{9} \cdot 0,0027} = 0,02,$$

второй —

$$S_{\bar{m}_T} = \sqrt{\frac{1}{4-2} \cdot \frac{3}{9} \cdot 0,0027} = 0,02.$$

7. На основании неравенства П. Л. Чебышева с вероятностью не менее 0,9

$$3,96 \leq m_\sigma \leq 4,08 \text{ кг};$$

$$0,85 \leq m_T \leq 0,97 \text{ кг}.$$

8. Рассмотрим теперь случай, когда заранее известно, что точность взвешивания тары примерно в 1,6 раза выше, чем консервированного продукта брутто:

$$\sigma_{m_\sigma}^2 \approx 2,5\sigma_{m_T}^2$$

Ценность второго условного уравнения тогда больше, чем первого. Если учитывать ценность условных уравнений весовыми коэффициентами, обратно пропорциональными их дисперсиям, то

$$g_1 = 0,2, g_2 = 0,5; g_3 = 0,15; g_4 = 0,15,$$

так как дисперсии третьего и четвертого условных уравнений равны сумме двух первых, а сумма всех весовых коэффициентов должна равняться единице.

Суммирование умноженных на  $g_i^2$  произведений каждой функции  $f_i$  на ее про-

изводную по первой переменной ( $\bar{m}_\sigma$ ) теперь даст

$$0.04(\bar{m}_\sigma - 3.98) \cdot 1 + 0 + 0.0225(\bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3.12) \cdot 1 +$$

$$+ 0.0225(\bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4.96) \cdot 1 = 0,$$

по второй ( $\bar{m}_T$ ) —

$$0 + 0.25(\bar{m}_T - 0.9) \cdot 1 - 0.0225(\bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3.12) \cdot 1 +$$

$$+ 0.0225(\bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4.96) \cdot 1 = 0,$$

Таким образом, система нормальных уравнений имеет вид:

$$0.085\bar{m}_\sigma + 0 = 0.341;$$

$$0 + 0.295\bar{m}_T = 0.266.$$

10. Как непосредственно, так и с помощью определителей получаем

$$\bar{m}_\sigma = \frac{\begin{vmatrix} 0.341 & 0 \\ 0.266 & 0.295 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.085 & 0 \\ 0 & 0.295 \end{vmatrix}} = \frac{0.101}{0.025} = 4.01; \bar{m}_T = \frac{\begin{vmatrix} 0.085 & 0.341 \\ 0 & 0.266 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.085 & 0 \\ 0 & 0.295 \end{vmatrix}} = \frac{0.023}{0.025} = 0.90.$$

11. Невязки, обращающие в тождества условные уравнения,

$$\theta_1 = -0.03; \theta_2 = 0; \theta_3 = 0.01; \theta_4 = 0.05,$$

12. Стандартные отклонения оценок  $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_m$  при неравноценных условных уравнениях

$$S_{\bar{Q}_j} = \sqrt{\frac{1}{n-m} \cdot \frac{D_{jj}}{D} \sum_{i=1}^n g_i^2 \theta_i^2}.$$

Отсюда

$$S_{\bar{m}_\sigma} = \sqrt{\frac{1}{4-2} \cdot \frac{0.295}{0.025} (0.04 \cdot 0.0009 + 0.0225 \cdot 0.0001 + 0.0225 \cdot 0.0025)} = 0.024 \text{жс}$$

$$S_{\bar{m}_T} = \sqrt{\frac{1}{4-2} \cdot \frac{0.085}{0.025} 0.0000955} = 0.013.$$

13. На основании неравенства П. Л. Чебышева с вероятностью не ниже 0,9

$$3.93 \leq \bar{m}_\sigma \leq 4.09 \text{кг};$$

$$0.86 \leq \bar{m}_T \leq 0.94 \text{кг}.$$

### 3.4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Измерение состоит в получении информации о значении измеряемой величины. Означает ли это, что до измерения об этой величине ничего неизвестно?

Нет, не означает. Напротив, для того, чтобы провести измерение, нужно уже знать достаточно много. В первую очередь нужно хорошо себе представлять объект исследования. Внутренний диаметр полого шара не измерить ни обычной линейкой, ни микрометром. Для измерения расстояний между атомами в кристалле не годятся ни концевые, ни штриховые меры длины. Некоторые измерительные задачи вообще бессмысленно ставить. Нельзя, например, измерить ни цвет, ни вкус, ни запах электрона. Нужно знать размерность измеряемой величины. В противном случае будет не ясно, с чем сравнивать ее размер: с метром? килограммом? секундой или другой единицей? Нужно иметь хотя бы ориентировочное представление и о ее размере: температуру в доменной печи не измерить уличным термометром; отсутствие представления о силе электрического тока при грозном разряде обернулось для Г.В. Рихмана трагедией. При постановке

измерительных задач важно установить (а затем исключить, компенсировать, или как-то учесть) факторы, влияющие на результат измерения.

Информация, которой располагают до измерения; называется априорной. Она всегда есть. Если об измеряемой величине мы ничего не знаем, то ничего и не узнаем. С другой стороны, если об измеряемой величине известно все, то измерение не нужно. Необходимость измерения обусловлена дефицитом информации о количественной характеристике измеряемой величины.

Наличие априорной информации о размере измеряемой величины выражается в том, что он не может быть любым в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Всегда можно указать некоторые пределы, в которых находится значение измеряемой величины, пусть даже очень грубо, сугубо ориентировочно. Если нельзя сказать, что в этих пределах какие-то значения измеряемой величины более вероятны, чем другие, то остается принять, что с одинаковой вероятностью измеряемая величина может иметь любое значение от  $Q_1$  до  $Q_2$ , т. е. воспользоваться ситуационной моделью

$$p_0(Q) = \frac{1}{Q_2 - Q_1}$$

представленной графически на рис. 30. Дефицит информации о количественной характеристике измеряемой величины состоит в неопределенности ее значения на интервале  $[Q_1, Q_2]$ . Мера этой неопределенности - энтропия

$$H_0(Q) = \int_{-Q_1}^{Q_2} p_0(Q) \ln p_0(Q) dQ.$$

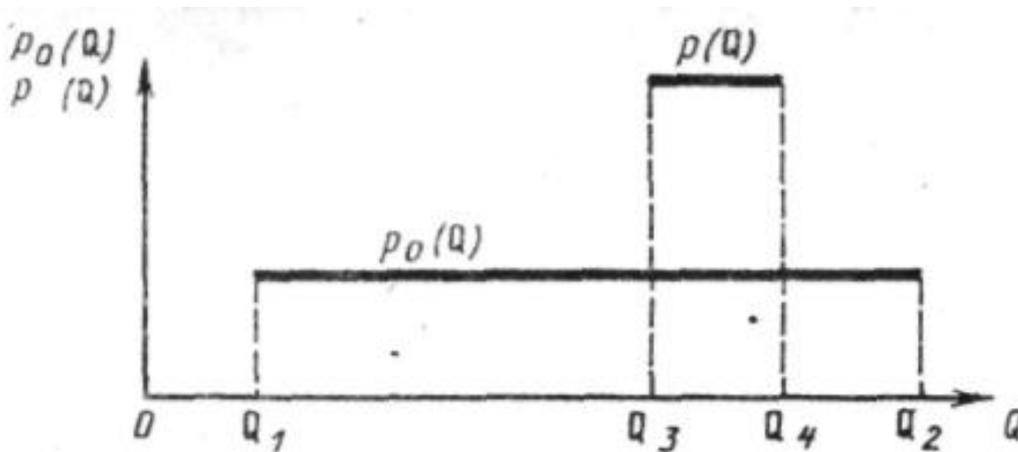


Рис. 30. Априорная  $p_0(Q)$  и апостериорная  $p(Q)$  плотности распределения вероятности значения измеряемой величины.

Таким образом, дефицит информации о значении измеряемой величины перед измерением составляет

$$H_0(Q) = - \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{1}{Q_2 - Q_1} \ln \frac{1}{Q_2 - Q_1} dQ = \ln(Q_2 - Q_1).$$

Рассмотрим теперь ситуацию, складывающуюся после выполнения измерения. Результат измерения является случайным значением измеряемой величины. Если влияние постоянно действующих и закономерно изменяющихся во времени факторов компенсировано поправками, а ошибки исключены, то отдельные значения результата измерения являются либо завышенными, либо заниженными по чисто случайным причинам:

$$Q_1 = Q + \delta_1;$$

$$Q_2 = Q + \delta_2;$$

.....

$$Q_i = Q + \delta_i;$$

.....

$$Q_n = Q + \delta_n,$$

где случайное отклонение  $\delta$  принимает значения, разные по абсолютной величине и знаку. Среднее значение случайного отклонения  $\bar{\delta}$  равно нулю. Поэтому

$$\bar{Q} = \overline{Q + \delta} = Q$$

Таким образом, (см. рис. 31) значение измеряемой величины равно среднему значению результата измерения. Несмещенность среднего значения результата измерения относительно значения измеряемой величины обеспечивает правильность измерений.

Однако на практике вычислить среднее значение результата измерения невозможно, так как при конечном объеме экспериментальных данных невозможно интегрирование в бесконечных пределах. Невозможно, следовательно, установить и значение измеряемой величины. На практике исходят из того, что никакое значение результата измерения с выбранной доверительной вероятностью не может отличаться от среднего значения больше чем на половину доверительного интервала. Поэтому среднее значение результата измерения  $\bar{Q}$ , а следовательно, и значение измеряемой величины  $Q$  с такой же вероятностью не отличаются от любого значения  $Q_i$  больше чем на половину доверительного интервала — рис. 32. Это позволяет после выполнения измерения установить интервал  $[Q_3; Q_4]$ , в котором с выбранной вероятностью находится значение  $Q$ .

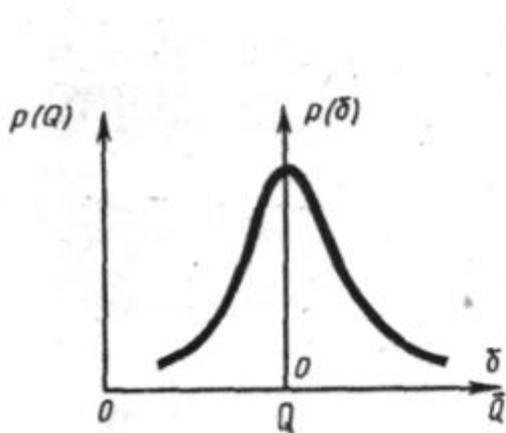


Рис. 31. Графики плотности распределения вероятности результата измерения и его случайного отклонения от значения измеряемой величины

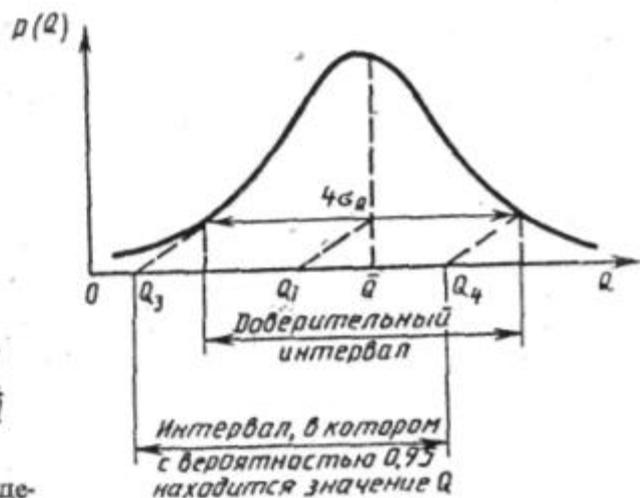


Рис. 32. Область определения  $Q$  с доверительной вероятностью 0,95

Ничего определенного относительно того, чему равно  $Q$  в пределах установленного интервала, сказать нельзя. Можно поэтому принять, что на этом интервале любые значения  $Q$  равновероятны, т. е. опять-таки воспользоваться ситуационной моделью

$$p(Q) = \frac{1}{Q_4 - Q_3},$$

показанной на рис. 30. Все значение измерения заключается в том, что интервал  $[Q_3; Q_4]$  меньше интервала  $[Q_1, Q_2]$ , в котором, как было установлено на основе анализа априорной

информации, находится значение измеряемой величины. Таким образом, можно сказать, что измерение состоит в уточнении значения измеряемой величины. Однако точное значение остается неизвестным и после измерения. Остаточная неопределенность составляет

$$H(Q) = - \int_{Q_3}^{Q_4} \frac{1}{Q_4 - Q_3} \ln \frac{1}{Q_4 - Q_3} dQ = \ln(Q_4 - Q_3).$$

то есть после измерения дефицит информации о значении измеряемой величины уменьшается на

$$I = H_0(Q) - H(Q) = \ln \frac{Q_2 - Q_1}{Q_4 - Q_3}.$$

Эта величина интерпретируется как количество информации, получаемой в результате измерения, а протяженность интервалов  $[Q_1, Q_2]$  и  $[Q_3, Q_4]$  характеризует точность, с которой известно значение физической величины до и после ее измерения.

По ширине доверительного интервала, в котором с выбранной доверительной вероятностью устанавливается значение измеряемой величины, измерения делятся на измерения низкой, высокой, высшей и наивысшей точности (см. рис. 33). Технические средства, обеспечивающие высший и наивысший уровни точности, для практических измерений не используются. Подробно они рассматриваются в разд. 4. Средства измерений могут быть высокой и низкой точности, хотя такая градация весьма условна: отдельные уникальные средства измерений могут достигать наивысшего уровня точности. Кроме того нужно иметь в виду, что точность измерений определяется не только точностью средств измерений, но и многими другими факторами, рассмотренными в разд. 3.3.

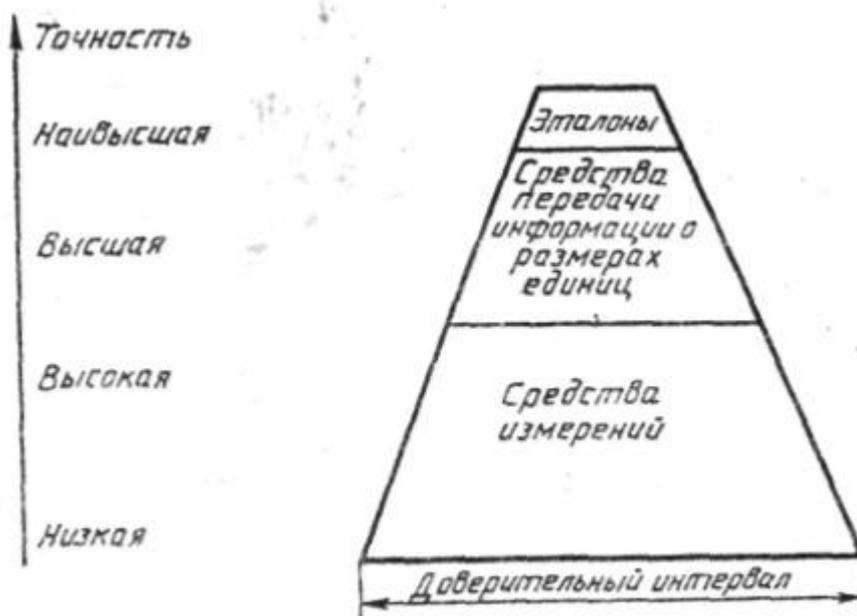


Рис. 33. Уровни точности измерений

### 3.5. ОДНОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ

подавляющее большинство измерений являются однократными. Можно сказать, что в обиходе, в торговле, во многих областях производственной деятельности выполняются только однократные измерения. В обычных условиях их точность вполне приемлема, а простота, высокая производительность (количество измерений в единицу времени) и низкая стоимость (по оценке трудозатрат) ставят их вне конкуренции. Многие

люди до конца своей жизни остаются знакомыми только с однократными измерениями.

Результат однократного измерения описывается выражением (5), приведенным в разд. 3.1. Сам по себе он ни о чем еще не говорит, так как является случайным значением измеряемой величины. Необходимым условием проведения однократного измерения служит наличие априорной информации. К ней относится, например, информация о виде закона распределения вероятности показания и мере' его рассеяния, которая извлекается из опыта предшествующих измерений. Если ее нет, то используется информация 0 том, насколько значение измеряемой величины может отличаться от результата  $s$  однократного измерения. Такая информация бывает представлена классом точности средства измерений (см. разд. 2.3.3). К априорной относится информация о значении аддитивной или мультипликативной поправки (для конкретности ограничимся рассмотрением аддитивной поправки  $\theta_i$ ). Если оно не известно, то это учитывается ситуационной моделью, согласно которой с одинаковой вероятностью значение поправки может быть, например, любым в пределах от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$ . Без априорной информации выполнение однократного измерения бессмысленно.

Порядок действий при однократном измерении показан на рис. 34. Предварительно проводится тщательный анализ априорной информации. В ходе этого анализа уясняется физическая сущность изучаемого явления, уточняется его модель, определяются влияющие факторы и меры, направленные на уменьшение их влияния (термостатирование, экранирование, компенсация электрических и магнитных полей и др.) значения поправок, принимается решение в пользу той или иной методики измерения, выбирается средство измерений, изучаются его метрологические характеристики и опыт выполнения подобных измерений в прошлом. Важным итогом этой предварительной работы должна стать твердая уверенность в том, что точности однократного измерения достаточно для решения поставленной задачи. Если это условие выполняется, то после необходимых приготовлений, включающих установку и подготовку к работе средства измерений, исключение или компенсацию влияющих факторов, выполняется основная измерительная процедура — получение одного значения отсчета.

Отсчет, согласно основному постулату метрологии, является случайным числом. Ни одно из отдельных его значений не дает полного представления о таком числе. Поэтому уже на этапе получения отсчета возникает дефицит измерительной информации, который может быть восполнен только за счет априорных сведений.

Единственное значение отсчета  $x_i$  дает одно единственное значение показания  $X_i$  средства измерений, имеющее ту же размерность, что и измеряемая величина. В это значение показания вносится поправка  $\theta_i$ . Если значение известно точно, то результат измерения  $Q$  будет представлен единственным значением

$$Q_i = X_i + \theta_i$$

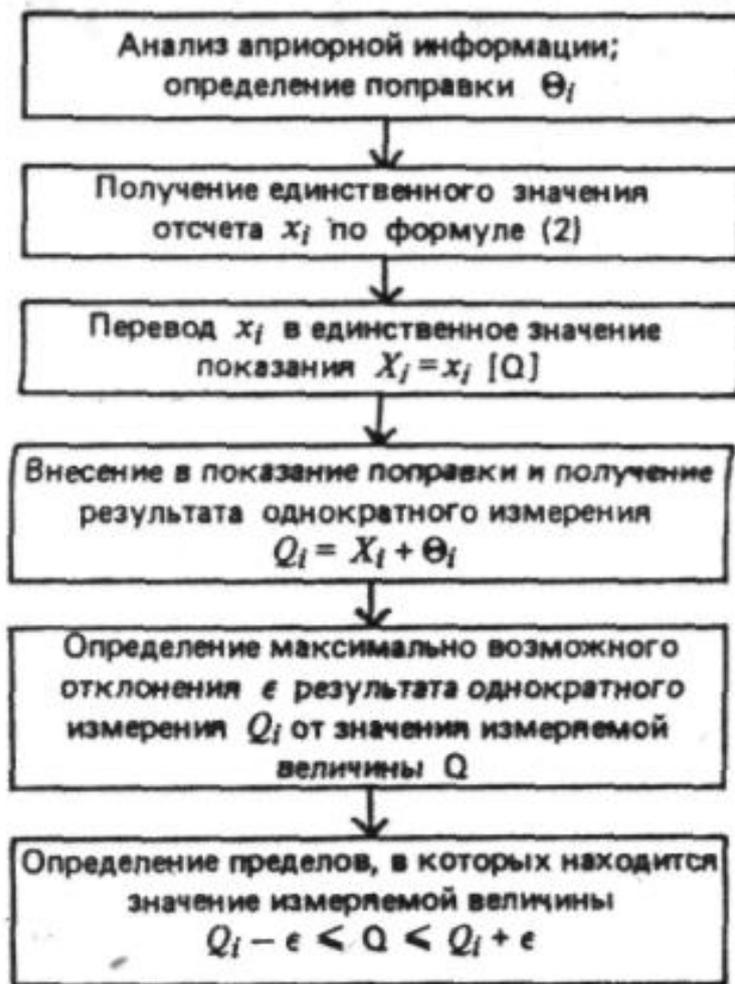


Рис. 34. Порядок выполнения однократного измерения при точно известном значении аддитивной поправки

Если значение поправки неизвестно, то при выбранной ситуационной модели результат однократного измерения  $Q_i$  с равной вероятностью может быть любым в пределах от  $X_i + \theta_{\min}$  до  $X_i + \theta_{\max}$ , ибо в последнем выражении  $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$ .

Конечной целью измерительного эксперимента является получение достоверной количественной информации о значении измеряемой величины. На пути к достижению этой цели получение результата однократного измерения служит промежуточным этапом. Дальнейшее зависит от того, как используется априорная информация. Проанализируем несколько конкретных вариантов.

Вариант 1. *Априорная информация*: отсчет, а следовательно показание подчиняются нормальному закону распределения вероятностей со средним квадратическим отклонением  $\sigma_x$ ; точное значение аддитивной поправки равно  $\theta_i$ .

В этом случае результат измерения  $Q$  подчиняется нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $\sigma_Q = \sigma_x$ , но смещенному по отношению к закону распределения вероятности показания на значение поправки  $\theta_i$  (см. формулу 5), внесение которой обеспечивает правильность измерения. Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , можно по верхней кривой на рис. 29 определить, на сколько  $\sigma_Q$  результат однократного измерения  $Q_i$  может отличаться от среднего значения результата измерения  $\bar{Q}$ , равного значению измеряемой величины  $Q$ . Обозначив половину доверительного интервала через  $e = t\sigma_Q$ , найдем, что с выбранной

вероятностью

$$Q_i - e \leq Q \leq Q_i + e.$$

Вариант 2. *Априорная информация*: отсчет, а следовательно и показание подчиняются равномерному закону распределения вероятности с размахом  $e = X_{\max} - \bar{X}$ ; точное значение аддитивной поправки равно  $\theta_i$ .

Такой вариант встречается при люфте подвижной части измерительного механизма. Результат измерения  $Q$  подчиняется равномерному закону распределения вероятности с тем же размахом  $e$ , но смещенному по отношению к закону распределения вероятности показания на значение поправки  $\theta_i$ , внесением которой обеспечивается правильность измерения. Значение измеряемой величины  $Q$ , равное среднему значению результата измерения  $\bar{Q}$ , находится в пределах

$$Q_i - e \leq Q \leq Q_i + e$$

Вариант 3. *Априорная информация*: отсчет, а следовательно и показание подчиняются неизвестному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $\sigma_x$ ; точное значение аддитивной поправки равно  $\theta_i$ .

В данном случае закон распределения вероятности результата измерения неизвестен, известно лишь его среднее квадратическое отклонение  $\sigma_Q = \sigma_x$ . Вероятность того, что результат однократного измерения  $Q_i$  окажется за пределами доверительного интервала при любом законе распределения вероятности

$$P\{Q_i - \bar{Q} > t\sigma_Q\} = \int_{-\infty}^{\bar{Q}-t\sigma_Q} p(Q)dQ + \int_{\bar{Q}+t\sigma_Q}^{\infty} p(Q)dQ.$$

Введем в рассмотрение функцию

$$\zeta(Q) = \begin{cases} 1 & \text{при } Q < \bar{Q} - t\sigma_Q; \\ 0 & \text{при } \bar{Q} - t\sigma_Q < Q < \bar{Q} + t\sigma_Q; \\ 1 & \text{при } Q > \bar{Q} + t\sigma_Q. \end{cases}$$

график которой показан на рис. 35. Это позволит перейти к более компактной записи:

$$P\{Q_i - \bar{Q} > t\sigma_Q\} = \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(Q) p(Q) dQ.$$

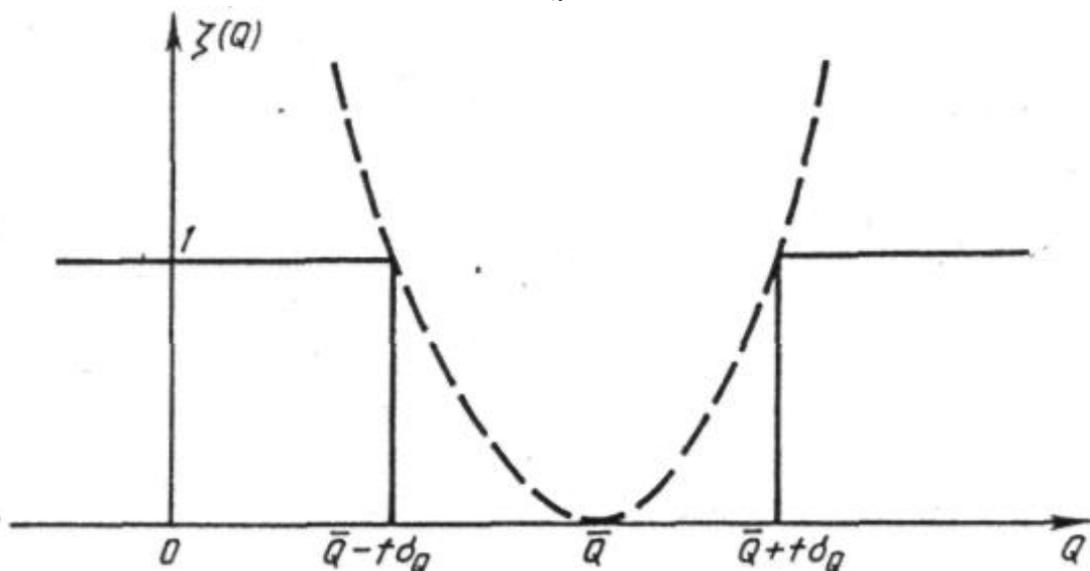


Рис. 35. К выводу неравенства П.Л. Чебышева

Результат интегрирования не уменьшится, если функцию  $\zeta(Q)$  заменить показанной на рис. 35 пунктиром квадратичной функцией  $\left(\frac{Q-\bar{Q}}{t\sigma_Q}\right)^2$

которая при всех  $Q$  не меньше  $\zeta(Q)$ . Тогда

$$P\{|Q_i - \bar{Q}| > t\sigma_Q\} \leq \frac{1}{(t\sigma_Q)^2} \int_{-\infty}^{\infty} (Q_i - \bar{Q})^2 p(Q) dQ = \frac{1}{t^2}.$$

Вероятность того, что результат однократного измерения  $Q_i$  при любом законе распределения вероятности не отличается от среднего значения больше чем на половину доверительного интервала,

$$P\{\bar{Q} - t\sigma_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + t\sigma_Q\} \leq 1 - \frac{1}{t^2}.$$

Полученная формула носит название неравенства П.Л. Чебышева. Она устанавливает нижнюю границу вероятности того, что ни при каком законе распределения вероятности случайное значение результата измерения не окажется за пределами доверительного интервала. Эта граница нанесена на рис. 29 в виде нижней кривой.

При симметричных законах распределения вероятности результата измерения неравенство П.Л. Чебышева имеет вид

$$P\{\bar{Q} - t\sigma_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + t\sigma_Q\} \geq 1 - \frac{4}{9} \cdot \frac{1}{t^2}.$$

Соответствующая граница проходит выше и левее. На рис. 29 она показана пунктиром.

Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , можно по нижней кривой на рис. 29 определить, на сколько  $\sigma_Q$  результат однократного измерения  $Q_i$  может отличаться от среднего значения результата измерения  $Q$ , равного значению измеряемой величины  $Q$ , при любом законе распределения вероятности. Обозначив, как и ранее половину доверительного интервала через  $\varepsilon = t\sigma_Q$ , найдем, что с наименьшей вероятностью

$$Q_i - \varepsilon \leq Q \leq Q_i + \varepsilon$$

Вариант 4. Априорная информация: класс точности средства измерений таков, что значение измеряемой величины не может отличаться от результата однократного измерения больше чем на  $\varepsilon$ ; точное значение аддитивной поправки равно  $\theta_i$ .

Этот вариант ничем не отличается от второго. Значение измеряемой величины

$$Q_i - \varepsilon \leq Q \leq Q_i + \varepsilon$$

Вариант 5. Априорная информация: отсчет; а следовательно, и показание подчиняются нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $\sigma_x$ ; значение аддитивной поправки находится в пределах от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$ .

Ситуационной моделью, учитывающей неопределенность значения поправки, является равномерный закон распределения вероятности  $\theta$  на интервале от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$ . Закон распределения вероятности результата измерения  $Q$  представляет собой композицию законов распределения вероятности показания и ситуационной модели. Композиция, в которую входит ситуационная модель, не подчиняется вероятностно-статистическим закономерностям. Однако по аналогии с вариантом 1 в 1981 году Международным комитетом мер и весов рекомендовано считать, что с высокой вероятностью среднее значение композиции, равное значению измеряемой величины, не отличается от результата однократного измерения больше чем на  $\varepsilon = k u_Q$  где  $u_Q = \sqrt{\sigma_x^2 + u_\theta^2}$ , а коэффициент  $k$ , аналогичный коэффициенту  $t$ , устанавливается по соглашению. Обычно он принимается равным 2... 3.

Пример 23. Единственное значение отсчета в условиях, рассмотренных в примере 21, равно 1. Из опыта предшествовавших измерений известно, что отсчет подчиняется нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $2 \cdot 10^{-3}$ . В каких пределах находится значение измеренного линейного размера?

Решение. 1. Единственное значение показания равно 1 м. Показание подчиняется нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением  $2 \cdot 10^{-3}$ .

2. Ситуационная модель, учитывающая дефицит информации о значении аддитивной температурной поправки, представлена графически на рис. 25, б. Ее численные характеристики  $\bar{v}=5,5$  мм; и  $u_v=2,6$  мм.

3. Аналог среднего квадратического отклонения результата измерения

$$u_Q = \sqrt{\sigma_x^2 + u_v^2} = 3.3 \text{ мм.}$$

4. Принимая  $k = 2$ , и выбирая в качестве результата однократного измерения  $l_i = 1000 + 5,5 = 1005,5$  мм, получим

$$998,9 \text{ мм} \leq l \leq 1012,1 \text{ мм}$$

Рассмотренный пример позволяет сделать несколько замечаний.

Замечание 1. Получение результата измерения служит промежуточным этапом, на котором измерительная информация должна представляться в форме, удобной для ее дальнейшей обработки (переработки). Такой формой является представление результата измерения с помощью числовых характеристик закона распределения вероятности. При однократном измерении чаще всего используется такая числовая характеристика законов распределения вероятности, как среднее квадратическое отклонение (или его аналог). С ее помощью определяются пределы, в которых находится значение измеряемой величины, осуществляется внесение поправки, точное значение которой неизвестно. Если пользоваться стандартными аппроксимациями законов распределения вероятности, представленными в табл. 8, то переход к этой числовой характеристике удобно осуществить с помощью коэффициентов, приведенных в третьей графе.

Замечание 2. Цель измерения состоит в уточнении значения измеряемой величины. Если измерительная информация не предназначена для дальнейшей обработки (переработки), то она должна быть представлена в форме, удобной для восприятия человеком. Такой формой является указание пределов, в которых находится значение измеренной величины. Не рекомендуется пользоваться записью  $Q = Q_i \pm \varepsilon$ , так как в силу особенностей человеческой психики при этом возникает некоторая доминант на акцент на середину интервала, для чего нет никаких оснований. Все значения  $Q$  в интервале  $Q_i - \varepsilon \leq Q \leq Q_i + \varepsilon$  равновероятны.

Замечание 3. Внесение поправки, точное значение которой неизвестно, с одной стороны смещает интервал, в пределах которого находится значение измеряемой величины, а с другой - расширяет его. Из рассмотрения рис. 36 следует, что внесение неточно известной поправки целесообразно только тогда, когда  $\bar{\theta} > \varepsilon - t\sigma_x$ .

Замечание 4 касается достоверности измерений. Под достоверностью понимается степень доверия к тому, что значение измеренной величины находится в указанном интервале. Рассмотрим два случая, чаще всего встречающиеся на практике.

Таблица 8

Аппроксимирующая функция	График плотности вероятности	$a/\sigma_x$
Нормальная (усеченная)		3,0
Треугольная		2,4
Трапециевидальная		2,3
Равномерная		1,7
Антимодальная I		1,4
Антимодальная II		1,2
Релея (усеченная)		3,3

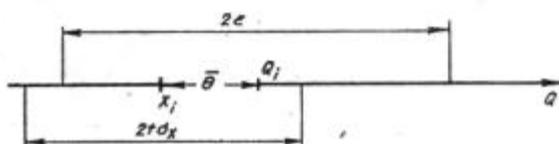


Рис. 36. Интервал, в пределах которого находится значение измеряемой величины, до и после внесения неточно известной поправки

1. Результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности (см., например, вариант 1), что бывает чаще веере при точно известном значении поправки. Точность результаты измерения (см. рис. 37) в этом случае равна точности показания, которая в свою очередь характеризует точность средства измерений. Точность измерения — ширина интервала, в котором устанавливается значение измеряемой величины — зависит от выбранной доверительной вероятности. Чем выше эта вероятность, тем с большей гарантией, с большей достоверностью устанавливается значение измеряемой величины. С вероятностью 0,95

$$Q_i - 2\sigma_Q \leq Q \leq Q + 2\sigma_Q$$

с вероятностью 0,99

$$Q_i - 2.6\sigma_Q \leq Q \leq Q + 2.6\sigma_Q$$

с вероятностью 0,997

$$Q_i - 3\sigma_Q \leq Q \leq Q + 3\sigma_Q.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае доверительная вероятно! является мерой достоверности измерений.

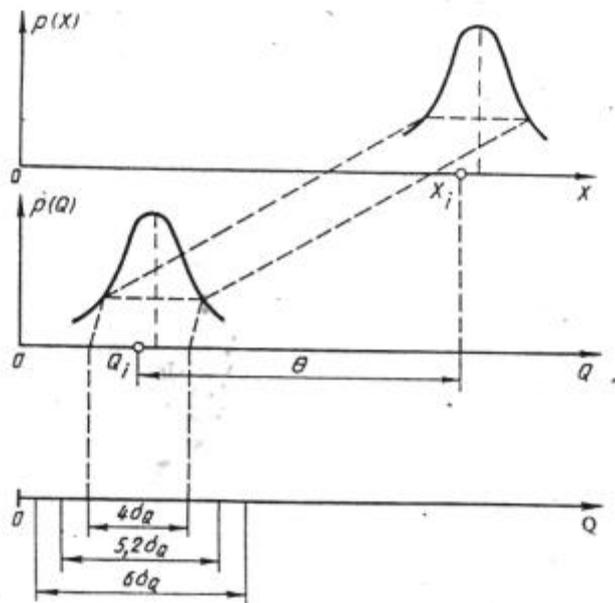


Рис. 37. К пояснению о достоверности измерения при точно известном значении поправки

2. Результат измерения описывается композицией закона распределения вероятности показания и ситуационной модели, учитывающей неточность значения поправки (рис. 38). Достоверность измерений в этом случае обеспечивается выбором коэффициента  $k$ .

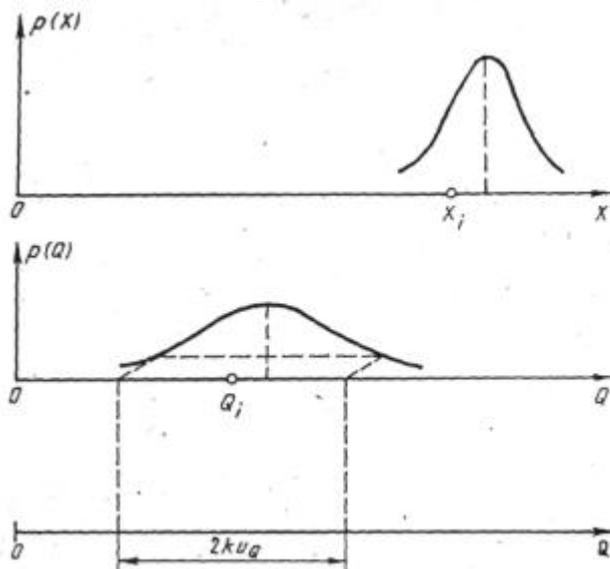


Рис.38. К пояснению достоверности измерений при неточно известном значении поправки.

■

**Замечание 5** связано с правилами округления. В метрологии принято среднее квадратическое отклонение или его аналог выражать одной значащей цифрой, например, 8; 0,5; 0,007. Две значащие цифры, например, 27; 0,016 удерживаются при особо точных измерениях и в те\* случаях, когда значащая цифра старшего разряда меньше 4 (в промежуточных вычислениях сохраняется на одну значащую цифру больше). Вследствие этого, при квадратичном суммировании

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$$

любым из слагаемых  $u_i$ , под радикалом можно пренебречь, если его учет почти не меняет  $u$ . Строго говоря,  $u$  при этом может уменьшиться до  $u'$ , но так как значение  $u$

выражается не более чем двумя значащими цифрами, то условие можно считать выполненным, если  $u - u' < 0.05u$ , откуда  $0.95u < u'$ . Возводя обе части неравенства в квадрат и принимая во внимание, что  $(u')^2 = u^2 - u_i^2$ , получим

$$0.9025u^2 < u - u_i^2;$$

$$u_i^2 < 0.0975u^2;$$

$$u_i < 0.312u.$$

Таким образом, слагаемым

$$u_i \leq \frac{1}{3}u \quad (10)$$

всегда можно пренебречь. Это правило распространяется и на сумму нескольких слагаемых.

В п. 3.3.4 отмечалось, что при измерениях никто не застрахован от ошибок. Может оказаться ошибочным и единственное значение отсчета  $x_i$  при однократном измерении. Во избежание такой ошибки однократное измерение рекомендуется 2 ... 3 раза повторить без совместной обработки полученных результатов.

### **3.6. МНОГОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ С РАВНОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТСЧЕТА**

Многократное измерение одной и той же величины постоянного раз-мера производится при повышенных требованиях к точности измерений. Такие измерения характерны для профессиональной метрологической деятельности и выполняются в основном сотрудниками государственной и ведомственных метрологических служб, а также при тонких научных экспериментах. Это сложные, трудоемкие и дорогостоящие измерения целесообразность которых должна быть всегда убедительно обоснована. Один из создателей теории информации Л. Бриллюэн в статье «Теория информации и ее приложение к фундаментальным проблемам физики» привел слова Д. Табора о том, что «ничто не дается даром, в том числе информация». В полной мере это относится и к измерительной информации.

Результат многократного измерения описывается выражением (6) приведенным в разд. 3.1. Как и результат однократного измерения, он является случайным значением измеряемой величины, но его дисперсия

$$D\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n D(Q_i) = \frac{n\sigma_Q^2}{n^2} = \frac{\sigma_Q^2}{n}$$

в  $n$  раз меньше дисперсии результата измерения  $Q$ . Благодаря такому обстоятельству, как это видно на рис.39, где выделены интервалы, соответствующие доверительной вероятности 0,95, точность определения значения измеряемой величины повышается в  $\sqrt{n}$  раз.

На рис. 39 показан случай, когда результат многократного измерения — среднее арифметическое значение результата измерения  $\bar{Q}$  — подчиняется нормальному закону распределения вероятности. Так бывает всегда, когда нормальному закону распределение вероятности подчинялся сам результат измерения  $Q$ . Наличие массива экспериментальных данных

$$Q_i = X_i + \theta_i; i \in \{1, \dots, n\}$$

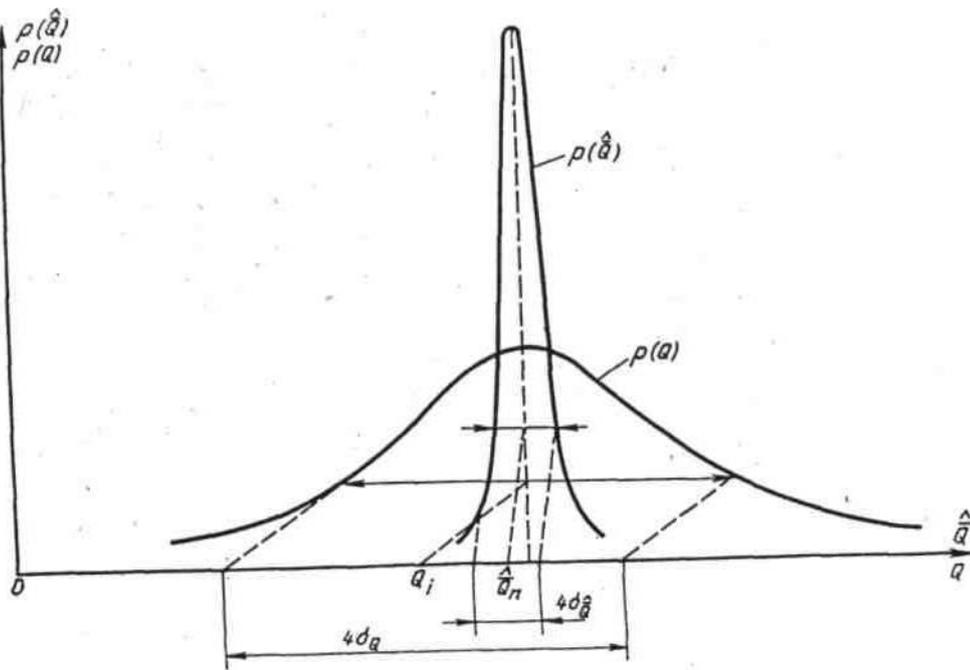


Рис. 39. Графики плотности распределения вероятности результата измерения и его среднего арифметического значения

позволяет получить апостериорную информацию о законе распределения вероятности результата измерения. В частности, может быть поставлена задача его определения. Но чаще ограничиваются проверкой нормальности закона распределения вероятности результата измерения и жертвуют точностью при отрицательных результатах проверки.

Другой возможностью, которая открывается благодаря наличию большого объема экспериментальных данных, является обнаружение и исключение ошибок по правилу „трех сигм“. Таким образом, специфическая особенность многократного измерения состоит в эффективном использовании апостериорной измерительной информации.

Последнее вовсе не означает, что необходимость в анализе априорной информации отпадает. Такой анализ обязательно предшествует многократному измерению и преследует те же цели, что и при однократном измерении, но с той разницей, что при многократном измерении информация о законе распределения вероятности результата измерения получается опытным путем.

Вслед за анализом априорной информации и тщательной подготовкой к многократному измерению получают  $n$  независимых значений отсчета. Эта основная измерительная процедура может быть организована по-разному. Если изменением измеряемой величины во времени можно пренебречь, то все значения отсчета проще всего получить путем многократного повторения операции сравнения (2) с помощью одного и того же средства измерений. Отсчет в этом случае будет описываться эмпирической плотностью распределения вероятности  $P(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  — см. пример 12, — где согласно основному постулату метрологии каждое значение отсчета является случайным числом, подчиняющимся этому закону распределения вероятности. Такие значения отсчета  $x_i$ , имеющие одинаковую дисперсию, называются равноточными. Если же из априорной информации следует, что за время измерения произойдет существенное изменение измеряемой величины, то ее измеряют одновременно несколькими средствами измерений, каждое из которых дает одно из независимых значений отсчета  $x_i$ . Так как средства измерений могут отличаться по точности, то в эмпирической плотности распределения вероятности отсчета  $P(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  случайные числа  $x_i$  могут иметь разную дисперсию. Такие значения отсчета  $x_i$  называются неравноточными. Многократное измерение с неравноточными значениями отсчета рассматривается в следующем разделе.

Порядок выполнения многократного измерения с равноточными значениями отсчета показан на рис. 40.

Все значения отсчета  $x_i$ , независимо от способа их получения, переводятся в показания  $X_i$ , в которые вносятся поправки  $\theta_i$ . Если многократное измерение выполняется одним средством измерений, то поправки могут отличаться друг от друга из-за изменения во времени влияющих факторов. Если же используются одновременно несколько средств измерений, то поправки отличаются из-за индивидуальных особенностей каждого из них. Для простоты будем считать их известными точно.

Полученный массив экспериментальных данных может содержать ошибки. Причины появления ошибок и „правило трех сигм“, которым пользуются для их выявления, рассмотрены в разд. 3.3.4. Для того, чтобы воспользоваться этим правилом, нужно знать числовые характеристики закона распределения вероятности' результата измерения — среднее значение  $\bar{Q}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_Q$ . Однако, как уже отмечалось в разд. 3.2, 3.4, вычислить их невозможно из-за конечного  $n$  и практической нереализуемости интегрирования в бесконечных пределах. Можно лишь как-то оценить эти числовые характеристики на основе ограниченного экспериментального материала, указать их приближенные значения или пределы, в которых они находятся с определенной вероятностью.

### 3.6.1. Точечные оценки числовых характеристик

Оценки числовых характеристик законов распределения вероятности случайных чисел или величин, изображаемые точкой на числовой оси, называются точечными. В отличие от самих числовых характеристик оценки являются случайными, причем их значения зависят от объема экспериментальных данных, а законы распределения вероятности - от законов распределения вероятности самих случайных чисел или значений измеряемых величин. Оценки должны удовлетворять трем требованиям: быть состоятельными, несмещенными и эффективными. Состоятельной называется оценка, которая сходится по вероятности к оцениваемой числовой характеристике. Несмещенной является оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемой числовой характеристике. Наиболее эффективной считают ту из нескольких возможных несмещенных оценок, которая имеет наименьшее рассеяние.

Рассмотрим  $n$  независимых значений  $Q_i$ , полученных при измерении физической величины постоянного размера. Пусть, как и раньше (см. разд. 3.4), каждое из них отличается от среднего значения на случайное отклонение  $\delta_i$ :

$$Q_1 = \bar{Q} + \delta_1;$$

$$Q_2 = \bar{Q} + \delta_2;$$

.....

$$Q_i = \bar{Q} + \delta_i;$$

.....

$$Q_n = \bar{Q} + \delta_n;$$

Сложив между собой левые и правые части этих уравнений и разделив их на  $n$ , получим:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \bar{Q} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

В пределе при  $n \rightarrow \infty$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{Q} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

Здесь

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{Q} = \bar{Q}; \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0,$$

так что среднее арифметическое значение результата измерения

$$\bar{Q}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

сходящееся по вероятности к  $\bar{Q}$ , при любом законе распределения вероятности результата измерения может служить состоятельной точечной оценкой среднего значения.

Математическое ожидание среднего арифметического

$$M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M(Q_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [M(\bar{Q}) + M(\delta_i)] = \bar{Q}.$$

Поэтому среднее арифметическое при любом законе распределения вероятности результата измерения является не только состоятельной, но и несмещенной оценкой среднего значения. Этим обеспечивается правильность результата многократного измерения.

Точность результата многократного измерения зависит от эффективности оценки среднего значения. Чем она эффективнее (чем меньше ее рассеяние), тем выше точность (см. рис. 39). Критерии эффективности могут быть разными. При нормальном законе распределения вероятности наиболее популярным является такой показатель эффективности (мера рассеяния), как сумма квадратов отклонений от среднего значения. Чем меньше этот показатель, тем эффективнее оценка. Это позволяет поставить задачу отыскания оценки среднего значения, наиболее эффективной по критерию

$$\sum_{j=1}^m (\bar{Q}_j - \bar{Q})^2 = \min. \quad (12)$$

Такая задача называется задачей синтеза оптимальной (т. е. наилучшей в смысле выбранного критерия) оценки среднего значения, а метод ее решения, основанный на использовании критерия (12), — методом наименьших квадратов.

Исследуем функцию в левой части выражения (12) на экстремум. Она достигает минимума при

$$\frac{\sum_{j=1}^m (\bar{Q}_j - \bar{Q})^2}{d\bar{Q}_j} = 0.$$

После возведения в квадрат и почленного дифференцирования получим

$$\sum_{j=1}^m \bar{Q}_j - m\bar{Q} = 0.$$

Если в качестве оценки  $\bar{Q}$  выбрать среднее арифметическое  $\bar{Q}_n$ , то равенство

$$\sum_{j=1}^m \left( \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} Q_i \right) - m\bar{Q} = 0$$

будет выполняться при  $n \rightarrow \infty$  в силу состоятельности этой оценки. Таким образом,

среднее арифметическое является не только состоятельной и несмещенной, но и наиболее эффективной по критерию наименьших квадратов точечной оценкой среднего значения результата измерения. В качестве точечной оценки дисперсии результата измерения по аналогии со средним арифметическим можно было бы взять

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n + \bar{Q} - \bar{Q})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Q_i - \bar{Q})^2 - (\bar{Q}_n - \bar{Q})] = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - \frac{2}{n} (\bar{Q}_n - \bar{Q}) \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{Q}_n - \bar{Q})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - \\ &- 2(\bar{Q}_n - \bar{Q}) \cdot \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i - \bar{Q} \right) + (\bar{Q}_n - \bar{Q})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - (\bar{Q}_n - \bar{Q})^2. \end{aligned}$$

При любом законе распределения вероятности результата измерения эта оценка является состоятельной, т. к. при  $n \rightarrow \infty$  второе слагаемое в правой части стремится к нулю, а первое — к  $\sigma_Q^2$ . Но

$$\begin{aligned} M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2\right) &= M\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2\right] - M(\bar{Q}_n - \bar{Q})^2 = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M(Q_i - \bar{Q})^2 - \sigma_Q^2 = \sigma_Q^2 - \frac{\sigma_Q^2}{n} = \frac{n-1}{n} \sigma_Q^2 \end{aligned}$$

т. е. такая оценка является смещенной. Несмещенную оценку можно получить, умножив ее на коэффициент  $\frac{n}{n-1}$ . При  $n \rightarrow \infty$  этот коэффициент

стремится к 1, так что несмещенная точечная оценка дисперсии при любом законе распределения вероятности результата измерения

$$S_Q^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2 \quad (13)$$

остается состоятельной. Квадратный корень из нее

$$S_Q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2}$$

называется стандартным отклонением.

Оценив среднее значение  $\bar{Q}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_Q$  результата измерения, можно, используя вместо этих числовых характеристик точечные оценки  $\bar{Q}_n$  и  $S_Q$ , по „правилу трех сигм“ проверить, не являются ли некоторые сомнительные значения  $Q_i$  ошибочными. Если окажется, что они отличаются от среднего арифметического  $\bar{Q}_n$  больше чем на  $3 S_Q$ , то их следует отбросить (см. рис. 40). После этого рассчитываются окончательные значения  $\bar{Q}_n$  и  $S_Q$ .

**Пример 24.** 15 независимых числовых значений результата измерения температуры в помещении по шкале Цельсия приведены во второй графе табл. 9.

$i$	$t_i$	$t_i - \bar{t}_{15}$	$(t_i - \bar{t}_{15})^2$	$t_i - \bar{t}_{14}$	$(t_i - \bar{t}_{14})^2$
1	20.42	+0.016	0.000256	+0.009	0.000081
2	43	+0.026	676	+0.019	361
3	40	-0.004	016	-0.011	121
4	43	+0.026	676	+0.019	361
5	42	+0.016	256	+0.009	081
6	43	+0.026	676	+0.019	361
7	39	-0.014	196	-0.021	441

8	30	-0.104	10816	—	—
9	40	-0.004	016	-0.011	121
10	43	+0.026	676	+0.019	361
11	42	+0.016	256	+0.009	081
12	41	+0.006	036	-0.001	001
13	39	-0.014	196	-0.021	441
14	39	-0.014	196	-0.021	441
15	40	-0.004	016	-0.011	121

Не допущено ли ошибок при их получении?

**Решение 1.** Среднее арифметическое результата измерения

$$\bar{t}_{15} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = 20.404.$$

2. При определении стандартного отклонения результаты вспомогательных вычислений сведем в третью и четвертую графы табл. 9.\*

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{Q}_{15})^2} = 0.033$$

3. Больше чем на  $3S_t = 0,099$  от среднего арифметического отличается восьмое значение. Следовательно, оно является ошибочным и должно быть отброшено.

4. Без восьмого значения

$$\bar{t}_{14} = 20.411$$

5. Результаты вспомогательных вычислений при повторном определении стандартного отклонения сведем в пятую и шестую графы табл.9.

$$S_t = 0,016$$

6. Ни одно из оставшихся значений  $t_i$  не отличается теперь от среднего арифметического больше чем на  $3S_t = 0,048$ . Можно, следовательно, считать, что среди них нет ошибочных.

Универсальный метод отыскания эффективных оценок числовых характеристик любых законов распределения вероятности случайных чисел или величин разработан Р.А. Фишером. Он называется методом максимального правдоподобия. Сущность этого метода заключается в следующем.

Многомерная плотность распределения вероятности системы случайных значений  $p(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  рассматривается как функция числовых характеристик закона распределения вероятности.

\* При проведении подобных вычислений рекомендуется пользоваться микрокалькулятором

Эта функция

$$L = p(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2, \dots),$$

называемая функцией правдоподобия, показывает, насколько то или иное значение каждой числовой характеристики „более правдоподобно“, чем другие. Функция правдоподобия достигает максимума при значениях переменных, являющихся их наиболее эффективными оценками. Последние, следовательно, находятся из условия

$$L = p(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2, \dots) = \max,$$

что равносильно совместному решению уравнений

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = 0;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma_Q^2} = 0;$$

.....

Для упрощения вычислений функцию правдоподобия иногда логарифмируют. Так как логарифм является монотонной функцией, то L и ln L достигают экстремума при одних и тех же значениях переменных. Наиболее эффективные оценки числовых характеристик, следовательно, могут определяться из совместного решения уравнений

$$\frac{\partial \ln L}{\partial Q} = 0;$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_Q^2} = 0;$$

.....

**Пример 25.** Определить методом максимального правдоподобия эффективные оценки среднего значения и дисперсии результата измерения, независимые равноточные значения которого подчиняются нормальному закону распределения вероятности.

**Решение 1.** Плотность распределения вероятности каждого отдельного значения результата измерения

$$p(Q_i, \bar{Q}, \sigma_Q^2) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q_i - \bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}}.$$

Поскольку все значения независимые, плотность распределения вероятности системы случайных величин

$$p(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2) = p(Q_1, \bar{Q}, \sigma_Q^2) p(Q_2, \bar{Q}, \sigma_Q^2) \dots p(Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2)$$

Таким образом функция правдоподобия

$$L(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \bar{Q}, \sigma_Q^2) = \left( \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \right)^n e^{-\frac{1}{2\sigma_Q^2} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

2. Логарифм функции правдоподобия

$$\ln L = -\frac{n}{L} \ln 2\pi - \frac{n}{2} \ln \sigma_Q^2 - \frac{1}{2\sigma_Q^2} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2$$

3. Уравнения, из которых находятся оценки:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \bar{Q}} = \frac{1}{\sigma_Q^2} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) = 0;$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_Q^2} = -\frac{n}{2\sigma_Q^2} + \frac{1}{2\sigma_Q^4} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 = 0.$$

4. Решение первого уравнения

$$\bar{Q} = \bar{Q}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

совпадает с результатом, полученным методом наименьших квадратов.

5. Решение второго уравнения

$$\bar{\sigma}_Q^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2$$

дает хотя и эффективную, но как мы видели, несколько смещенную оценку. К несмещенной оценке приводит введение поправочного множителя  $\frac{n}{n-1}$ .

### **3.6.2. Проверка нормальности закона распределения вероятности результата измерения**

При обработке экспериментальных данных существенное значение имеет вопрос о том, подчиняется или нет результат измерения нормальному закону распределения вероятности. Непротиворечивость такой гипотезы должна быть обязательно проверена.

Поскольку ошибки искажают эмпирический закон распределения вероятности результата измерения, постольку проверка предположения об его нормальности производится после исключения ошибок.

Правдоподобна или нет гипотеза о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, можно определить уже по виду гистограммы, построенной на основании экспериментальных данных. Порядок ее построения рассмотрен в примере 13. Наглядность отображения гистограммой закона распределения вероятности результата измерения зависит от соблюдения следующих правил при ее построении:

1) интервалы  $\Delta Q$ , на которые разбивается ось абсцисс, следует выбирать, по возможности, одинаковыми;

2) число интервалов  $k$  устанавливать в соответствии со следующими рекомендациями:

Число измерений	Рекомендуемое число интервалов
40-100	7-9
100-500	8-12
500-1000	10-16
1000-10000	12-22

3) масштаб гистограммы выбирать так, чтобы ее высота относилась к основанию, примерно, как 5 к 8.

Иногда по виду гистограммы можно с большой уверенностью заключить, что результат измерения подчиняется (или не подчиняется) нормальному закону распределения вероятности. Если, например, гистограмма имеет вид, показанный на рис. 41, а, то результат измерения определенно не подчиняется нормальному закону. Если же гистограмма имеет вид, показанный на рис. 41, б, то возникает сомнение: достаточно ли хорошо она соответствует теоретической кривой нормального закона распределения плотности вероятности, показанной пунктиром? Для разрешения этого сомнения нужно иметь правило, руководствуясь которым можно было бы принимать то или иное решение.

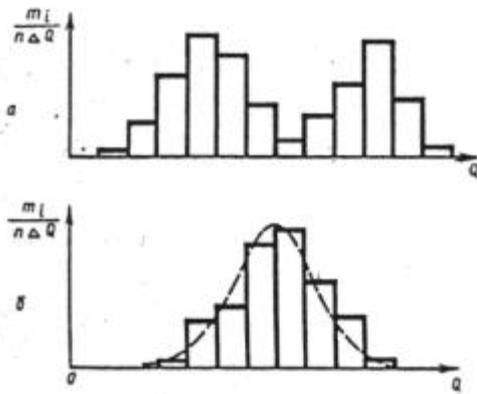


Рис. 41. Гистограммы, построенные по экспериментальным данным

Существует несколько так называемых критериев согласия, по которым проверяются гипотезы о соответствии экспериментальных данных тому или иному закону распределения вероятности результата измерения. Наиболее распространенным из них является критерий К. Пирсона. При использовании этого критерия за меру расхождения экспериментальных данных с теоретическим законом распределения вероятности результата измерения принимается сумма квадратов отклонения частот  $m_i/n$  от теоретической вероятности  $P_i$  попадания отдельного значения результата измерения в  $i$ -й интервал, причем каждое слагаемое берется с коэффициентом  $n/P_i$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n}{P_i} \left( \frac{m_i}{n} - P_i \right)^2.$$

Если расхождение случайно, то  $\chi^2$  подчиняется  $\chi^2$ -распределению (хи-квадрат распределению К. Пирсона). Кривые интегральной функции этого распределения представлены на рис. 42\*. Интегральная функция определяет вероятность того, что случайное число примет значение, меньшее аргумента этой функции. Поэтому, задавшись значением интегральной функции распределения К. Пирсона  $F(\chi_0^2)$ , можно проверить, больше или меньше ее аргумента  $\chi_0^2$  (см. рис. 42) вычисленное значение  $\chi^2$ . Если меньше, то с выбранной вероятностью  $\chi^2$  можно считать случайным числом, подчиняющимся  $\chi^2$ -распределению К. Пирсона, т. е. признать случайным расхождение между эмпирической и теоретической плотностью распределения вероятности результата измерения. Если же окажется, что  $\chi^2 > \chi_0^2$ , то с той же вероятностью придется признать, что  $\chi^2$  не подчиняется распределению К. Пирсона, т. е. гипотеза о соответствии эмпирического закона распределения вероятности теоретическому не подтверждается.

**Пример 26.** 100 независимых числовых значений результата измерения напряжения цифровым вольтметром, каждое из которых повторилось  $m$  раз приведены в первой графе табл. 10.

Таблица 10

$U$	$m$	$mU$	$U - \bar{U}_{100}$	$(U - \bar{U}_{100})^2$	$m(U - \bar{U}_{100})^2$
-----	-----	------	---------------------	-------------------------	--------------------------

8,30	1	8,30	-0,33	0,1089	0,0784	0,1089	0,1568
8,35	2	16,70	-0,28	0,0529	0,0324	0,2116	0,1620
8,40	4	33,60	-0,23	0,0169		0,1352	
8,45	5	42,25	-0,18	0,0064		0,0640	
8,50	8	68,00	-0,13	0,0009		0,0162	
8,55	10	85,50	-0,08	0,0004		0,0068	
8,60	18	154,80	-0,03	0,0049		0,0588	
8,65	17	147,05	0,02	0,0144		0,1296	
8,70	12	104,40	0,07	0,0289		0,2023	
8,75	9	78,75	0,12	0,0484		0,2904	
8,80	7	61,60	0,17	—		—	
8,85	6	53,10	0,22	0,1024		0,1024	
8,90	0	—	—				
8,95	1	8,95	0,32				

\* Здесь  $k$  соответствует числу интервалов только при проверке соответствия закона распределения вероятности результата измерения нормальному закону.

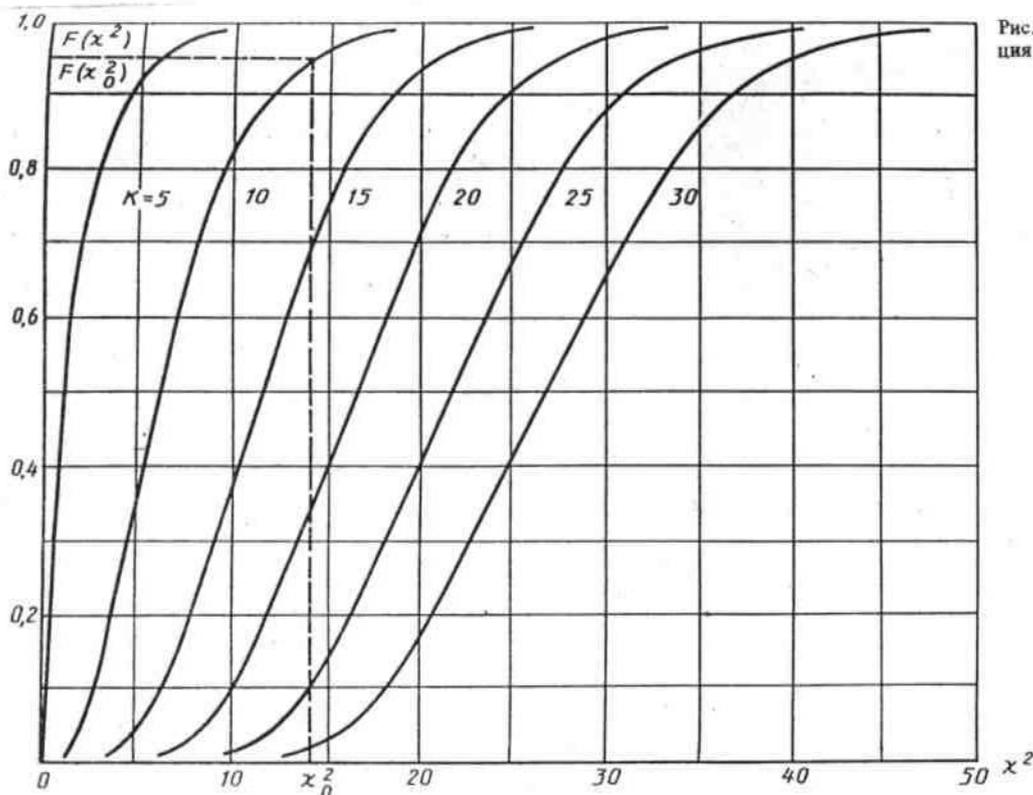


Рис. 42. Интегральная функция распределения вероятности К. Пирсона

Проверить гипотезу о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

**Решение. 1.** Используя результаты вспомогательных вычислений, сведенные в третьей графах, найдем стандартное отклонение результата измерения:

$$\bar{U}_{100} = 8.63.$$

2. Используя результаты вспомогательных вычислений в четвертой, пятой и шестой графах, найдем стандартное отклонение результата измерения:

$$S_U = 0.127.$$

3. Ни одно из значений результата измерения не отличается от среднего арифме-

тического больше чем на  $3S_u = 0,381$ . Ошибок, следовательно, можно считать, что нет.

4. При использовании критерия К. Пирсона в каждом интервале должно быть не меньше пяти независимых значений результата измерения. В соответствии с этим образуем интервалы так, как это представлено во второй графе табл. 11.

Таблица 11

$i$	Интервалы ( $U_{i-1}$ ; $U_i$ )	$m_i$	$t_i$	$L(t_i)$	$P_i$	$m_i - nP_i$	$\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$
1	( $-\infty$ ; 8,425)	7	-1,614	-0,4467	0,0533	1,67	0,523
2	(8,425; 8,475)	5	-1,220	-0,3888	0,0579	-0,79	0,108
3	(8,475; 8,525)	8	-0,827	-0,2959	0,0929	-1,29	0,179
4	(8,525; 8,575)	10	-0,433	-0,1676	0,1283	-2,83	0,624
5	(8,575; 8,625)	18	-0,039	-0,0156	0,1520	2,80	0,516
6	(8,625; 8,675)	17	0,354	0,1383	0,1539	1,61	0,168
7	(8,675; 8,725)	12	0,748	0,2728	0,1345	-1,45	0,157
8	(8,725; 8,775)	9	1,142	0,3733	0,1005	-1,05	0,110
9	(8,775; 8,825)	7	1,536	0,4377	0,0644	0,56	0,048
10	(8,825; $+\infty$ )	7	$+\infty$	0,5000	0,0623	0,77	0,095

5. Определим, на сколько  $S_u$  отстоит от среднего арифметического правая граница  $U_i$  каждого интервала:

$$t_i = \frac{U_i - U_{100}}{S_U} = \frac{U_i - 8,63}{0,127}.$$

Полученные значения параметра  $t$  внесем в четвертую графу табл. 11.

6. По значению  $t_i$  из графика на рис. 29 можно определить, с какой вероятностью отдельное значение результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, попадает в интервал  $\bar{V}_{100} \pm U_i$ . С вероятностью в два раза меньшей оно попадает в левую или правую половину этого интервала. Эта вероятность, как показано в разд. 3.3.4, определяется интегралом вероятности — функцией Лапласа  $L(t_i)$ , так что для повышения точности расчетов можно пользоваться не графиком, а таблицами функции Лапласа. Полученные из таблиц значения  $L(t_i)$  занесены в пятую графу табл. 11.

7. Теоретическая вероятность  $P_i$  попадания в  $i$ -й интервал отдельного значения результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, очевидно равна

$$P_i = L(t_i) - L(t_{i-1}).$$

Принимая во внимание, что  $L(-\infty) = -0,5$ , а  $L(\infty) = 0,5$ , поместим рассчитанные значения  $P_i$  в шестую графу табл. 11.

8. В седьмую и восьмую графы внесены результаты остальных вспомогательных вычислений. Суммирование чисел в восьмой графе дает

$$\chi^2 = 2,528.$$

9. Из графика на рис. 42 видно, что рассчитанное значение  $\chi^2 \ll \chi_0^2$ , соответствующего, например, вероятности 0,95. Таким образом можно принять гипотезу о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону.

Критерий согласия К. Пирсона широко применяется для проверки гипотез о том, что результат измерения подчиняется вполне определенному закону распределения вероятности. При  $\chi^2 \ll \chi_0^2$  соответствующая гипотеза принимается, при  $\chi^2 \geq \chi_0^2$  — отвергается. Однако даже выполнение неравенства  $\chi^2 \ll \chi_0^2$  не может служить

доказательством того, что результат измерения подчиняется этому закону распределения вероятности.

При использовании критерия К. Пирсона, как и в случае применения других критериев, возможны два рода ошибок. Ошибка первого рода состоит в отклонении верной гипотезы, а ошибка второго рода - в принятии неправильной. Для иллюстрации на рис. 43 показаны кривые плотности распределения вероятности величины  $\chi^2$  в случаях, когда проверяемая гипотеза верна — кривая 1, и когда неверна — кривая 2. Если вероятности, с которой выносится решение, соответствует значение  $\chi_0^2$ , то при всех  $\chi^2 < \chi_0^2$  гипотеза будет приниматься, а при всех  $\chi^2 \geq \chi_0^2$  — отклоняться. Вероятности ошибок первого и второго родов при этом:

$$P_I = \int_{\chi_0^2}^{\infty} p_1(\chi^2) d\chi^2;$$

$$P_{II} = \int_{-\infty}^{\chi_0^2} p_2(\chi^2) d\chi^2.$$

Обе они зависят от значения  $\chi_0^2$ , которое в свою очередь определяется вероятностью  $P = F(\chi_0^2)$ , с которой принимается решение. С повышением этой вероятности значение  $\chi_0^2$  увеличивается, вероятность ошибки первого рода уменьшается, а ошибки второго рода — возрастает, и наоборот. Таким образом, нецелесообразно принимать решение с очень высокой степенью вероятности. Обычно  $P$  выбирается равной 0,9 ... 0,95.

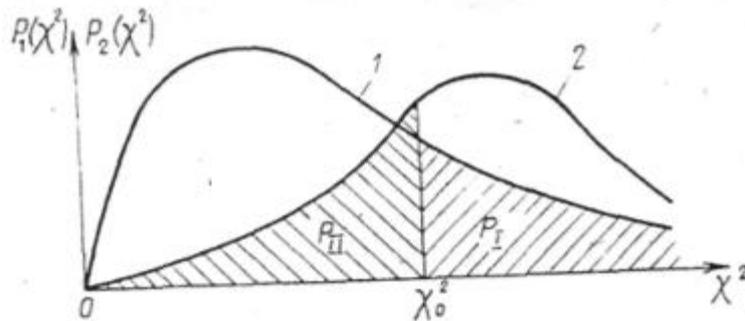


Рис. 43. Графики плотности распределения вероятности  $\chi^2$  в случаях, когда проверяемая гипотеза верна (1) и неверна (2)

При проверке нормальности закона распределения вероятности результата измерения применение критерия К. Пирсона дает хорошие результаты только, если  $n > 40 \dots 50$ . При  $10 \dots 15 < n < 40 \dots 50$  применяется так называемый составной критерий. Сначала рассчитывается

$$d = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}_n|}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q}_n)^2}}$$

и проверяется выполнение условия

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max},$$

где  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$  зависят от вероятности  $P^*$ , с которой принимается решение, и находятся по табл. 12.

Таблица 12

n	P* = 0,90		P* = 0,95		P* = 0,99	
	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>
11	0,7409	0,8899	0,7153	0,9073	0,6675	0,9359
16	7452	8733	7236	8884	6829	9137
21	7495	8631	7304	8768	6950	9001
26	7530	8570	7360	8686	7040	8901
31	7559	8511	7404	8625	7110	8827
36	7583	8468	7440	8578	7167	8769
41	7604	8436	7470	8540	7216	8722
46	7621	8409	7496	8508	7256	8682
51	7636	8385	7518	8481	7291	8648

Если это условие соблюдается, то дополнительно проверяются „хвосты“ теоретического и эмпирического законов распределения вероятности. При  $10 < n < 20$  считается допустимым отклонение одного из независимых значений результата измерения  $Q_i$  от среднего арифметического больше чем на  $2,5 S_Q$ , при  $20 < n < 50$  — двух, что соответствует доверительной вероятности  $P^{**} \approx 0,98$ .

Несоблюдения хотя бы одного из двух условий достаточно для того, чтобы гипотеза о нормальности закона распределения вероятности результата измерения была отвергнута. В противном случае гипотеза принимается с вероятностью  $P \geq P^* + P^{**} - 1$ .

При  $n < 10 \dots 15$  гипотеза о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, не проверяется. Решение принимается на основании анализа априорной информации.

### 3.6.3. Обработка экспериментальных данных, подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности

Если итоги проверки большого массива экспериментальных данных по критерию  $\chi^2$  не противоречат гипотезе о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то можно считать, что среднее арифметическое значение результата измерения также подчиняется нормальному закону, а среднее значение среднего арифметического (см. разд. 3.6.1)

$$M(\bar{Q}_n) = \bar{Q}.$$

Как было показано в разд. 3.3.4, ни одно из случайных значений, подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности, не может отличаться от среднего значения больше чем на половину доверительного интервала. На основании формулы (9) можно написать

$$\begin{aligned} P\{\bar{Q} - t\sigma_{\bar{Q}} \leq \bar{Q}_n \leq \bar{Q} + t\sigma_{\bar{Q}}\} &= P\{-\bar{Q}_n - t\sigma_{\bar{Q}} \leq -\bar{Q} \leq -\bar{Q}_n + t\sigma_{\bar{Q}}\} = \\ &= P\{\bar{Q}_n - t\sigma_{\bar{Q}} \leq \bar{Q} \leq \bar{Q}_n + t\sigma_{\bar{Q}}\} = 2F(t) - 1. \end{aligned}$$

Заменяя среднее квадратическое отклонение среднего арифметического его оценкой

$$S_{\bar{Q}} = \frac{S_Q}{\sqrt{n}},$$

вытекающей из выражения (11), и принимая во внимание, что, как показано в разд. 3.4,  $\bar{Q} = Q$ , получим:

$$P\{\bar{Q}_n - \varepsilon \leq Q \leq \bar{Q}_n + \varepsilon\} = 2F(t) - 1,$$

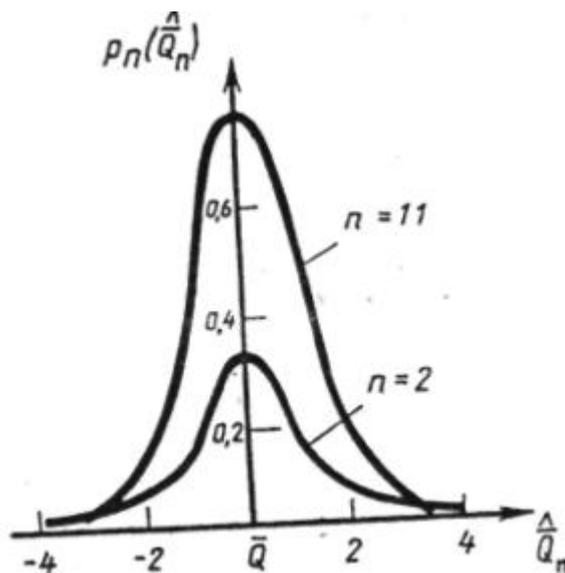
где  $\varepsilon \approx tS_{\bar{Q}}$  — половина доверительного интервала, а  $t$  при выбранной до-

верительной вероятности определяется по верхней кривой на рис.29.

Порядок соответствующих действий показан на рис. 40. Сначала находится стандартное отклонение среднего арифметического, затем выбирается доверительная вероятность и определяется соответствующее ей значение  $t$  по верхней кривой на рис. 29. С выбранной доверительной вероятностью значение измеряемой величины  $Q$  не отличается от среднего арифметического значения результата измерения больше чем на половину доверительного интервала  $\varepsilon \approx tS_{\bar{Q}}$ .

При небольшом объеме экспериментальных данных среднее арифметического значение результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, само подчиняется закону распределения вероятности Стьюдента (псевдоним В.С. Госсета) с тем же средним-значением  $\bar{Q} = Q$ . Графики плотности распределения вероятности, соответствующие этому закону, показаны на рис. 44. При увеличении  $n$  распределение вероятности Стьюдента быстро приближается к нормальному, становясь почти неотличимым от него уже при  $n > 40 \dots 50$ .

Рис. 44. Графики плотности распределения вероятности среднего арифметического  $\bar{Q}_n$  при различных значениях  $n$



Доверительная вероятность того, что любое случайное значение среднего арифметического, подчиняющегося закону распределения вероятности Стьюдента, не отличается от среднего значения больше чем на половину доверительного интервала

$$P\{\bar{Q} - t\sigma_{\bar{Q}} \leq \bar{Q}_n \leq \bar{Q} + t\sigma_{\bar{Q}}\} = 2S_n(t) - 1,$$

где  $S_n(t)$  — интегральная функция распределения вероятности Стьюдента. По этой формуле на рис. 45 построены графики, показывающие, какое значение имеет объем выборки  $n$ . При  $n=4$ , например, вероятность того, что никакое значение среднего арифметического, подчиняющегося закону распределения вероятности Стьюдента, не отличается от среднего значения больше чем на  $2\sigma_{\bar{Q}}$ , составляет 0,86; при  $n=6$  она равна 0,9; при  $n=10$  получается равной 0,924; при  $n=20$  уже 0,94 и т. д. Верхняя кривая на рис. 45 соответствует условию  $n > 40 \dots 50$  и практически не отличается от верхней кривой на рис.29.

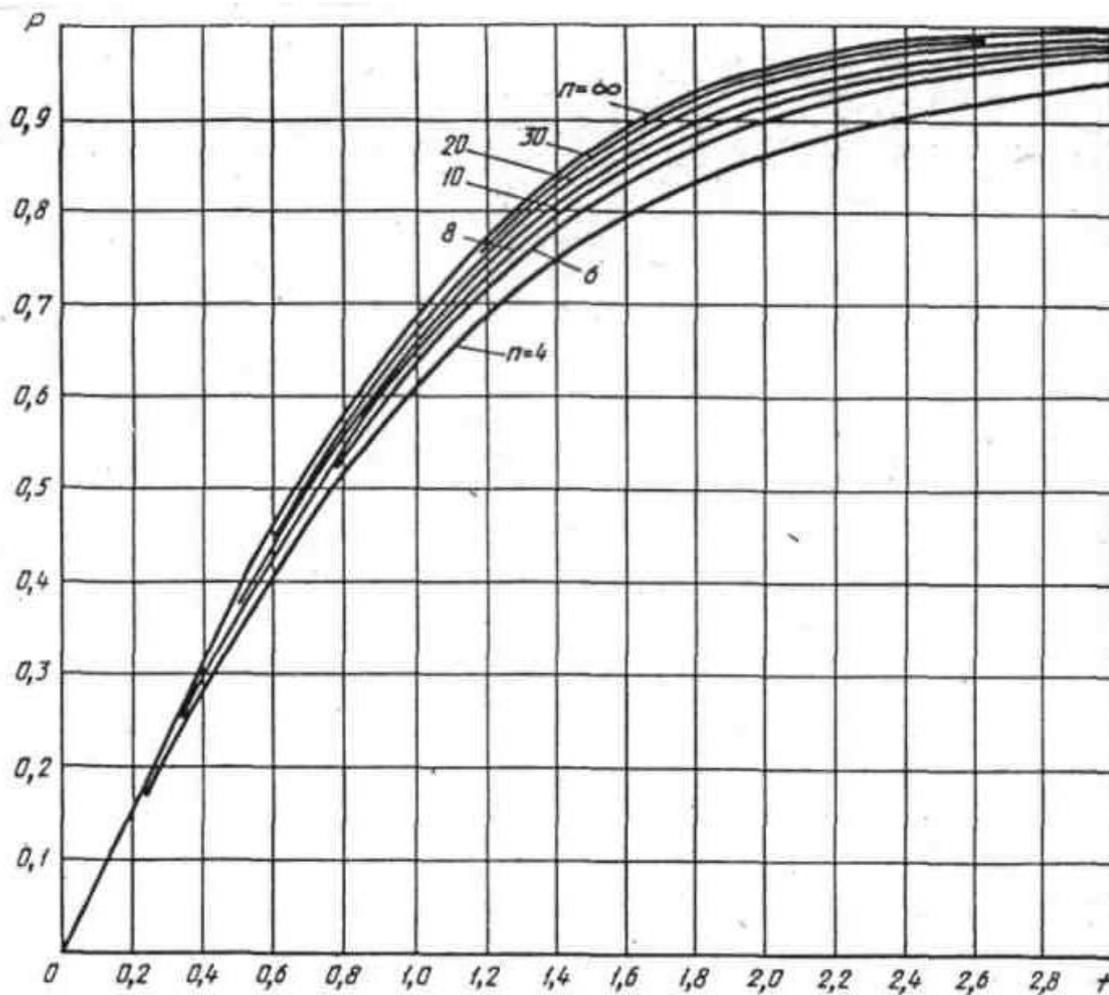


Рис. 45. Вероятность попадания среднего арифметического в окрестность среднего значения

По аналогии с предыдущим нетрудно показать, что

$$P\{\bar{Q}_n - \varepsilon \leq Q \leq \bar{Q}_n + \varepsilon\} = 2S_n(t) - 1,$$

где по-прежнему  $\varepsilon \approx tS_{\bar{Q}}$  — половина доверительного интервала, а  $t$  при

выбранной доверительной вероятности определяется по графику на рис.45.

Порядок действий при обработке небольшого объема экспериментальных данных отличается только тем, что после выбора доверительной вероятности  $t$  с учетом  $n$  определяется по графику на другом рисунке.

При совсем незначительном количестве экспериментальных данных ( $n \leq 10 \dots 15$ ) и принятой гипотезе о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, выявление ошибок по "правилу трех сигм" не производится. Остальной порядок действий (см. рис. 40) не отличается от предыдущего. Доверительный интервал при фиксированной доверительной вероятности, как это видно из графика на рис. 45, с уменьшением объема экспериментальных данных расширяется; точность измерения при этом, следовательно, снижается, приближаясь к точности однократного измерения при  $n \rightarrow 1$ .

### 3.6.4. Обработка экспериментальных данных, не подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности

Если гипотеза о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности отвергается, то существует несколько возможностей.

1. При особо точных и ответственных измерениях может быть поставлена задача определения закона распределения вероятности результата измерения. Однозначного решения она не имеет, и вывод о том, что экспериментально найденная плотность распределения вероятности подчиняется какому-то конкретному закону, может быть сделан лишь с той или иной вероятностью. Основные требования к проведению исследования, порядок математической обработки эмпирических данных и выбора математической модели распределения установлен специальным документом Госстандарта СССР МИ 199-79. Это довольно сложная и трудоемкая процедура, требующая значительных дополнительных затрат, и необходимость ее в каждом отдельном случае должна быть технико-экономически обоснована.

После определения с той или иной вероятностью закона распределения вероятности результата измерения, методом максимального правдоподобия см. разд. 3.6.1) устанавливаются оценки его числовых характеристик и на основе их использования разрабатывается вся последующая процедура обработки экспериментальных данных. Такая обработка называется оптимальной и обеспечивает наивысшую точность при выбранных критериях.

2. Если закон распределения вероятности результата измерения незначительно отличается от нормального (чаще всего это отличие проявляется, в повышенной вероятности больших отклонений от среднего значения) то применяются так называемые робастные (устойчивые к отклонениям от нормального закона распределения вероятности) методы обработки экспериментальных данных. Все они основаны на ослаблении влияния больших отклонений от среднего значения на его оценку.

В простейшем случае большие отклонения просто отбрасываются, что приводит к усеченному нормальному закону распределения вероятности результата измерения (см. табл. 8). В этом случае оценкой среднего значения становится медиана закона распределения вероятности результата измерения

$$\bar{Q}_M = \text{med}Q = \begin{cases} \frac{Q_{n+1}}{2} \text{ при } \_ \text{нечетном } \_ n; \\ \frac{1}{2} \left( Q_{\frac{n}{2}} + Q_{\frac{n}{2}+1} \right) \text{ при } \_ \text{четном } \_ n. \end{cases}$$

В некоторых случаях большие отклонения не отбрасываются, а заменяются на ближайшие из оставшихся значений результата измерения, либо включаются в обработку с малыми весовыми коэффициентами. Порядок дальнейшей обработки экспериментальных данных не меняется. Предельным случаем усечения является оставление одного (при нечетном  $n$ ) или двух (при четном  $n$ ) значений результата измерения.

Среднее арифметическое не относится к устойчивым (робастным) оценкам. Объясняется это тем, что даже очень редкие большие отклонения (выбросы), не подчиняющиеся нормальному закону распределения вероятности, играют по критерию (12) существенную роль. Операция возведения в квадрат делает их доминирующими среди слагаемых, а эффективность оценки, полученной методом наименьших квадратов, резко падает.

Ослабление влияния больших отклонений на оценку среднего значения (т. е. повышение ее устойчивости) достигается при синтезе оценки по критерию эффективности, в котором квадратичная зависимость заменена на более слабую. Показателем эффективности (мерой рассеяния), в частности, может быть сумма отклонений от среднего значения или некоторая ее функция. Оценки, синтезированные по критерию

$$\sum_{j=1}^m \psi(\bar{Q}_j - \bar{Q}) = \min ,$$

называются М-оценками. Функция  $\psi(\bar{Q}_j - \bar{Q}) \geq 0$  при малых значениях аргумента

выбирается близкой к квадратичной, а при больших — возрастающей медленнее, чем квадратичная. В зависимости от вида этой функции различают робастные оценки Хубера, Хампела, Андрюса, Тьюки и другие. Все они слабо зависят от выбросов и отклонений от нормального закона распределения вероятности, а в случае, когда результат измерения подчиняется нормальному закону, близки к оценке среднего значения, полученных методом наименьших квадратов.

Разновидностью М-оценок являются  $l^P$ -оценки, получаемые при

$$\psi(\bar{Q}_j - \bar{Q}) = |\bar{Q}_j - \bar{Q}|^P, \quad 1 \leq P < 2.$$

В отличие от перечисленных М-оценок они более эффективны вблизи других законов распределения вероятности, отличных от нормального. В частности,  $l^1$ -оценка, или оценка наименьших модулей, получаемая из условия

$$\sum_{j=1}^m |\bar{Q}_j - \bar{Q}| = \min$$

и совпадающая с медианой, оптимальна при экспоненциальном законе распределения вероятности результата измерения.

Используются и другие робастные оценки.

3. С невысокой точностью значение измеряемой величины можно установить даже не интересуясь законом распределения вероятности результата измерения. Среднее арифметическое в этом случае может оказаться неэффективной оценкой, но его все равно целесообразно использовать, так как при всех обстоятельствах дисперсия среднего арифметического согласно соотношению (11) в  $n$  раз меньше дисперсии результата измерения, оценка которой на основании пятого свойства дисперсии (см. разд. 3.2) может быть представлена в виде

$$S_{\bar{Q}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i^2 - \bar{Q}_n^2.$$

Стандартное отклонение среднего арифметического при любом законе распределения вероятности

$$S_{\bar{Q}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i^2 - \bar{Q}_n^2} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n Q_i^2 - \bar{Q}_n^2} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^2 - \bar{Q}_n^2)}.$$

Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , по нижней кривой на рис. 29 можно определить, на сколько  $S_{\bar{Q}}$  среднее арифметическое  $\bar{Q}_n$  может отличаться от среднего значения результата измерения  $\bar{Q}$  при любом законе распределения вероятности. С наименьшей вероятностью

$$\bar{Q}_n - \varepsilon \leq Q \leq \bar{Q}_n + \varepsilon$$

где, как обычно,  $\varepsilon \approx tS_{\bar{Q}}$  - половина доверительного интервала.

Соответствующий порядок действий показан на рис.40.

### 3.6.5. Обеспечение требуемой точности измерений

Многokратное измерение одной и той же величины постоянного размера позволяет обеспечить требуемую точность. Поскольку ширина доверительного интервала зависит от количества экспериментальных данных, то, увеличивая  $n$ , можно добиться выполнения наперед заданного условия

$$\varepsilon \leq \varepsilon_0$$

Упрощенный алгоритм обработки экспериментальных данных в этом случае показан на рис. 46.

**Пример 27.** В табл. 13 приведены 10 независимых числовых значений результата

измерения линейного размера (в сантиметрах).

Таблица 13

$i$	$l_i$	$l_i - \bar{l}_{10}$	$(l_i - \bar{l}_{10})^2$
1	392	0	0
2	391	-1	1
3	395	3	9
4	392	0	0
5	389	-3	9
6	396	4	16
7	389	-3	9
8	389	-3	9
9	393	1	1
10	394	2	4

Определить его длину, если с вероятностью 0,95 точность измерения должна быть не ниже  $2\varepsilon_0 = 2$  см.

**Решение.** 1. Используя вспомогательные вычисления, сведенные в табл. 13, получим

$$\bar{l}_{10} = 392; S_l = 2.5.$$

2. Больше чем на  $3 S_l = 7,5$  от среднего арифметического не отличается ни одно из числовых значений результата измерения. Таким образом, следует признать, что ошибок нет.

3. Допустим, есть основание полагать, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

4. Стандартное отклонение среднего арифметического

$$S_{\bar{l}} = \frac{2.5}{\sqrt{10}} \approx 0.79.$$

5. При  $n = 10$  и  $P = 0,95$  по графику на рис. 45 находим  $t = 2.3$ .

6. Так как

$$\varepsilon = t S_{\bar{l}} = 1.82 > \varepsilon_0 = 1,$$

то необходимо увеличить количество экспериментальных данных.

7. Пусть  $l_{11} = 390$ . Тогда

$$\bar{l}_{11} = 391.8; S_l = 2.48.$$

8. Для проверки нормальности закона распределения вероятности результата измерения используем составной критерий. При  $n = 11$  и любой вероятности в табл. 12

$$d_{\min} < d = 0.8526 < d_{\max},$$

и ни одно из числовых значений  $l_i$ , не отличается от 391,8 больше чем на  $2.5S_l = 6.2$ . Таким образом, результаты проверки не противоречат гипотезе о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

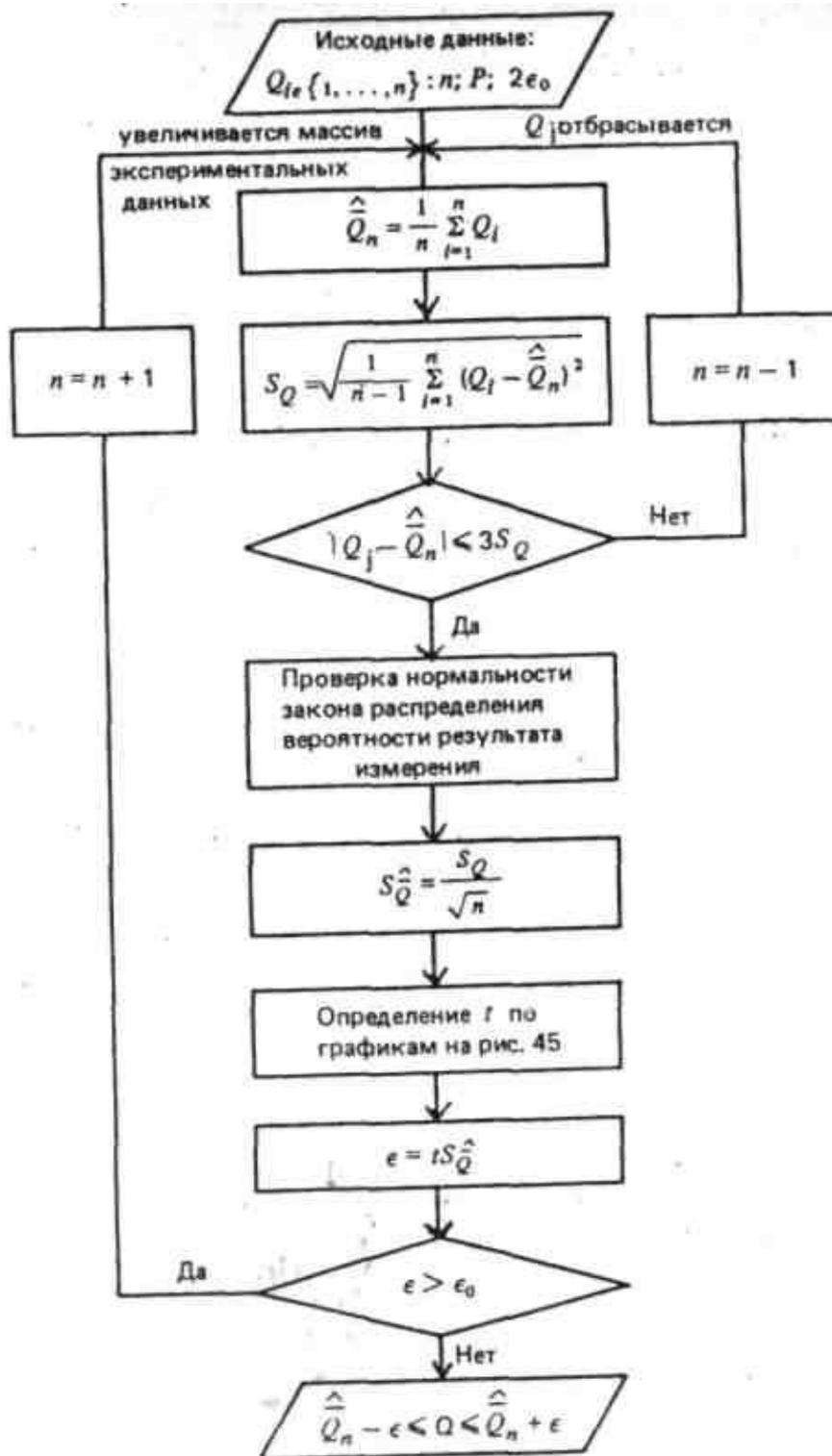


Рис. 46. Обеспечение требуемой точности при многократном измерении

9. Стандартное отклонение среднего арифметического при  $n=11$

$$S_i = \frac{2.48}{\sqrt{11}} \approx 0.75.$$

10. При  $n=11$  и  $P=0,95$   $t=2,2$ . Так как

$$\varepsilon = tS_i = 1.65 > \varepsilon_0 = 1,$$

то необходимо еще больше увеличить количество экспериментальных данных.

11. Результаты последующих действий приведены в табл.14

Таблица 14

$n$	$l_n$	$\bar{l}_n$	$S_l$	$S_i$	$t$	$\varepsilon$
12	392	391,8	2,37	0,68	2,2	1,5
13	391	391,8	2,29	0,63	2,2	1,4
14	395	392	2,35	0,63	2,15	1,35
15	391	391,9	2,28	0,59	2,15	1,27
16	393	392	2,22	0,56	2,15	1,2
17	391	391,9	2,23	0,54	2,1	1,13
18	394	392	2,16	0,51	2,1	1,07
19	392	392	2,15	0,49	2,1	1,04
20	392	392	2,14	0,48	2,1	1,01
21	391	392	2,13	0,47	2,1	0,98

Таким образом, потребовалось получить 21 числовое значение результата измерения для того, чтобы с вероятностью 0,95 установить, что  $391 \text{ см} \leq l \leq 393 \text{ см}$ . Трудоемкость подобной работы требует автоматизации измерений и обработки экспериментальных данных.

На практике беспредельно повышать таким способом точность измерения не удастся, так как рано или поздно определяющим становится не рассеяние отсчета и, следовательно, показания средства измерений, а недостаток информации (выражающийся, например, в незнании точного значения поправок и т. п.). Накапливать экспериментальные данные и уменьшать за счет этого стандартное отклонение среднего арифметического значения показания имеет смысл лишь до тех пор, пока по критерию (10) им нельзя пренебречь по сравнению с аналогом среднего квадратического отклонения, учитывающим дефицит информации (рис. 47). Точность многократного измерения, следовательно, ограничивается дефицитом информации.

**Пример 28.** При каком количестве экспериментальных данных в примере 23 можно получить максимально возможную точность измерения?

**Решение.** 1. Для достижения максимальной точности количество экспериментальных данных нужно увеличивать до тех пор, когда по критерию (10) можно будет пренебречь  $\sigma_x$  по сравнению с  $u_v$ . Из условия

$$\sigma_x \leq \frac{1}{3} u_v$$

где  $\sigma_x = 2,0 \text{ мм}$ ;  $u_v = 2,6 \text{ мм}$ , получим, что  $\sigma_x$  нужно уменьшить не менее чем в 2,3 раза.

2. Накопление экспериментальных данных позволит перейти к среднему арифметическому значению показания. Для того, чтобы его стандартное отклонение

$$S_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

оказалось не менее чем в 2,3 раза меньше  $\sigma_x$ , нужно получить  $n > 2,3^2 = 5$  независимых отсчетов (не считая ошибок).

3. Для достижения еще большей точности нужно провести исследования,

направленные на уточнение температурной поправки, и уменьшить  $u_v$ .

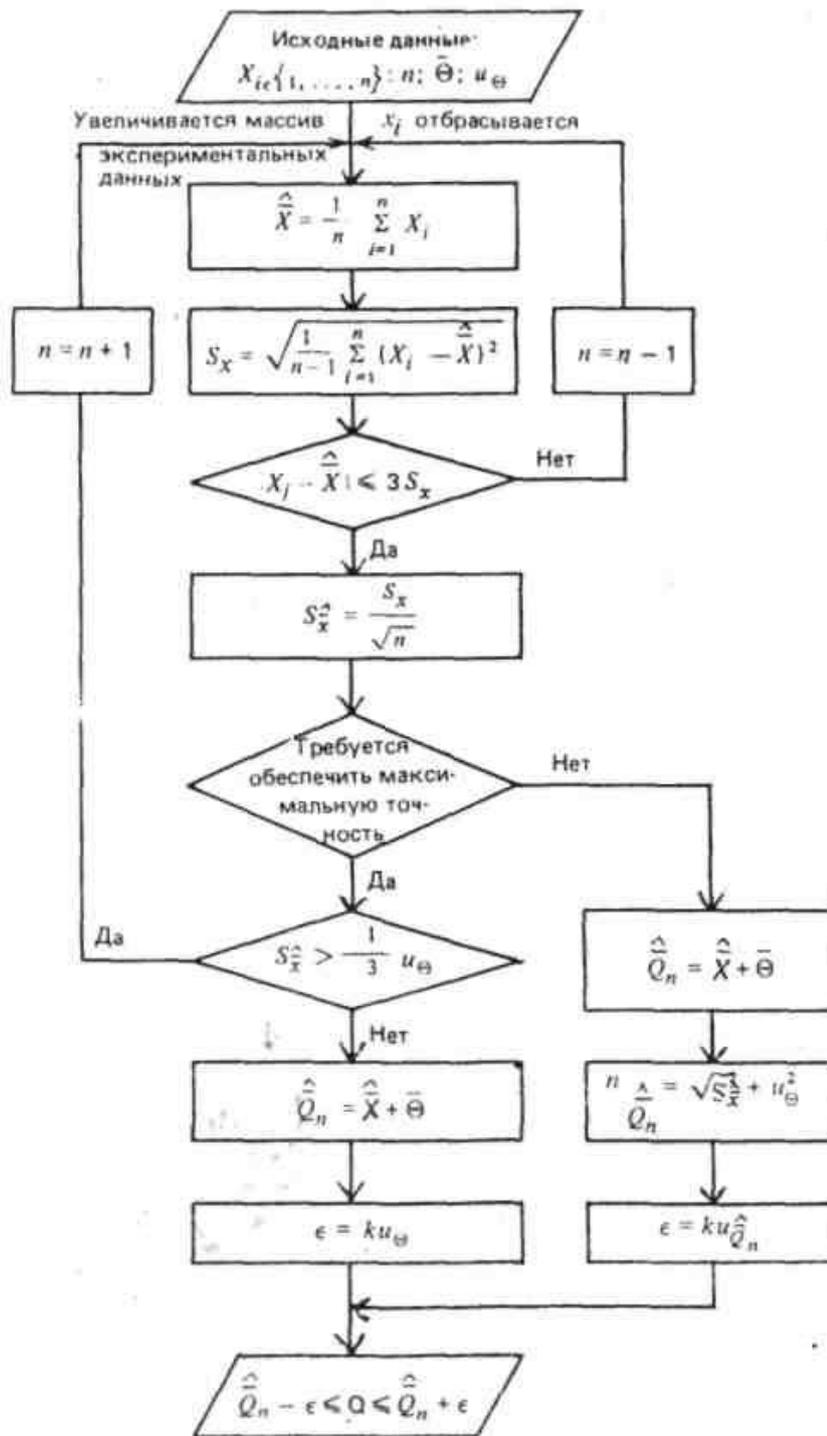


Рис. 47. Обработка экспериментальных данных при дефиците информации

### 3.7. МНОГОКРАТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ С НЕРАВНОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТСЧЕТА

При многократном измерении с неравноточными значениями отсчета, подчиняющимися нормальному закону распределения вероятности, функцию правдоподобия можно представить в виде

$$L = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \prod_{i=1}^n \sigma_{Q_i}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - \bar{Q})^2}{\sigma_{Q_i}^2}},$$

если все значения отсчета, полученные, например, с помощью разных средств измерений, являются независимыми. Для оценки среднего значения результата измерения удобнее перейти к логарифму функции правдоподобия

$$\ln L = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - \bar{Q})^2}{\sigma_{Q_i}^2} - C,$$

где  $C$  от  $\bar{Q}$  не зависит. Решая при  $\bar{Q} = \bar{Q}$  уравнение

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \bar{Q}} = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2} (Q_i - \bar{Q}) = 0,$$

получим

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2} Q_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2}}.$$

Это так называемое среднее взвешенное, в числителе которого отдельные значения результата измерения суммируются с „весами“, обратно пропорциональными их дисперсиям. Тем самым более точным значениям придается больший вес. Наличием суммы в знаменателе обеспечивается то, что в выражении

$$\bar{Q} = g_1 Q_1 + g_2 Q_2 + \dots + g_n Q_n$$

сумма всех весов

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1,$$

где нормированный вес каждого отдельного результата измерения

$$g_i = \frac{\frac{1}{\sigma_{Q_i}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2}}$$

Математическое ожидание среднего взвешенного

$$M(\bar{Q}) = M\left(\sum_{i=1}^n g_i Q_i\right) = M(g_i Q_i) = \sum_{i=1}^n g_i M(Q_i) = \bar{Q} \sum_{i=1}^n g_i = \bar{Q}.$$

Таким образом среднее взвешенное является несмещенной оценкой среднего значения результата измерения.

Дисперсия среднего взвешенного

$$\sigma^2 = D\left(\sum_{i=1}^n g_i Q_i\right) = \sum_{i=1}^n D(g_i Q_i) = \sum_{i=1}^n g_i^2 D(Q_i) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Q_i}^2}}.$$

**Пример 29.** Измерения образцовой меры длины, выполненные приборами разной точности, дали результаты, приведенные в табл. 15.

Известно, что результат измерения вертикальным оптиметром подчиняется нормальному закону распределения вероятности со стандартным отклонением 0,4 мкм; при измерениях машиной типа Цейсс — соответственно, 0,8 мкм; машиной типа Сип - 0,7 мкм; миниметром с ценой деления 1 мкм - 0,5 мкм. Каково отклонение размера от номинального значения?

Таблица 15

Порядковый номер измерения	Отклонение от номинального размера в мкм			
	Вертикальный оптиметр	Машина типа Цейсс	Машина типа Сип	Миниметр с ценой деления 1
1	11,3	10,8	9,8	10,4
2	—	11,1	10,7	11,2
3	—	10,9	—	10,1
4	—	—	—	9,9

**Решение.** Заменяя дисперсии в выражении для среднего взвешенного их оценками, имеем:

$$\overline{\Delta l} = \frac{\frac{1}{S_1^2} \Delta l_1 + \frac{1}{S_2^2} \Delta l_2 + \dots + \frac{1}{S_n^2} \Delta l_n}{\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} + \dots + \frac{1}{S_n^2}}$$

Подстановка известных значений  $S_i$  и измеренных отклонений  $\Delta l_i$  дает:

$$\overline{\Delta l} = \frac{\frac{1}{0.16} 11.3 + \frac{1}{0.64} (10.8 + 11.1 + 10.9) + \frac{1}{0.49} (9.8 + 10.7) + \frac{1}{0.25} (10.4 + 11.2 + 10.1 + 9.9)}{\frac{1}{0.16} + \frac{3}{0.64} + \frac{2}{0.49} + \frac{4}{0.25}} = 10.65 \text{ мкм.}$$

Стандартное отклонение  $\overline{\Delta l}$

$$S = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^2}}} = \sqrt{\frac{1}{31}} = 0.18 \text{ мкм.}$$

Поскольку все  $\Delta l_i$  подчиняются нормальному закону распределения вероятности, то нормальному закону подчиняется и их сумма. Поэтому с вероятностью  $P = 0,95$   $\overline{\Delta l} - 2S \leq \Delta l \leq \overline{\Delta l} + 2S$ . Окончательно:

$$10.3 \text{ мкм} \leq \Delta l \leq 11 \text{ мкм.}$$

### 3.8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НЕСКОЛЬКИХ СЕРИЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Иногда многократное измерение одной и той же величины постоянного размера производится в несколько этапов, разными людьми, в различных условиях, в разных местах и в разное время. Результат такого измерения определяется несколькими сериями полученных значений, которые в силу различных обстоятельств могут отличаться по

своим статистическим характеристикам. Серии называются однородными, если состоят из значений, подчиняющихся одному и тому же закону распределения вероятности. В противном случае серии считаются неоднородными.

Проверка однородности является обязательной при выборе способа совместной обработки результатов нескольких серий измерений. Организуется она обычно на уровне эмпирических моментов: сравниваются между собой средние арифметические и оценки дисперсий в каждой серии.

Различие между средними арифметическими  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  в двух разных сериях может быть случайным со средним значением, равным нулю, и дисперсией

$$\sigma_{\bar{Q}_2 - \bar{Q}_1}^2 = \frac{\sigma_{Q_1}^2}{n_1} + \frac{\sigma_{Q_2}^2}{n_2}.$$

Если экспериментальные данные в каждой серии подчиняются нормальному закону распределения вероятности, то при большом их числе ( $n_1, n_2 \gg 40 \dots 50$ ) нормальному закону подчиняются и средние арифметические  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  и их разность  $G = \bar{Q}_2 - \bar{Q}_1$ . При небольшом количестве экспериментальных данных в каждой серии средние арифметические  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  подчиняются закону распределения вероятности Стьюдента, но их разность при ( $n_1 + n_2 > 40 \dots 50$ ) можно считать, что уже подчиняется нормальному закону. Поэтому, задавшись доверительной вероятностью  $P$  и определив по верхней кривой на рис. 29 соответствующее ей значение  $t$ , находят доверительные границы  $\pm tS_G$ , за пределами которых не может оказаться разность  $\bar{Q}_2 - \bar{Q}_1$  если она случайная и подчиняется нормальному закону распределения вероятности (рис. 48). При несоблюдении этого условия нужно искать причину расхождения между  $\bar{Q}_2$  и  $\bar{Q}_1$  и в экспериментальные данные соответствующей серии вносить дополнительную поправку. Иногда большой массив экспериментальных данных (см. рис. 49) искусственно разбивают на две или большее количество серий для обнаружения посредством такой проверки прогрессирующего влияния какого-нибудь фактора.

Помимо выяснения значимости расхождения между средними арифметическими, проверка однородности серий включает сравнение оценок их дисперсий. Серии с незначимым различием оценок дисперсий называются равнодисперсными, с существенным различием — неравнодисперсными. Значимость различия оценок дисперсий в двух сериях, результаты измерения в которых подчиняются нормальному закону распределения вероятности, проверяется в порядке, приведенном на рис. 50, где первоначальные операции совпадают с показанными на рис. 48 и поэтому при проверке однородности серий выполняются один раз.

В процессе вычислений образуется отношение  $\psi$ , вероятность значений которого больших единицы, если это число случайное, подчиняется распределению Р.А. Фишера. Поэтому, выбрав значение интегральной функции распределения вероятности Р.А. Фишера, равным вероятности  $P$ , с которой принимается решение, можно проверить, больше или меньше ее аргумента  $\psi_0$ , вычисленное значение  $\psi$ . Если  $\psi < \psi_0$ , то различие оценок дисперсий в сериях можно признать случайным и с выбранной вероятностью  $P$  считать, что гипотеза о равнодисперсности серий не противоречит результатам ее проверки по критерию Р.А. Фишера. В противном случае эта гипотеза должна быть отвергнута. Значения аргумента интегральной функции распределения вероятности Р.А. Фишера приведены в табл. 16.

Равнодисперсные серии с незначимым различием между средними арифметическими считаются однородными. Если входящие в них экспериментальные результаты получены в одних и тех же условиях, это говорит о сходимости измерений, если в разных - о воспроизводимости. Под сходимостью понимается качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполненных в одинаковых условиях, под

воспроизводимостью - в разных (в различных местах, в разное время, различными методами и средствами). Если серии неоднородны (неравно рассеянные, или различие между средними арифметическими не может быть признано незначимым), об измерениях говорят, что они не сходятся (или не воспроизводятся).

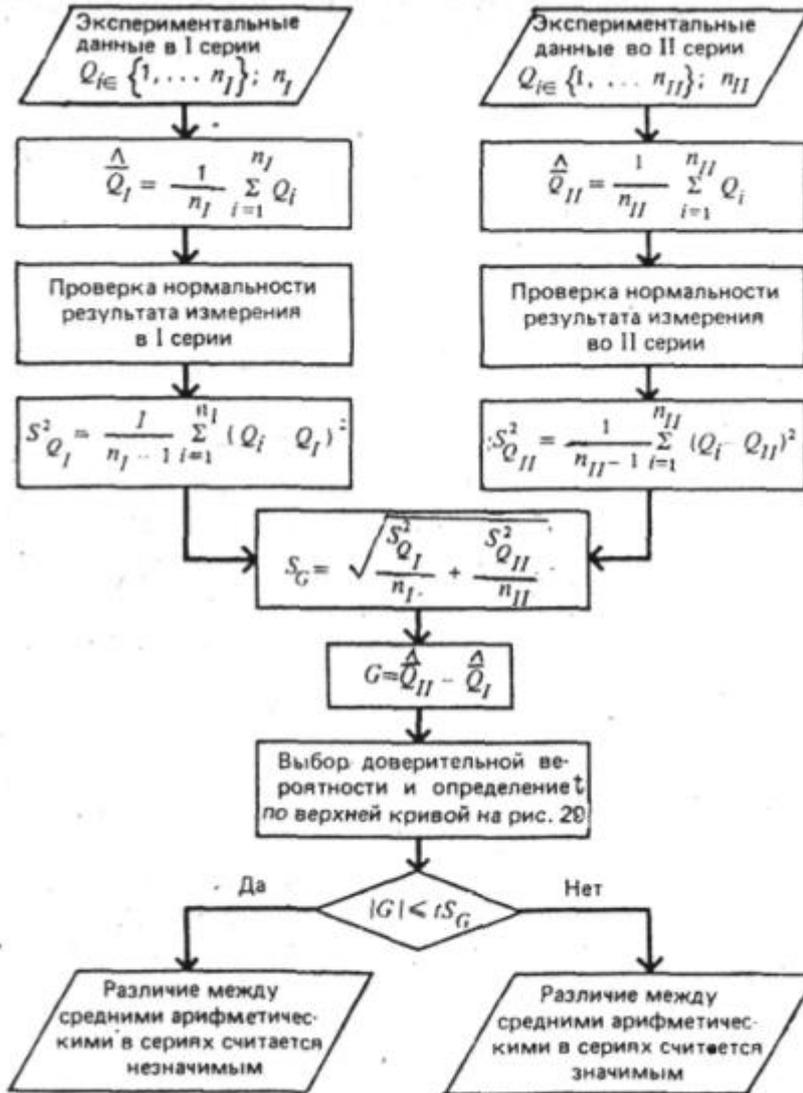


Рис. 48. Проверка значимости различия между средними арифметическими в двух сериях

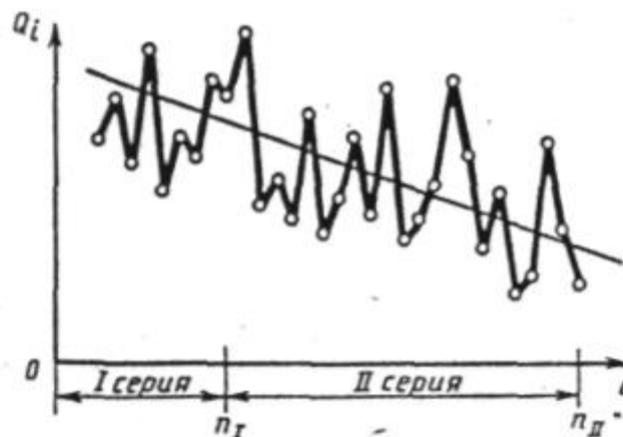


Рис. 49. Разделение массива экспериментальных данных на две серии с целью обнаружения прогрессирующего действия влияющего фактора

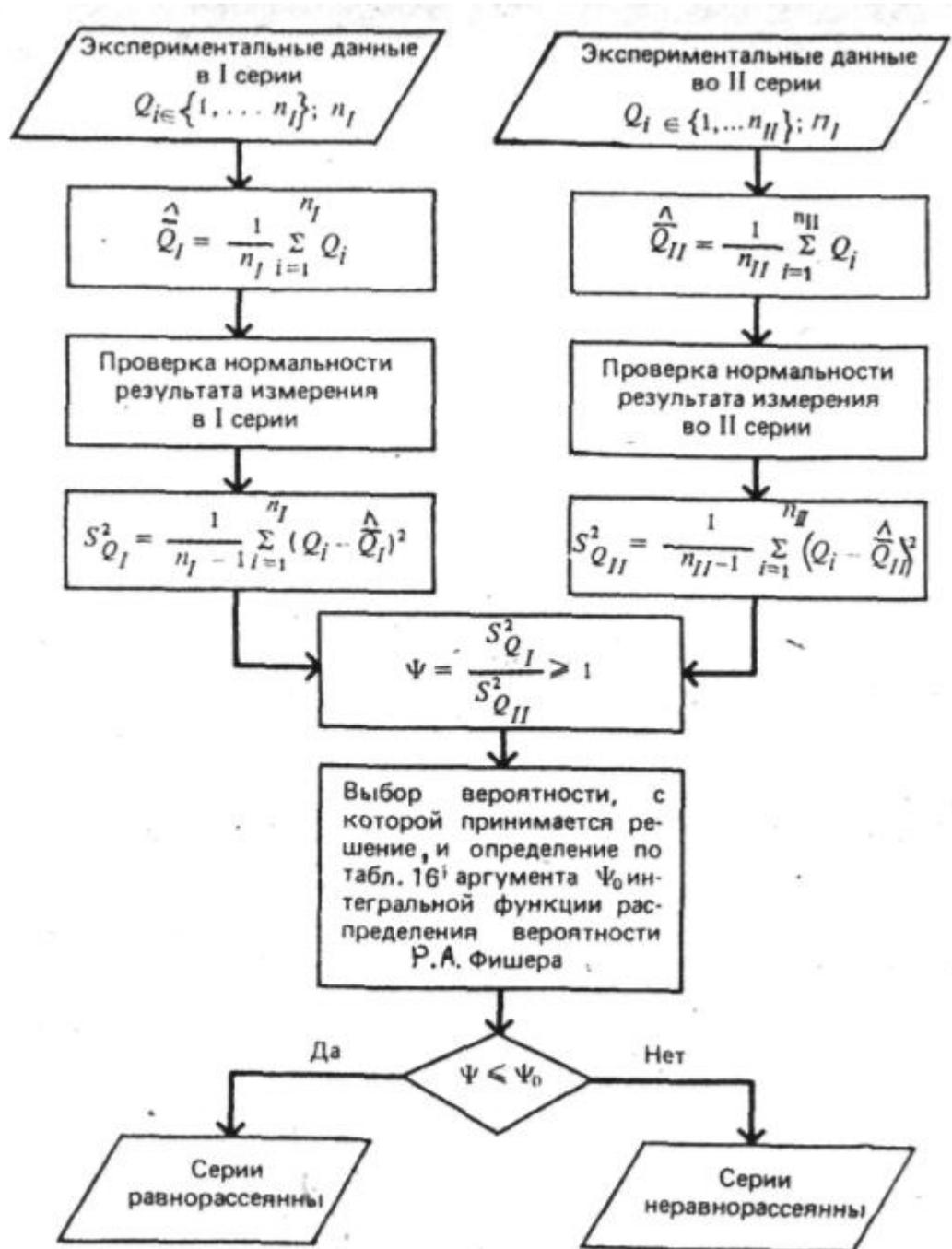


Рис. 50. Проверка равнорассеянности результатов измерений в двух сериях

$n_2$	P	$n_1$												
		2	3	4	5	6	7	9	13	16	21	25	51	$\infty$
2	0,90	39,9	49,5	53,6	55,8	57,2	58,2	59,4	60,7	61,2	61,7	62,0	62,7	63,3
	0,95	161	200	216	225	230	234	239	244	246	248	249	252	254
3	0,90	8,53	9,00	9,16	9,24	9,29	9,33	9,37	9,41	9,42	9,44	9,45	9,47	9,49
	0,95	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5
	0,99	98,5	99,0	99,2	99,2	99,3	99,3	99,4	99,4	99,4	99,4	99,5	99,5	99,5
4	0,90	5,54	5,46	5,39	5,34	5,31	5,28	5,25	5,22	5,20	5,18	5,18	5,15	5,13
	0,95	10,1	9,55	9,28	9,28	9,10	8,94	8,85	8,74	8,70	8,66	8,64	8,58	8,53
	0,99	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,5	27,1	26,9	26,7	26,6	26,4	26,1
5	0,90	4,54	4,32	4,19	4,11	4,05	4,01	3,95	3,90	3,87	3,84	3,83	3,80	3,76
	0,95	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,86	5,80	5,77	5,70	5,63
	0,99	21,2	18,0	16,7	16,0	15,5	15,2	14,8	14,4	14,2	14,0	13,9	13,7	13,5
6	0,90	4,06	3,78	3,62	3,52	3,45	3,40	3,34	3,27	3,24	3,21	3,19	3,15	3,10
	0,95	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,62	4,56	4,53	4,44	4,36
	0,99	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	10,3	9,89	9,72	9,55	9,47	9,24	9,02
7	0,90	3,78	3,46	3,29	3,18	3,11	3,05	2,98	2,90	2,87	2,84	2,82	2,77	2,72
	0,95	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,94	3,87	3,84	3,75	3,67
	0,99	13,7	10,9	9,78	9,15	8,75	8,47	8,10	7,72	7,56	7,40	7,31	7,09	6,88
9	0,90	3,46	3,11	2,92	2,81	2,73	2,67	2,59	2,50	2,46	2,42	2,40	2,35	2,29
	0,95	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,22	3,15	3,12	3,02	2,93
	0,99	11,3	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,03	5,67	5,52	5,36	5,28	5,07	4,86
13	0,90	3,18	2,81	2,61	2,48	2,39	2,33	2,24	2,15	2,10	2,06	2,04	1,97	1,90
	0,95	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,62	2,54	2,51	2,40	2,30
	0,99	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,50	4,16	4,01	3,86	3,78	3,57	3,36
16	0,90	2,07	2,70	2,49	2,36	2,27	2,21	2,12	2,02	1,97	1,92	1,90	1,83	1,76
	0,95	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,48	2,40	2,33	2,29	2,18	2,07
	0,99	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,00	3,67	3,52	3,37	3,29	3,08	2,87
21	0,90	2,97	2,59	2,38	2,25	2,16	2,09	2,00	1,89	1,84	1,79	1,77	1,69	1,61
	0,95	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,20	2,12	2,08	1,97	1,84
	0,99	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,56	3,23	3,09	2,94	2,86	2,64	2,42
25	0,90	2,93	2,54	2,33	2,19	2,10	2,04	1,94	1,83	1,78	1,73	1,70	1,62	1,53
	0,95	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,18	2,11	2,03	1,98	1,86	1,73
	0,99	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,36	3,03	2,89	2,74	2,66	2,44	2,21
51	0,90	2,79	2,39	2,18	2,04	1,95	1,87	1,77	1,66	1,60	1,54	1,51	1,41	1,29
	0,95	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,10	1,92	1,84	1,75	1,70	1,56	1,39
	0,99	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,82	2,50	2,35	2,20	2,12	1,88	1,60
$\infty$	0,90	2,71	2,30	2,08	1,94	1,85	1,77	1,67	1,55	1,49	1,42	1,38	1,26	1,00
	0,95	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	1,94	1,75	1,67	1,57	1,52	1,35	1,00
	0,99	6,63	4,61	3,78	3,32	3,02	2,80	2,51	2,18	2,04	1,88	1,79	1,52	1,00

Ценность измерительной информации вызывает стремление использовать экспериментальный материал, содержащийся во всех сериях измерений.

Экспериментальные данные, входящие в однородные серии, можно рассматривать и обрабатывать как единый массив. Для сокращения вычислений при этом целесообразно использовать полученные ранее результаты:

$$\bar{Q} = \frac{n_1 \bar{Q}_1 + n_2 \bar{Q}_2}{N};$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \left[ (n_1 - 1)S_{Q_1}^2 + (n_2 - 1)S_{Q_2}^2 + n_1 (\bar{Q}_1 - \bar{Q})^2 + n_2 (\bar{Q}_2 - \bar{Q})^2 \right]},$$

Где  $N = n_1 + n_2$ .

При обработке неравнорассеянных серий с незначимо различающимися средними арифметическими учитывается особая ценность измерений, выполненных с большей точностью. Дисперсия (рассеяние) в таких сериях меньше. Для учета этого в оценку среднего значения всего массива экспериментальных данных включают средние арифметические серий с „весами“, обратно пропорциональными оценкам их дисперсий:

$$\bar{Q} = \frac{\frac{1}{S_1^2} \bar{Q}_1 + \frac{1}{S_2^2} \bar{Q}_2 + \dots + \frac{1}{S_l^2} \bar{Q}_l}{\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} + \dots + \frac{1}{S_l^2}}.$$

Это уже знакомое по предыдущему разделу среднее взвешенное. Стандартное отклонение среднего взвешенного

$$S = \sqrt{\frac{1}{\sum_{j=1}^l \frac{1}{S_j^2}}}$$

Порядок обработки экспериментальных данных  $Q_{i \in \{1, \dots, m_j\}}$  входящих в  $j \in \{1, \dots, l\}$  неравнорассеянных серий с незначимым различием средних арифметических, показан на рис. 51.

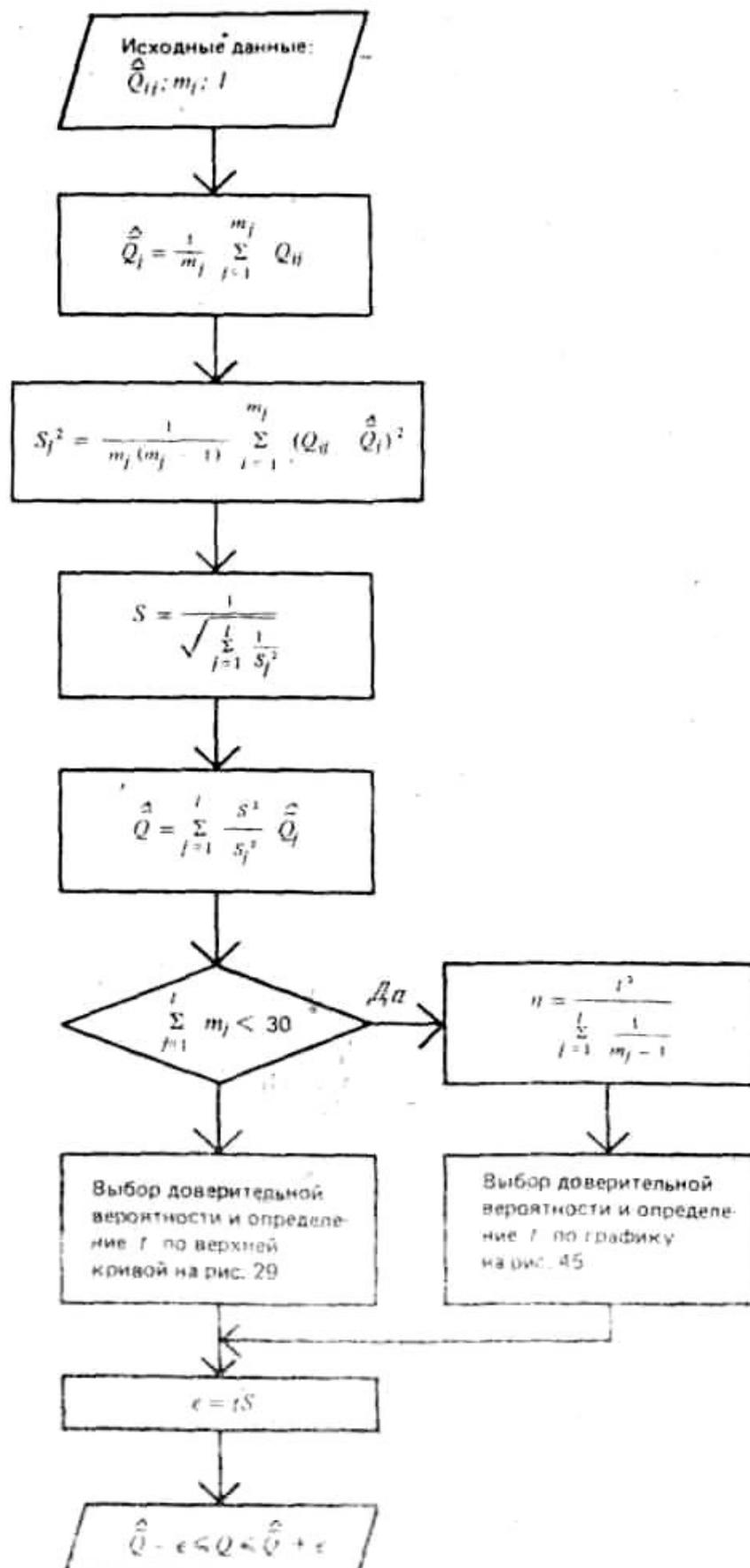


Рис. 51. Обработка экспериментальных данных, входящих в неравнорассеянные серии

## ГЛАВА 4

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

#### 4.1. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ

Под единством измерений понимается такое их состояние, при котором обеспечивается достоверность измерений, а значения измеряемых величин выражаются в узаконенных единицах.

Постановлением Совета Министров СССР от 4 апреля 1983 г. № 273 „Об обеспечении единства измерений в стране“ работы по обеспечению единства измерений, проводимые на предприятиях, в организациях и учреждениях отнесены к основным видам работ. Этим и другими постановлениями правительства предусмотрен комплекс правовых, организационных и технических мер, направленных на обеспечение единства измерений в стране.

Правовой основой обеспечения единства измерений служит законодательная метрология — свод государственных актов и нормативно-технических документов различного уровня, регламентирующих метрологические правила, требования и нормы.

Гарантией обеспечения единства измерений в стране является экономический механизм саморегулирования народного хозяйства, а также государственная и производственная дисциплина, предусматривающие экономические санкции, материальную, административную и уголовную ответственность за нарушение требований законодательной метрологии.

В организационном плане единство измерений обеспечивается Метрологической службой СССР, состоящей из государственной и ведомственных метрологических служб.

Технической базой обеспечения единства измерений является система воспроизведения единиц физических величин и передачи информации об их размерах всем без исключения средствам измерений в стране.

В соответствии с основным уравнением измерения (2) главная измерительная процедура сводится к сравнению неизвестного размера с известным, в качестве которого выступает размер соответствующей единицы СИ. Информация об этих единицах и их размерах содержится в нормативно-технических документах, в частности, в ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78). Чем ближе используемый для сравнения размер единицы к ее определению, тем точнее в этих единицах будет выражено значение измеряемой физической величины. Этим объясняются высокие требования к точности воспроизведения единиц, удовлетворение которых составляет одно из важнейших направлений постоянных метрологических работ.

Размеры единиц могут воспроизводиться там же, где выполняются измерения, либо информация о них должна передаваться с места их централизованного хранения или воспроизведения. В зависимости от этого различают децентрализованное и централизованное воспроизведение единиц. Примером децентрализованного воспроизведения может служить воспроизведение единицы площади  $1 \text{ м}^2$ . Децентрализованно воспроизводятся единицы многих производных физических величин (при этом информация о размерах основных единиц передается с места централизованного хранения или воспроизведения).

Централизованное воспроизведение единиц осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых эталонами. Эталон — это техническое устройство, обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы с целью передачи информации о ее размере средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона. Эталон, воспроизводящий единицу с наивысшей в стране точностью, называется первичным. Эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий в этих условиях первичный эталон, называется специальным. Официально

утвержденные в качестве исходных для страны первичный или специальный эталоны называются государственными.

#### 4.2. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Основные единицы в настоящее время воспроизводятся только централизованно. Эталоны основных единиц воспроизводят их обычно в соответствии с определением. Каждый эталон состоит из воспроизводящей части и приспособлений или устройств, обеспечивающих съем и передачу информации о размере единицы. Во всех без исключения случаях результат воспроизведения является случайной величиной.

Основных единиц в Международной системе семь: секунда, метр, килограмм, кельвин, кандела, ампер и моль. Соответственно должно было бы быть и семь государственных первичных эталонов основных единиц. Однако в эталоне моля нет необходимости. В 0,012 кг изотопа углерода-12 содержится  $6,022 \cdot 10^{23}$  атомов. Это число называется числом Авогадро. Если число структурных элементов, составляющих вещество, известно, то деление его на число Авогадро дает количество вещества в молях. Можно при необходимости воспроизвести 1 моль любого вещества как  $6,022 \cdot 10^{23}$  его структурных элементов. Масса одного моля водорода, например, составляет 2 г, кислорода — 32 г, воды - 18 г и т. д.

Государственный первичный эталон единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза воспроизводит основную единицу СИ секунду в соответствии с ее определением (см. разд. 1.5). Принципиальная схема воспроизводящей части эталона показана на рис. 52. Атомы цезия-133 испускаются нагретым источником 1. Пучок этих атомов попадает в область неоднородного магнитного поля, создаваемого магнитом 2. Угол отклонения атомов в таком магнитном поле определяется их магнитным моментом. Поэтому неоднородное магнитное поле позволяет выделить из пучка атомы, находящиеся на определенном энергетическом уровне. Эти атомы направляются в объемный резонатор 3, пролетая через

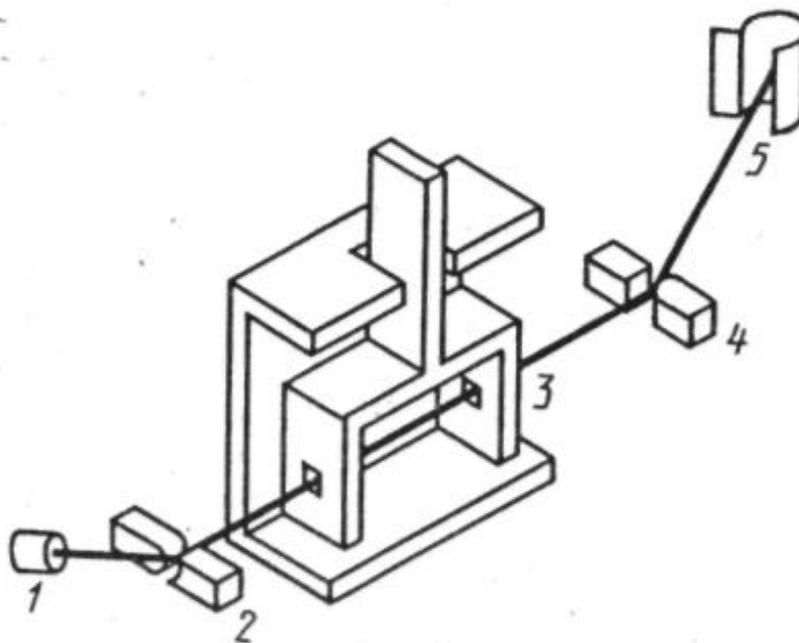


Рис. 52. Принципиальная схема цезиевого репера частоты

который взаимодействуют с переменным электромагнитным полем сверхвысокой

частоты. Частота электромагнитных колебаний в резонаторе может регулироваться в небольших пределах. При совпадении ее с частотой, соответствующей энергии квантовых переходов, происходит поглощение энергии СВЧ-поля, и атомы цезия-133 переходят в основное состояние. Отклоняющей магнитной системой 4 они "направляются" на детектор 5. Ток детектора при настройке резонатора на частоту квантовых переходов оказывается максимальным. Этой частоте приписывается значение 9192631770 Гц, а промежуток времени, равный 9192631770 периодам сверхвысокочастотных колебаний, принимается равным 1 с.

Выбор числа 9192631770 объясняется следующим образом. До 1960 г. секунда определялась «как 1/86400 часть средних солнечных суток (среднего значения суток в течение года). Стандартное отклонение этой случайной величины составляет  $10^{-7}$  с. С 1960 по 1967 гг. за секунду принималась 1/31556925,9747 часть тропического года — промежутка времени между двумя последовательными прохождениями Солнцем точки весеннего равноденствия. Продолжительность тропического года не постоянна, поэтому для расчетов был выбран конкретный 1900 г. Период обращения Земли вокруг Солнца более стабилен, чем Земли вокруг оси. Поэтому стандартное отклонение секунды при воспроизведении по новому определению уменьшилось до  $10^{-10}$  с. Стремление к еще большему повышению точности воспроизведения секунды побудило XIII Генеральную конференцию по мерам и весам принять в 1967 г. современное ее определение, стандартное отклонение при котором составляет  $10^{-13}$  с. Размер секунды решено было при этом не менять, чем и объясняется цифра 9192631770, связывающая события элементарного и планетарного уровней.

Долговременная стабильность цезиевого репера частоты невелика. Поэтому для хранения единиц времени и частоты в состав государственного первичного эталона входит водородный мазер. Принцип действия его показан на рис. 53. В стеклянной трубке 1 под действием высокочастотного электрического разряда происходит диссоциация молекул водорода. Пучок

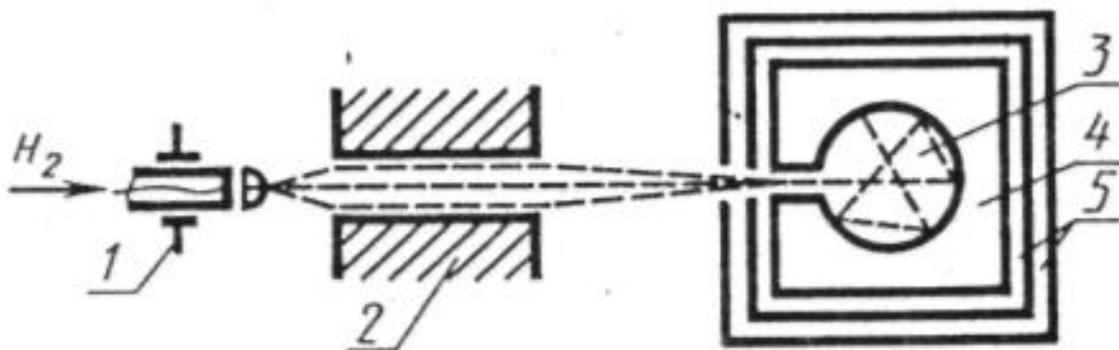


Рис. 53. Принципиальная схема лазера на атомарном водороде

атомов водорода через коллиматор попадает в неоднородное магнитное поле шестиполюсного осевого магнита 2, где претерпевает пространственную сортировку. В результате последней на вход накопительной ячейки 3, расположенной в объемном резонаторе 4, попадают лишь атомы водорода, находящиеся на верхнем энергетическом уровне. Находящийся внутри многослойного экрана 5 высокочастотный резонатор настроен на частоту используемого квантового перехода. Взаимодействие возбужденных атомов с высокочастотным полем резонатора (в течение примерно 1 с) приводит к их переходу на нижний энергетический уровень с одновременным излучением квантов энергии на резонансной частоте 1420405751,8 Гц. Это вызывает самовозбуждение генератора, частота которого отличается высокой стабильностью. Ее значение периодически поверяется по цезиевому реперу.

Наряду с водородным мазером для хранения шкал времени в состав государственного первичного эталона единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза

входит группа квантово-механических часов. Это непрерывно действующий сложный технический комплекс, главное внимание в котором уделено поддержанию длительного режима работы с высокой стабильностью показаний. Кроме того, в состав эталона входит аппаратура для передачи информации о размерах единиц при внутренних и внешних сравнениях (лазеры, СВЧ-генераторы, квантовые часы) и средства обеспечения. Диапазон временных интервалов, воспроизводимых эталоном, составляет  $10^{-9} \dots 10^8$  с.

Принятое XVII Генеральной конференцией по мерам и весам в 1983 г. новое определение метра (см. разд. 1.5) позволило выразить эту единицу СИ через единицу времени — секунду. Однако секунда воспроизводится в сверхвысокочастотном диапазоне радиоволн, а метр по определению должен воспроизводиться в оптическом. Оптические частоты на 3—4 порядка выше СВЧ. Потребовалось, образно говоря, из одного диапазона в другой перекинуть мост для передачи эталонной точности. Входящий в состав государственного первичного эталона единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза радиооптический частотный мост (РОЧМ) решает эту задачу в несколько этапов, на каждом из которых используется принцип повышения частоты, общий для всех синтезаторов частот — смещение на нелинейном элементе высокочастотных гармоник опорных сигналов. На первом этапе эталонная точность воспроизведения единиц передается в субмиллиметровый диапазон. При этом частота 3557147,5 МГц  $D_2O$ -лазера, работающего на длине волны  $\lambda = 84$  мкм, с помощью лазера на парах синильной кислоты HCN ( $\lambda = 337$  мкм) и клистронов с номинальными частотами 74 и 8,2 ГГц привязывается посредством специальной системы фазовой синхронизации к эталонной частоте цезиевого репера. На втором этапе эталонная точность передается из субмиллиметрового в инфракрасный диапазон электромагнитных волн. Для этого используется стабилизированный  $CO_2$ -лазер ( $\lambda = 10,6$  мкм), частота которого привязывается к восьмой гармонике  $D_2O$ -лазера и синхронизируется с частотой цезиевого репера. Специальной системой фазовой автоподстройки к частоте этого лазера привязывается частота  $CO_2$ -лазера с  $\lambda = 10,2$  мкм, третья гармоника которой суммируется с частотой клистронов 48 ГГц и сравнивается на нелинейном элементе с частотой мощного гелий-неонового лазера, синхронизированного по стабилизированному He—Ne/ $CH_4$ -лазеру с длиной волны излучения  $\lambda = 3,39$  мкм. В результате измерения частоты биений последнее звено РОЧМ — He—Ne/ $CH_4$ -лазер аттестуется по первичному цезиевому реперу. В итоге частотный диапазон государственного первичного эталона единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза расширяется от 1 до  $10^{14}$  Гц.

Расширить с помощью РОЧМ диапазон воспроизведения единиц времени и частоты до видимой части спектра электромагнитных волн не удастся. Между тем именно оптический диапазон наиболее удобен для перехода интерферометрическим методом от длин волн электромагнитного излучения к концевым и штриховым мерам длины. Поэтому по He—Ne/ $CH_4$ -лазеру, входящему в состав государственного первичного эталона времени и частоты и шкалы времени Советского Союза аттестуется гелий-неоновый лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения иода-127. Излучение He—Ne/ $I_2$ -лазера относится уже к видимой части диапазона ( $\lambda = 0,633$  мкм). На специальной установке, основу которой составляет вакуумированный модуляционный интерферометр Фабри-Перо, сравнивается количество длин волн излучения лазера He—Ne/ $CH_4$  и He—Ne/ $I_2$ , укладываемых на одном и том же элементе длины. По их отношению с эталонной точностью определяется длина волны излучения He—Ne/ $I_2$ -лазера. Затем с помощью интерференционного компаратора на основании измерения порядка интерференции  $N$  аттестуются концевые и штриховые меры длины, согласно соотношению  $L = N \lambda$ .

Таким образом, воспроизведение единиц времени, частоты и длины осуществляется единым техническим комплексом — государственным первичным эталоном единиц времени, частоты и длины. Особенностью его является то, что часть эталона, включающая цезиевый репер, водородный мазер, квантово-механические часы и РОЧМ,

находится под Москвой, в НПО „Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений“ (НПО „ВНИИФТРИ“), а другая часть, в которую входит установка для измерения отношения длин волн инфракрасного и оптического лазеров и интерференционный компаратор, - в Ленинграде в НПО „ВНИИМ им. Д. И. Менделеева“. Такая территориальная разобщенность эталона потребовала введения в его состав перевозного He-Ne/CH<sub>4</sub>-лазера, длина волны излучения которого устанавливается по выходному He-Ne/CH<sub>4</sub>-лазеру РОЧМ и служит для измерения длины волны излучения He-Ne/I<sub>2</sub>-лазера. Единица длины - метр воспроизводится со стандартным отклонением  $S = 5 \cdot 10^{-10}$  м, что почти на порядок меньше стандартного отклонения результата воспроизведения метра по старому определению с помощью криптоновой лампы ( $4 \cdot 10^{-9}$  м). В перспективе предполагается повысить точность воспроизведения метра еще не менее чем на порядок.

Единица массы — килограмм — воспроизводится до сих пор гирей из платиноиридиевого сплава (90 % Pt и 10 % Ir), изготовленной в 1883 г. английской фирмой Джонсон, Маттей и К° и полученной по жребию Россией в 1889 г. согласно Метрической конвенции. Гиря, фотография которой приведена на рис. 54, имеет форму цилиндра с высотой и диаметром основания, равными 39 мм. Она хранится на кварцевой подставке под двумя стеклянными колпаками в стальном шкафу особого сейфа, находящегося в термостатированном помещении НПО „ВНИИМ им. Д. И. Менделеева“.

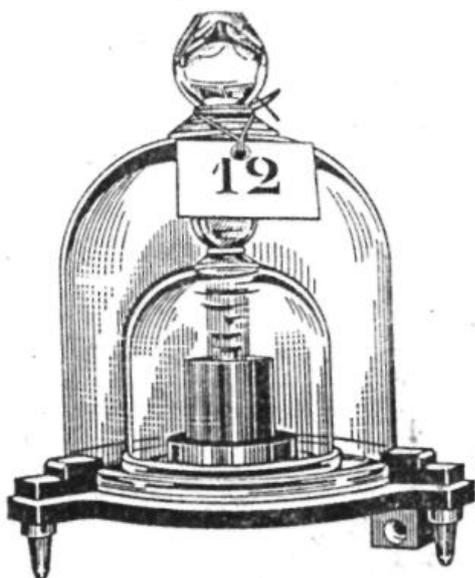


Рис. 54. Платиноиридиевая гиря, входящая в состав государственного первичного эталона единицы массы — килограмма

В состав государственного первичного эталона единицы массы кроме гири входят эталонные весы, на которых один раз в 10 лет с помощью манипуляторов дистанционно сличаются с эталонной гирей эталоны-копии. Несмотря на все предосторожности, как показывают результаты международных сличений, за 90 лет масса эталонной гири, воспроизводящей килограмм со стандартным отклонением  $(1. \dots 2) \cdot 10^{-8}$  кг, увеличилась на 0,02 мг. Объясняется это адсорбцией молекул из окружающей среды, оседанием пыли на поверхность гири и образованием тонкой коррозионной пленки. В перспективе предполагается перейти к воспроизведению единицы массы через счетное число атомов какого-нибудь химического элемента, скорее всего изотопа кремния-28. Для этого, однако, необходимо повысить точность определения числа Авогадро, на что сейчас направлены усилия многих метрологических лабораторий в мире.

Воспроизведение единицы термодинамической температуры - Кельвина как  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды не представляет особого труда. Температуру тройной точки воды удается поддерживать со стандартным отклонением 0,2 мК, чем и определяется стандартное отклонение воспроизведения Кельвина, составляющее примерно  $10^{-3}$  К. Трудности возникают тогда, когда появляется необходимость измерить температуру, отличающуюся от 273,16 К. Свойство нагретости тел можно представить в виде отдельных частей только мысленно. На практике для определения количественной характеристики этого свойства используют тепловое расширение тел (например, столба ртути или спирта), изменение электрического сопротивления и т. п. Термометрические свойства различных веществ (газов, жидкостей, твердых тел) сложным образом и недостаточно точно отражают изменение в широком диапазоне их термодинамической температуры. Поэтому на температурной шкале устанавливается несколько реперных точек, температура в которых

определяется газовым термометром, использующим соотношение между объемом, давлением и температурой идеального газа. Это наиболее точные, но очень трудоемкие измерения, выполняемые лишь в немногих ведущих метрологических лабораториях мира. Основная сложность их состоит в учете несоответствия реального газа идеальному. В промежутках между реперными точками температура измеряется с помощью термометрических веществ, градуированных по этим точкам.

С 1968 г. по решению XIII Генеральной конференции по мерам и весам Международная практическая температурная шкала (МПТШ-68)\* включает 12 реперных точек, значение температуры в которых приведено ниже.

Реперная точка	Температура, К
Тройная точка водорода	13,81
Точка кипения водорода при давлении 33330,6 Па	17,042
Точка кипения водорода при нормальном давлении	20,28
Точка кипения неона	27,102
Тройная точка кислорода	54,361
Точка кипения кислорода	90,188
Тройная точка океанской воды	273,16
Точка кипения океанской воды	373,15
Точка затвердевания олова	505,118
Точка затвердевания цинка	692,73
Точка затвердевания серебра	1235,08
Точка затвердевания золота	1337,58

В диапазоне 1,5 .. 4,2 К воспроизведение температуры обеспечивается государственным специальным эталоном единицы температуры на ос нове шкалы<sup>4</sup> Не 1958 г.

В диапазоне 4,2 ... 13,81 К температура воспроизводится государст-

---

\*Согласно резолюции № 7 XVIII Генеральной конференции по мерам и весам, 1089 г. Международным комитетом мер и весов была принята Международная температурная шкала (МТШ-90), которая с 1990 г. должна стать основой измерений температуры, заменив действующие МПТШ-68 и Предварительную температурную шкалу (ПТШ-76).

---

венным специальным эталоном единицы температуры на основе температурной шкалы германиевого термометра сопротивления.

В диапазоне 13,81 . . . 273,15 К государственным первичным эталоном единицы температуры воспроизводится шесть реперных точек, а значение температуры в интервалах между ними определяется эталонным платиновым термометром сопротивления.

Все эти эталоны хранятся в НПО „Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений“.

В диапазоне 273,15 . . . 1337,58 К государственным первичным эталоном единицы температуры, хранящимся в НПО „ВНИИМ им. Д. И. Менделеева“, воспроизводятся тройная точка воды, а также точки затвердевания олова, цинка, серебра и золота. В промежутках между ними значение температуры устанавливается платиновым термометром.

В диапазоне 1337,58 . . . 2800 К этим же эталоном значение температуры определяется по яркости накала рабочего тела температурной лампы, которая градуируется последовательным удвоением яркости черного тела при температуре затвердевания золота. Этот эталон утвержден в качестве эталона СЭВ.

В диапазоне 10000 . . . 150000 К в Харьковском научно-производственном объединении „Метрология" создан государственный специальный эталон единицы температуры, предназначенный для обеспечения единства измерений температуры плазменных источников излучения.

Перспективы дальнейшего совершенствования эталонов в области контактной термометрии (273,15 . . . 1337,58 К) связаны с созданием более точного газового термометра. Рассматривается также возможность использования для создания государственных эталонов термометрических свойств электрического сопротивления, напряжение шумов которого имеет квантовую природу, и температурной зависимости частоты ядерного квадрупольного резонанса.

Единица силы света — кандела по последнему определению, данному XVI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1979 г., воспроизводится в НПО „ВНИИОФИ" государственным первичным эталоном, утвержденным в 1983 г. Основу эталона составляет модель черного тела при температуре 2700 К. Излучение черного тела при такой температуре мало отличается по своему спектральному составу от излучения ламп накаливания, широко используемых в качестве источников света. Это облегчает аттестацию последних в качестве вторичных эталонов.

Спектральную составляющую излучения черного тела на частоте  $540 \cdot 10^{12}$  Гц (длина волны 555,016 нм) выделяют светофильтром, а энергию ее контролируют радиометром. Стандартное отклонение при воспроизведении канделы составляет  $10^{-3}$  кд.

Единица силы электрического тока — ампер — по определению воспроизводится не может, так как в нем фигурируют проводники „бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения". Однако, в некоторых частных случаях (например, в случае двух соленоидов) можно рассчитать силу взаимодействия электрических токов, протекающих по проводникам конечных размеров, с достаточно высокой точностью.

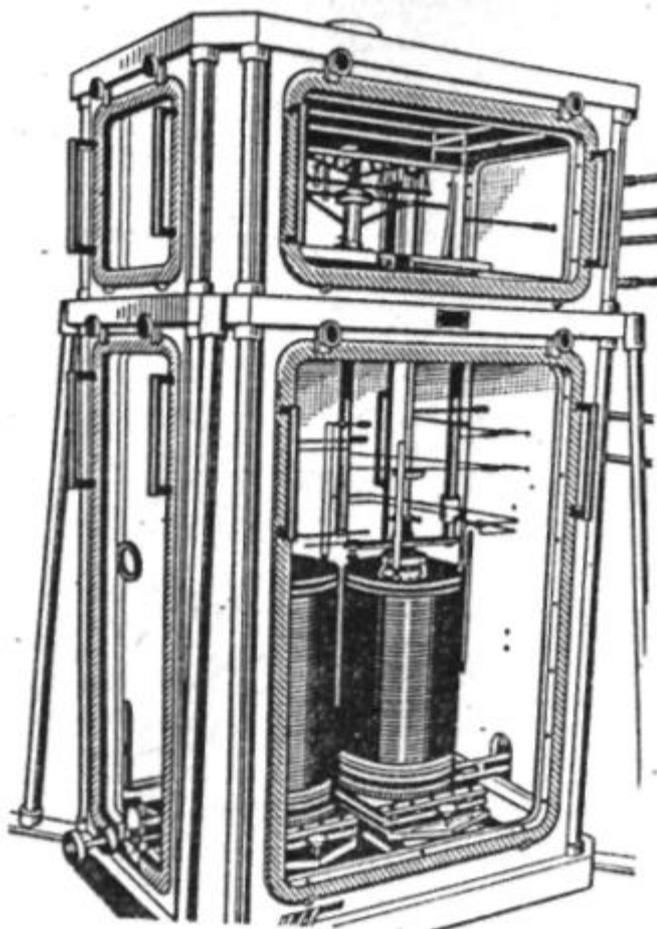


Рис. 55. Государственный первичный эталон единицы силы электрического тока — ампера

В государственном первичном эталоне единицы силы электрического тока — ампера, хранящемся в НПО „ВНИИМ им. Д.И. Менделеева“, используется взаимодействие электрических токов в последовательно соединенных коаксиальных соленоидах (катушках) с однослойной обмоткой (рис. 55). Наружный соленоид неподвижен, а внутренний, подвешенный к одному из плеч коромысла весов, при включении электрического тока втягивается внутрь неподвижного с силой

$$F = kI^2,$$

где расчетный коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от геометрических соотношений в электродинамической системе. На равноплечих весах эта сила уравнивается массой гирь. Согласно расчетам, при массе уравнивающих гирь около 8 г сила электрического тока составляет 1 ампер. Стандартное отклонение при воспроизведении ампера государственным первичным эталоном не превышает  $4 \cdot 10^{-6}$  А.

В дальнейшем предполагается в качестве основной единицы СИ вместо ампера утвердить единицу электрического напряжения - вольт.

#### **4.3. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ О РАЗМЕРАХ ЕДИНИЦ**

Как уже указывалось, исходная информация о размерах единиц содержится в нормативных документах СТ СЭВ 1052-78 и ГОСТ 8.417-81. Как и любая другая информация, она может передаваться письменно или устно, с помощью технических средств (например, радио, телевидения, телетайпа) или без них. Опосредованно она содержится в конструкторской документации, поступающей на заводы-изготовители средств измерений. При выпуске средств измерений в обращение информация о размере соответствующей единицы СИ оказывается заложенной либо в номинальное значение меры, либо в значения отметок на шкале отсчетного устройства, либо в градуировочные

таблицы, графики и т. п. В таком виде эта информация хранится средствами измерений на протяжении всего периода их эксплуатации. Правильность и точность заложенной в средства измерений информации о размере единиц устанавливается на государственных испытаниях головных образцов средств измерений, предназначенных для серийного производства, или при метрологической аттестации таких средств измерений, которые выпускаются единичными экземплярами, либо являются уникальными. Сохранность этой информации контролируется при первичной и всех последующих поверках средств измерений.

К метрологическим видам работ относится непосредственная передача информации о размере единиц от эталонов средствам измерений. Осуществляется она путем сравнения показаний с заведомо более точно известным значением соответствующей физической величины.

Иногда в результате непосредственной передачи информации о размере единиц мерам и отметкам шкал отсчетных устройств средств измерений приписываются значения, выраженные в этих единицах. Такая процедура называется градуировкой. В некоторых случаях составляются градуировочные графики или таблицы. Если высокоточным мерам или отметкам шкал отсчетных устройств прецизионных средств измерений уже приписаны определенные значения (например, при выпуске), то в ходе их аттестации определяются поправки, которые при измерениях должны вноситься в показания. Без таких поправок результаты измерений будут неправильными.

Использовать для градуировки, аттестации и поверки средств измерений непосредственно государственные первичные эталоны нельзя. Эти эталоны являются национальным достоянием, ценностями особой государственной значимости. Их хранят в метрологических институтах страны в специальных так называемых эталонных помещениях, где поддерживается строгий режим по влажности, температуре, вибрациям и другим влияющим величинам. Для обслуживания государственных эталонов из числа ведущих специалистов-метрологов назначаются ученые — хранители эталонов, облеченные особыми полномочиями. Используются государственные эталоны для воспроизведения единиц и передачи информации об их размерах достаточно редко, с соблюдением мер предосторожности, исключающих выход эталонов из строя. Таким образом, производительность их невелика, и для передачи информации о размере единиц обширному парку средств

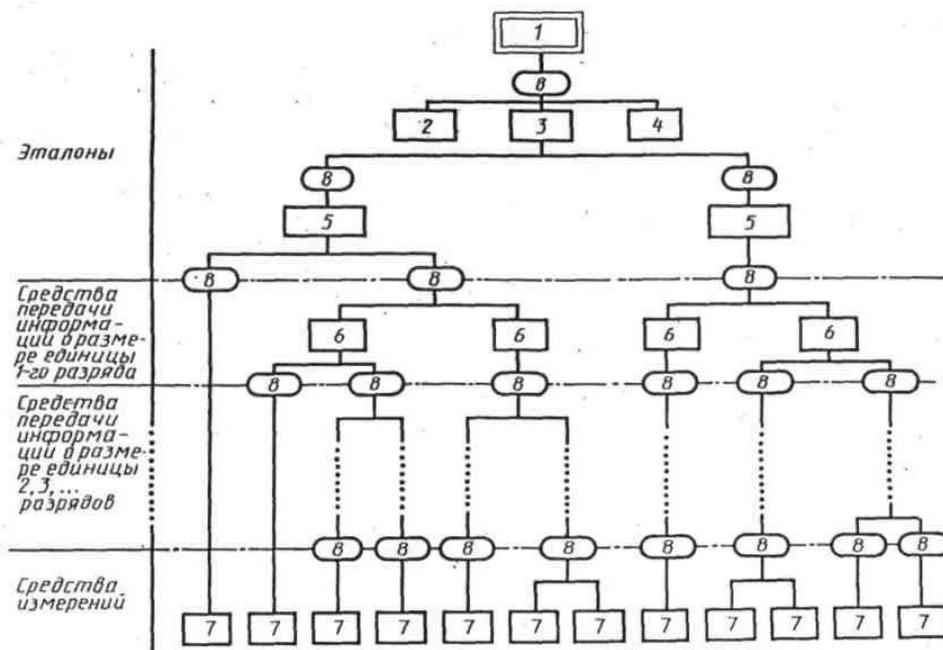


Рис. 56. Передача информации о размере единицы (вариант):  
 1 – государственный первичный или специальный эталон; 2 – эталон-свидетель; 3 – эталон-копия; 4 – эталон сравнения; 5 – рабочие эталоны; 6 – средства передачи информации о размере единицы; 7 – средства измерений; 8 – методы передачи информации о размере единицы

измерений приходится прибегать к многоступенчатой процедуре, схема которой показана на рис. 56.

По размеру единицы, воспроизводимому государственным эталоном, устанавливаются значения физических величин, воспроизводимые вторичными эталонами. Среди вторичных эталонов различают эталоны-свидетели, предназначенные для проверки сохранности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты; эталоны сравнения, применяемые для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличимы друг с другом, и эталоны-копии, используемые для передачи информации о размере единицы рабочим эталонам (рабочим называется эталон, от которого непосредственно получают информацию о размере единицы нижестоящие по схеме технические средства). Наименования эталонов с указанием стандартного отклонения случайного результата воспроизведения ими единицы физической величины, заключенные в прямоугольные рамки, размещаются в верхней части схемы, в так называемом поле эталонов.

Средства, предназначенные для дальнейшей передачи информации о размере единицы, расположены на рис. 56 под полем эталонов. Принято называть их образцовыми средствами измерений. Такое название нельзя признать удачным, т. к. во-первых, процедура передачи информации о размере единицы не соответствует определению измерения, а во-вторых, применение для практических измерений средств передачи информации о размере единицы и эталонов запрещено. По точности эти средства подразделяются на несколько разрядов. Средства наиболее высокой точности относятся к первому разряду, меньшей — ко второму, еще меньшей — к третьему и т. д.

Характеристики точности, например, стандартное отклонение передаваемого размера, обусловленное свойствами средств передачи информации о нем, указываются в прямоугольной рамке под наименованием самого средства. Номенклатура и количество этих средств должны обеспечить передачу информации о размере единицы всем без исключения средствам измерений, которым это необходимо. В число последних не входят, например, промежуточные измерительные преобразователи, хотя, как и любые другие средства измерений они подлежат обязательной поверке. Из этого примера видно, что поверка и передача информации о размере единицы — не одно и то же. Поэтому выражение «поверочная схема» применительно к схеме передачи информации о размере

единицы является неудачным.

Средства измерений располагаются в нижнем поле на рис. 56 в порядке (слева направо) понижения их точности. Класс точности (см. разд. 2.3.3) или стандартное отклонение показания, обусловленное свойствами средства измерений, указывается в одной рамке с наименованием. Для передачи информации о размере единицы средства измерений использовать нельзя.

Следует подчеркнуть условность различия между средствами измерений и средствами передачи информации о размере единицы. Лишь в немногих случаях последние заранее проектируются и выпускаются как таковые. Чаще в качестве их аттестуются обычные средства измерений, отличающиеся высокой стабильностью и воспроизводимостью показаний, тщательно изученными и по возможности улучшенными метрологическими характеристиками (см. разд. 2.3).

В качестве методов передачи информации о размере единиц (их названия заключаются в овальные рамки на схеме, показанной на рис. 56) используются методы непосредственного сличения (т. е. сличения меры с мерой или показаний двух приборов без применения специальных технических средств), сличения с помощью компаратора и т. п. Результат сличения является случайной величиной. Для того, чтобы после определения поправки рассеянием результата сличения можно было пренебречь, его стандартное отклонение, согласно критерию (10), должно быть как минимум в три раза меньше стандартного отклонения, характеризующего точность средства, находящегося в нижнем поле на рис. 56. Запас по точности эталона в 10 ... 30 раз позволяет иметь две ступени передачи, запас в 30 . . . 100 раз — три ступени и т. д. При определении числа ступеней, необходимого количества рабочих эталонов и других средств передачи информации о размере единиц учитываются номенклатура, численность и размещение средств измерений в стране, производительность эталонов и средств передачи информации о размере единиц, организационные, производственные, экономические возможности и много другое, так что на практике указанные соотношения не играют определяющей роли.

Схемы, регламентирующие передачу информации о размере единицы всему парку средств измерений в стране, называются государственными; охватывающие только средства измерений, находящиеся в обращении в отдельном министерстве или ведомстве, — ведомственными; распространяющиеся на средства измерений, закрепленные за конкретным метрологическим органом, — локальными. Ведомственная схема, как правило, возглавляется рабочим эталоном, а локальная — средством передачи информации о размере единицы, называемым исходным. И та и другая входят составной частью в государственную схему, возглавляемую государственным эталоном.

Единство измерений обеспечивается благодаря следующим обстоятельствам. С одной стороны, то, что значение измеренной величины находится в определенном интервале, устанавливается с необходимой достоверностью. С другой стороны, поправка  $\theta$  к показанию  $X$  средства измерений уточняет результат измерения  $Q$ , приводя его к такому значению, которое в тех же условиях было бы получено более точным средством измерений. Придавая результатам измерений, показаниям и поправкам индексы, соответствующие разрядам в цепи передачи информации о размере единицы, при четырех ступенчатой передаче, например, получим:

$$\begin{aligned} Q &= X + \theta = X + (Q_{III} - X) = Q_{III}; \\ Q_{III} &= X_{III} + \theta_{III} = X_{III} + (Q_{II} - X_{III}) = Q_{II}; \\ Q_{II} &= X_{II} + \theta_{II} = X_{II} + (Q_I - X_{II}) = Q_I; \\ Q_I &= X_I + \theta_I = X_I + (Q_3 - X_I) = Q_3, \end{aligned}$$

где  $Q_3$  — случайное значение результата измерения, которое было бы получено при сравнении неизвестного размера с размером единицы, воспроизводимым эталоном. Воспроизводимый размер не вполне точно соответствует определению единицы по СТ

СЭВ 1052-78 или ГОСТ 8.417-81, что учитывается поправкой  $\theta_3$ , устанавливаемой при метрологической аттестации эталона. Поэтому

$$Q_3 = X_3 + \theta_3 = X_3 + (Q_0 - X_3) = Q_0,$$

где  $Q_0$  - случайное значение результата измерения, которое было бы получено при сравнении неизвестного размера с размером единицы, соответствующим определению. Таким образом, если при передаче информации о размере единицы правильно определены и учтены все поправки, то любое измерение действительно сводится к сравнению неизвестного размера с единицей, установленной стандартом, т. е. к выражению значения измеряемой физической величины в узаконенных единицах.

Эталоны недоступны специалистам на производстве, а средства измерений, какой бы фактической точностью они ни обладали, не могут быть аттестованы по более высокому классу точности, чем средства, с помощью которых они аттестуются. Между тем, на каждой ступени передачи информации о размере единицы точность теряется в 3 ... 5 раз (иногда в 1,25 ... 10 раз). Таким образом, при многоступенчатой передаче эталонная точность не доходит до потребителя. Поэтому для высокоточных средств измерений число ступеней может быть сокращено, вплоть до передачи им, информации о размерах единиц непосредственно от рабочих эталонов. В целом система, основанная только на централизованном воспроизведении единиц и передаче информации об их размерах средствам измерений громоздка, неудобна, дорога и малоэффективна. Ее содержание и совершенствование представляет сложную организационно-техническую и народнохозяйственную проблему. В будущем следует ожидать повышение роли децентрализованного воспроизведения единиц.

## ГЛАВА 5

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ НАД РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 5.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С ОДНИМ РЕЗУЛЬТАТОМ ИЗМЕРЕНИЯ

При математических действиях над результатами измерений нужно учитывать, что последние являются случайными значениями измеренных величин. Обращение с результатами измерений как с неслучайными значениями приводит к ошибкам. Некоторые из них будут рассмотрены на конкретных примерах.

Начнем с умножения результата измерения на постоянный множитель.

**Пример 30.** Удвоить результат измерения  $r$ , эмпирическое распределение вероятности числового значения которого представлено табл.17.

Таблица 17

$r$	$m$	$P$
3	20	0.2
4	50	0.5
5	30	0.3

**Решение.** Результатом умножения случайного числа  $r$  на 2 будет новое случайное число  $2r$ , распределение вероятности которого:

$2r$	$P$
6	0.2
8	0.5
10	0.3

Графически оно показано на рис. 57. Вероятность удвоенных по сравнению с  $r$  значений остается прежней. Оценки числовых характеристик теоретической модели эмпирического распределения вероятности, представленного табл.17,

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i = \frac{30 \cdot 20 + 40 \cdot 50 + 5 \cdot 30}{100} = 4.1;$$

$$S_r^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2 - \bar{r}^2 = \frac{9 \cdot 20 + 16 \cdot 50 + 25 \cdot 30}{100} - 16.8 = 0.5,$$

так как нет никаких оснований полагать, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности. Оценки числовых характеристик теоретической модели нового случайного числа

$$\bar{2r} = 8.2; S_{2r}^2 = 2,$$

следовательно

$$\bar{2r} = 2\bar{r}; S_{2r}^2 = 4S_r^2.$$

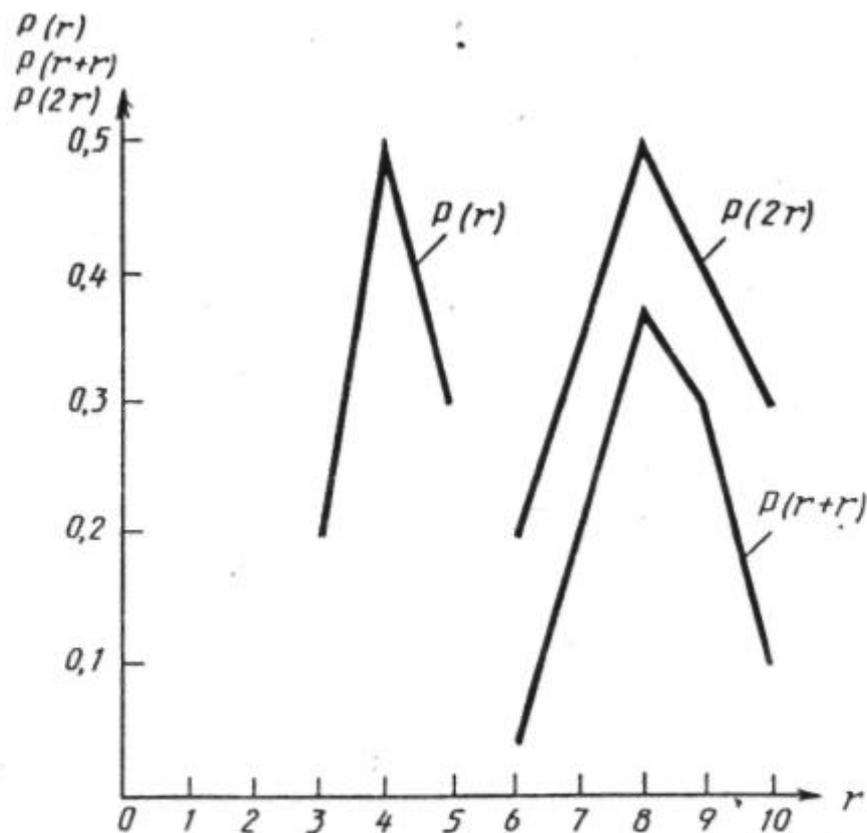


Рис. 57. Распределение вероятности  $P(r)$ ,  $P(2r)$  и  $P(r+r)$  в примерах 30 и 36

Таким образом для оценок справедливы свойства самих числовых характеристик (см. п. 3.2): среднее арифметическое произведения постоянного множителя  $a$  и результата измерения  $A$  равно произведению постоянного множителя и среднего арифметического результата измерения.

то есть, если

$$Q = aA,$$

то

$$\bar{Q} = a\bar{A}.$$

В равной мере стандартное отклонение произведения постоянного множителя  $a$  и результата измерения  $A$  равно произведению модуля постоянного множителя и

стандартного отклонения результата измерения:

$$S_Q = |a|S_A.$$

Теперь рассмотрим операцию возведения результата измерения в квадрат. Под квадратом результата измерения  $A$  понимается случайная величина

$$Q = A^2,$$

которая с вероятностями  $P_i$ , соответствующими значениям  $A_i$  принимает значения, равные  $Q_i$ .

**Пример 31.** Возвести в квадрат результат измерения, рассмотренный в предыдущем примере.

**Решение.** Распределение вероятности числовых значений  $r^2$  выглядит следующим образом:

$r^2$	$P$
9	0.2
16	0.5
25	0.3

Оценки числовых характеристик теоретической модели этого распределения вероятности,

$$\bar{r}^2 = 17.3; S_{r^2} = 5.7.$$

**Пример 32.** Определить площадь круга, распределение вероятности числовых значений радиуса которого представлено табл. 17.

**Решение.** Распределение вероятности числовых значений площади круга  $S = \pi r^2$  получаем, используя табл. 17:

$S$	$P$
28.3	0.2
50.3	0.5
78.5	0.3

Оценки числовых характеристик теоретической модели этого распределения вероятности

$$\bar{S} = 54.4; S_S = 17.7.$$

Стандартное отклонение среднего арифметического значения площади круга

$$S_S = 1.8.$$

Так как закон распределения вероятности  $s$  неизвестен, то на основании неравенства П.Л. Чебышева с вероятностью, больше чем 0,9,

$$\bar{s} - 3.2S_S \leq s \leq \bar{s} + 3.2S_S$$

Отсюда с вероятностью не менее 0,9

$$48.7 \leq s \leq 60.1.$$

Рассмотренные примеры показывают, что при функциональном преобразовании результата измерения

$$Q = f(A) \tag{14}$$

происходит трансформация его эмпирического закона распределения вероятности в соответствии с правилом

$$P(Q_i) = P(A_i).$$

Если результат измерения  $A$  задан теоретической моделью эмпирического закона распределения вероятности, то используется то, что интегральная функция распределения вероятности  $F(Q)$  представляет собой вероятность того, что

$$f(A) < Q.$$

Решение этого неравенства относительно  $A$  устанавливает пределы, в которых находится  $A$  с той же вероятностью. Последняя равна интегралу от плотности распределения вероятности  $p_A(A)$  в установленных пределах.

**Пример 33.** Определить трансформацию плотности распределения вероятности  $p_A(A)$  результата измерения  $A$  после линейного преобразования  $Q = aA + b$

**Решение.** 1.  $F(Q) = P\{aA + b < Q\}$ .

2. С вероятностью  $F(Q)$  результат измерения

$$A < \frac{Q-b}{a} \text{ при } a > 0;$$

$$A > \frac{Q-b}{a} \text{ при } a < 0.$$

Отсюда

$$F(Q) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\frac{Q-b}{a}} p_A(A) dA & \text{при } a > 0; \\ \int_{\frac{Q-b}{a}}^{\infty} p_A(A) dA & \text{при } a < 0. \end{cases}$$

3. После перестановки пределов в последнем интеграле и дифференцирования получаем:

$$p(Q) = \frac{1}{|a|} p_A\left(\frac{Q-b}{a}\right).$$

Таким образом, как это можно было заметить еще на примере 30, при линейном преобразовании результата измерения форма графика распределения вероятности не меняется, а происходит только его смещение по оси абсцисс и компрессия с сохранением площади под кривой, равной 1.

Результат, полученный в примере 33, применительно к любой монотонной функции (14) обобщается следующим образом:

$$p(Q) = \left| \frac{df^{-1}(Q)}{dF} \right| p_A[f^{-1}(Q)],$$

где  $f^{-1}$  — функция, обратная функции  $f$ . В примере 33  $f^{-1} = \frac{Q-b}{a}$ . Если  $f^{-1}$  — многозначная функция, то это отражается на пределах, в которых находится  $A$  с вероятностью  $F(Q)$ .

**Пример 34.** Определить трансформацию нормированного нормального закона распределения вероятности, которому подчиняется результат измерения  $A$ , после нелинейного преобразования  $Q = A^2$ .

**Решение.** 1.  $F(Q) = P\{A^2 < Q\}$ .

2. Пределы, в которых выполняется неравенство, устанавливаются функцией  $A = \pm\sqrt{Q}$ , обратной возведению  $A$  в квадрат (рис. 58). Поэтому

$$F(Q) = \int_{-\sqrt{Q}}^{\sqrt{Q}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{A^2}{2}} dA = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{Q}} e^{-\frac{A^2}{2}} dA - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-\sqrt{Q}} e^{-\frac{A^2}{2}} dA.$$

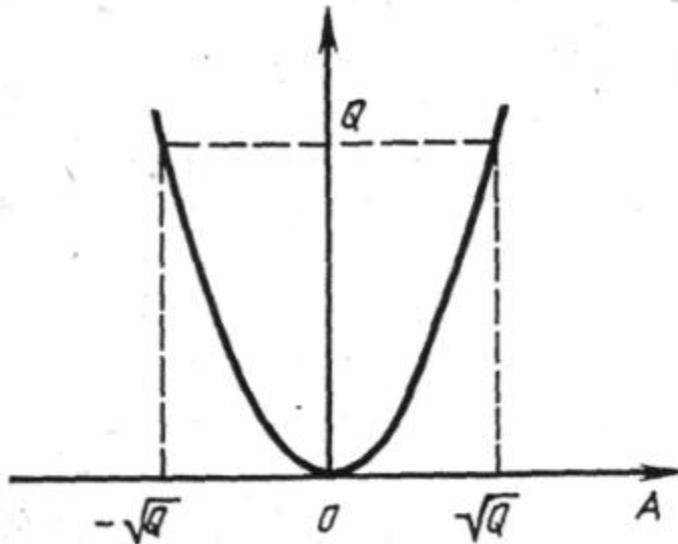


Рис. 58. Графическое решение уравнения, обратного возведению  $A$  в квадрат

3. После дифференцирования получаем

$$p(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Q}} e^{-\frac{Q}{2}}$$

Для сравнения графики плотности исходного и преобразованного распределения вероятности показаны на рис. 59.

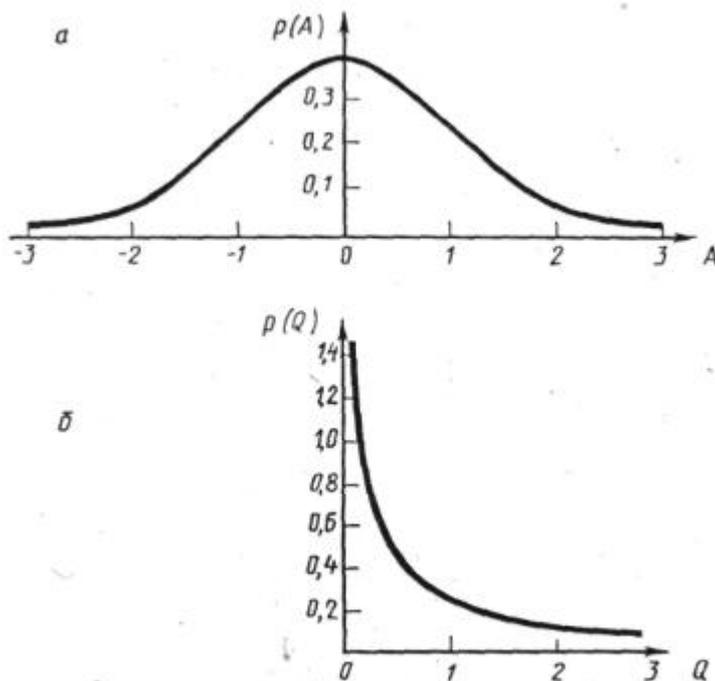


Рис. 59. Графики плотности распределения вероятности результата измерения, подчиняющегося нормированному нормальному закону (а) и квадрата этого результата измерения (б)

На практике преобразованиями законов распределения вероятности результатов измерений интересуются сравнительно редко. Обычно ограничиваются расчётами на уровне оценок числовых характеристик законов распределений.

**Пример 35.** По данным примера 30 определить числовое значение длины окружности  $l$  с радиусом  $r$ .

**Решение.** 1.  $\bar{l} = 2\pi\bar{r} = 25.7; S_l = 2\pi S_r = 4.4.$

2. Стандартное отклонение среднего арифметического значения длины окружности  $S_l = S_l / \sqrt{n} = 0.44.$

3. Согласно неравенству П. Л. Чебышева с вероятностью не менее 0,9  $24.3 \leq l \leq 27.1.$

## 5.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С НЕСКОЛЬКИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

Начнем со сложения результатов измерений.

**Пример 36.** Распределение вероятности числового значения результата измерения одной из сторон прямоугольника представлено табл. 17. Независимое измерение прилежащей стороны дало в точности такой же результат, т. е. прямоугольник является квадратом. Определить его полупериметр.

**Решение.** Полупериметр квадрата является величиной, значение которой равно сумме двух других значений  $r_1$  и  $r_2$ , каждое из которых задано распределением вероятности, представленным табл. 17. По условию  $r_1 = r_2 = r$ . При  $r_1 = 3$  второе слагаемое  $r_2$  может иметь любое из трех числовых значений, приведенных в табл. 17. Вероятность того, что  $r_1 + r_2 = 3 + 3 = 6$  равна  $0,2 \cdot 0,2 = 0,04$ ; вероятность того, что  $r_1 + r_2 = 3 + 4 = 7$  составляет  $0,2 \cdot 0,5 = 0,10$ ; вероятность того, что  $r_1 + r_2 = 3 + 5 = 8$  определяется таким же образом:  $0,2 \cdot 0,3 = 0,06$ . Аналогичные варианты возникают при  $r_1 = 4$  и  $r_1 = 5$ . Все они сведены в табл. 18.

Таблица 18

$r_1$	$r_2$	$r_1 + r_2$	$P = P_1 \cdot P_2$
3	3	6	$0,2 \cdot 0,2 = 0,04$
3	4	7	$0,2 \cdot 0,5 = 0,10$
3	5	8	$0,2 \cdot 0,3 = 0,06$
4	3	7	$0,5 \cdot 0,2 = 0,10$
4	4	8	$0,5 \cdot 0,5 = 0,25$
4	5	9	$0,5 \cdot 0,3 = 0,15$
5	3	8	$0,3 \cdot 0,2 = 0,06$
5	4	9	$0,3 \cdot 0,5 = 0,15$
5	5	10	$0,3 \cdot 0,3 = 0,09$

Из табл. 18 видно, что

$$P\{r_1 + r_2 = 6\} = 0.04;$$

$$P\{r_1 + r_2 = 7\} = 0.1 + 0.1 = 0.2;$$

$$P\{r_1 + r_2 = 8\} = 0.06 + 0.25 + 0.06 = 0.37;$$

$$P\{r_1 + r_2 = 9\} = 0.15 + 0.15 = 0.3;$$

$$P\{r_1 + r_2 = 10\} = 0.09.$$

Таким образом, числовое значение полупериметра как суммы значений двух прилежащих сторон, полученных путем независимого измерения последних, подчиняется следующему распределению вероятности

$$r_1 + r_2 \qquad P$$

11	0,04
12	0,20
13	0,37
14	0,30
15	0,09

На рис. 57 распределения вероятности числовых значений полупериметра и сторон квадрата представлены графически. Далее

$$\overline{r_1 + r_2} = \frac{6*4 + 7*20 + 8*37 + 9*30 + 10*9}{100} = 8.2;$$

$$S_{r_1+r_2}^2 = \frac{36*4 + 49*20 + 64*37 + 81*30 + 100*9}{100} - 67.24 = 1.$$

Таким образом для оценок, как и для самих числовых характеристик, среднее арифметическое суммы независимых результатов измерений

$$Q = A + B + \dots$$

равно сумме их средних арифметических:

$$\overline{Q} = \overline{A} + \overline{B} + \dots$$

а квадрат стандартного отклонения - сумме квадратов стандартных отклонений:

$$S_Q^2 = S_A^2 + S_B^2 + \dots$$

Стандартное отклонение среднего арифметического значения периметра

$$S_{\overline{r_1+r_2}} = \frac{S_{r_1+r_2}}{\sqrt{n}} = 0.1.$$

Согласно неравенству П. Л. Чебышева с вероятностью не менее 0,9

$$7.96 \leq r_1 + r_2 \leq 8.5$$

Пример 37. В табл. 19 приведено 100 независимых значений результата взвешивания консервированного продукта вместе со стеклянной банкой и крышкой  $m_\sigma$ -брутто, в табл. 20 - только банки и крышки (тары).

Таблица 19

$m_\sigma$ , кг	$m$	$P_\sigma$
3,98	30	0,3
4,00	50	0,5
4,03	10	0,1
4,04	10	0,1

Таблица 20

$m_T$ , кг	$m$	$P_T$
0,88	20	0,2
0,90	70	0,7
0,93	10	0,1

Определить массу консервированного продукта  $m_H$  - нетто.

**Решение.** Масса консервированного продукта  $m_H$  равна разности двух результатов измерений

$$m_H = m_\sigma - m_T$$

распределения вероятности которых заданы таблично. По тому же принципу, по которому составлена табл. 18, составим табл. 21.

Таблица 21

$m_{\delta}$ , кг	$m_{\tau}$ , кг	$m_H$ , кг	$P_H = P_{\delta} \cdot P_{\tau}$
3,98	0,88	3,10	$0,3 \cdot 0,2 = 0,06$
3,98	0,90	3,08	$0,3 \cdot 0,7 = 0,21$
3,98	0,93	3,05	$0,3 \cdot 0,1 = 0,03$
4,00	0,88	3,12	$0,5 \cdot 0,2 = 0,10$
4,00	0,90	3,10	$0,5 \cdot 0,7 = 0,35$
4,00	0,93	3,07	$0,5 \cdot 0,1 = 0,05$
4,03	0,88	3,15	$0,1 \cdot 0,2 = 0,02$
4,03	0,90	3,13	$0,1 \cdot 0,7 = 0,07$
4,03	0,93	3,10	$0,1 \cdot 0,1 = 0,01$
4,04	0,88	3,16	$0,1 \cdot 0,2 = 0,02$
4,04	0,90	3,14	$0,1 \cdot 0,7 = 0,07$
4,04	0,93	3,11	$0,1 \cdot 0,1 = 0,01$

По данным табл. 21 распределение вероятности массы консервированного продукта можно представить следующим образом:

$m_H$ , кг	$P_H$	$m_H$ , кг	$P_H$
3,05	0,03	3,12	0,10
3,07	0,05	3,13	0,07
3,08	0,21	3,14	0,07
3,10	0,42	3,15	0,02
3,11	0,01	3,16	0,02

или графически, как показано на рис. 60. Оценки числовых характеристик теоретической модели, соответствующей этому эмпирическому распределению вероятности

$$\overline{m_H} = 3,1 \text{ кг}; S_{m_H}^2 = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг}^2.$$

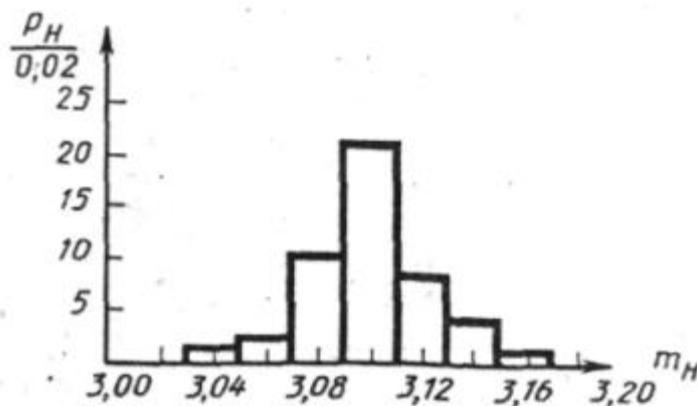


Рис. 60. Гистограмма распределения вероятности разности двух результатов измерений в примере 37

Так как эмпирическим распределениям вероятности, представленным табл. 19 и 20, соответствуют

$$\overline{m_{\delta}} = 4,0 \text{ кг}; S_{m_{\delta}}^2 = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ кг}^2,$$

$$\overline{m_{\tau}} = 0,9 \text{ кг}; S_{m_{\tau}}^2 = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ кг}^2,$$

то действительно среднее арифметическое разности независимых результатов измерений  $Q = A - B$

равно разности их средних арифметических:

$$\bar{Q} = \bar{A} - \bar{B}$$

а квадрат стандартного отклонения — сумме квадратов стандартных отклонений:

$$S_Q^2 = S_A^2 + S_B^2.$$

На этом основании, принимая во внимание, что

$$\bar{m}_\delta = 4,0 \text{ кг}; S_{m_\delta}^2 = \frac{S_{m_\delta}^2}{n} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг}^2,$$

$$\bar{m}_T = 0,9 \text{ кг}; S_{m_T}^2 = \frac{S_{m_T}^2}{n} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг}^2,$$

можно было бы получить

$$\bar{m}_H = \bar{m}_\delta - \bar{m}_T = 3,1 \text{ кг};$$

$$S_H^2 = S_{m_\delta}^2 + S_{m_T}^2 = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг}^2,$$

что соответствует результату, который вытекает непосредственно из оценок числовых характеристик теоретической модели эмпирического распределения вероятности, представленного на с. 151. Судя по гистограмме,  $m_H$  подчиняется нормальному закону распределения вероятности, (что можно проверить по критерию К. Пирсона).

Следовательно, нормальному закону подчиняется и  $\bar{m}_H$ . Поэтому с вероятностью 0,95 масса консервированного продукта

$$3,095 \text{ кг} \leq \bar{m}_H \leq 3,105 \text{ кг}.$$

Из сравнения распределений вероятности  $P(r+r)$  и  $P(2r)$  на рис. 57 и оценок дисперсий  $S_{r+r}^2$  и  $S_{2r}^2$  в примерах 36 и 30 видно, что

$$r + r \neq 2r$$

или в общем случае

$$\sum_{i=1}^n Q_i \neq nQ, \text{ где } Q_i = Q.$$

Игнорирование этого обстоятельства приводит к ошибкам. Например, с вероятностью 0,95 масса 10000 банок консервов, рассмотренных в примере 37, вычисленная по аддитивному алгоритму, составляет  $(40000 \pm \pm 0,4)$  кг, а по мультипликативному -  $(40000+40)$  кг. Нельзя рассчитывать по мультипликативному алгоритму электрическое сопротивление цепи, состоящей из нескольких одинаковых сопротивлений, соединенных последовательно между собой; суммарную электрическую емкость параллельного соединения нескольких одинаковых конденсаторов и т. д., если числовые значения соответствующих величин заданы или определены как случайные числа. В равной мере нельзя заменить суммированием умножение случайного числа на неслучайный постоянный множитель. Например, вес товарной партии консервов, рассмотренной выше, с вероятностью 0,95 составляет примерно  $(4 \cdot 10^5 \pm 4)$  Н, а не  $(4 \cdot 10^5 \pm 1)$  Н.

Закон распределения вероятности суммы независимых результатов измерений называется композицией законов распределения вероятности слагаемых. Для определения композиции различных законов распределения вероятности результатов измерений широко используется метод характеристических функций.

Характеристической функцией случайной величины  $Q$  называется математическое ожидание случайной величины  $e^{jwQ}$ , где  $w$  - неслучайный параметр. Если  $Q$  - сумма независимых результатов измерений  $A, B, \dots$ , то

$$M(e^{jwQ}) = M(e^{jwA} \cdot e^{jwB} \cdot \dots),$$

где сомножители так же независимы, как и результаты измерений. Поэтому

$$M(e^{jwQ}) = M(e^{jwA}) \cdot M(e^{jwB}) \cdot \dots$$

Если характеристическую функцию определить как спектр плотности распределения вероятности результата измерения:

$$M(e^{-jwQ}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jwQ} p_Q(Q) dQ = p_Q^*(w),$$

то

$$p_Q^*(w) = p_A^*(w) \cdot p_B^*(w) \cdot \dots,$$

т. е. спектр плотности распределения вероятности суммы независимых результатов измерений равен произведению спектров плотности распределения вероятности слагаемых. Плотность распределения вероятности композиции нескольких законов распределения независимых результатов измерений находится обратным преобразованием Фурье:

$$p_Q(Q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p_Q^*(w) e^{jwQ} dw.$$

Пользуясь методом характеристических функций, можно показать, что композицией одинаковых равномерных законов распределения вероятности, которым подчиняются два независимых результата измерений, является треугольный закон (рис. 61), называемый законом распределения вероятности Симпсона. Композицией двух равномерных законов распределения вероятности независимых результатов измерений с неодинаковым

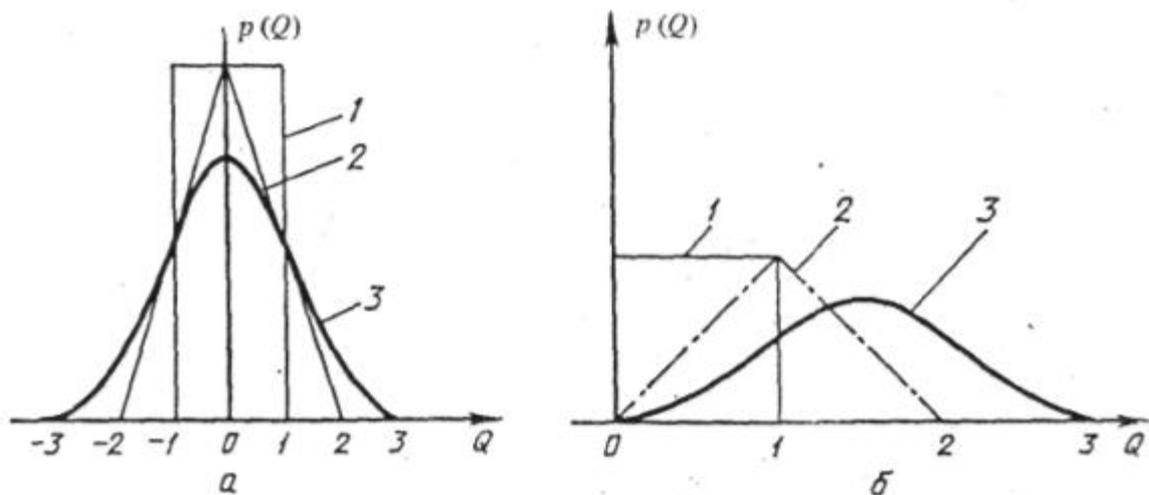


Рис. 61. Равномерная плотность распределения вероятности результата измерения (1) и плотность распределения вероятности композиции двух (2) и трех (3) таких законов распределения вероятности (а – при  $\bar{Q} = 0$ ; б – при  $\bar{Q} = 0,5$ )

размахом является трапециевидальный закон. Это обстоятельство часто используется при учете дефицита информации. Рассматривая произведение большого числа характеристических функций, можно убедиться в том, что независимо от вида сомножителей оно стремится к характеристической функции, соответствующей нормальному закону распределения вероятности. Это фундаментальное положение носит название центральной предельной теоремы. На рис. 61 видно, как быстро нормализуется композиция одинаковых равномерных законов распределения вероятности. При числе слагаемых больше 4-х уже можно считать, что она практически подчиняется нормальному закону.

На практике с распределениями вероятности результатов измерений оперируют только при очень точных вычислениях. Обычно ограничиваются расчетами на уровне

оценок числовых характеристик.

**Пример 38.** При однократном взвешивании продукта в таре, рассмотренной в примере 37, на противоположную чашу настольных циферблатных весов поставлены две гири по  $(2 \pm 0,01)$  кг. Стрелочный указатель весов остановился на отметке шкалы 300 г. Определить массу продукта  $m_H$ , если известно, что показание весов подчиняется нормальному закону распределения вероятности со средним квадратическим отклонением 5 г.

**Решение.** 1. По стрелочному указателю (без учета массы гирь и тары) масса продукта с вероятностью 0,95 находится в пределах  $(300 \pm 10)$  г. Представим эту ситуацию равномерным законом распределения вероятности на интервале от 290 до 310 г со средним значением и аналогом дисперсии, равными соответственно

$$\bar{m} = 300 \text{ г};$$

$$u_m^2 = \frac{10^2}{3} = 33,3 \text{ г}^2.$$

2. Чему равна масса каждой гири в интервале от 1,99 кг до 2,01 кг неизвестно. Представим и эту ситуацию математической моделью в виде равномерного закона распределения вероятности на интервале от 1,99 кг до 2,01 кг со средним значением и аналогом дисперсии

$$\bar{m}_g = 2 \cdot 10^3 \text{ г};$$

$$u_{m_g}^2 = 33,3 \text{ г}^2.$$

3. С учетом массы гирь и тары масса продукта будет представлена математической моделью в виде закона распределения вероятности со средним значением и аналогом дисперсии

$$\bar{m}_H = \bar{m} + \bar{m}_g + \bar{m}_g - \bar{m}_g;$$

$$u_{m_H}^2 = u_m^2 + u_{m_g}^2 + u_{m_g}^2 + S_{m_g}^2.$$

В данном случае неслучайное значение массы продукта  $m_H \neq \bar{m}_H$  г. к. ситуационная модель не подчиняется статистическим закономерностям, а учитывает недостаток (дефицит) информации. В соответствии с рекомендацией Международного комитета мер и весов (см. разд. 3.5) примем

$$\bar{m}_H - k u_{m_H} \leq m_H \leq \bar{m}_H + k u_{m_H}$$

где значение коэффициента  $k$  устанавливается по соглашению. Положив, как и раньше,  $k = 2$  и проведя вычисление

$$\bar{m}_H = \sqrt{33,3 + 33,3 + 33,3 + 170} \text{ г}.$$

Получим

$$3,38 \text{ кг} \leq m_H \leq 3,42 \text{ кг}.$$

Подобные вычисления широко используются при внесении аддитивных поправок, точные значения которых неизвестны.

Умножение двух результатов измерений один на другой рассмотрим на примере, когда они равны между собой.

**Пример 39.** Определить площадь квадрата по данным, приведенным в примере 36.

**Решение.** Площадь квадрата  $s$  равна произведению его сторон

$$s = r_1 \cdot r_2,$$

распределение вероятности числовых значений каждой из которых представлено табл. 17. По тому же принципу, по которому составлены табл. 18 и 21, составим табл. 22.

$r_1$	$r_2$	$s$	$P = P_1 \cdot P_2$
3	3	9	$0,2 \cdot 0,2 = 0,04$
3	4	12	$0,2 \cdot 0,5 = 0,10$
3	5	15	$0,2 \cdot 0,3 = 0,06$
4	3	12	$0,5 \cdot 0,2 = 0,10$
4	4	16	$0,5 \cdot 0,5 = 0,25$
4	5	20	$0,5 \cdot 0,3 = 0,15$
5	3	15	$0,3 \cdot 0,2 = 0,06$
5	4	20	$0,3 \cdot 0,5 = 0,15$
5	5	25	$0,3 \cdot 0,3 = 0,09$

Используя данные табл. 22, распределение вероятности площади квадрата можно представить следующим образом:

$s$	$P$	$s$	$P$
9	0,04	16	0,25
12	0,20	20	0,30
15	0,12	25	0,09

среднего значения теоретической модели, этого эмпирического распределения

$$\bar{S} = 16,8.$$

а стандартное отклонение

$$S_s = 4,1.$$

Сравнивая этот результат с результатом, полученным в примере 31, убеждаемся, что

$$r \cdot r \neq r^2,$$

или в общем случае

$$\prod_{i=1}^n Q_i \neq Q^n,$$

Игнорирование этого обстоятельства приводит к еще более серьезным ошибкам, чем при замене аддитивного алгоритма мультипликативным, или наоборот.

Стандартное отклонение среднего арифметического значения площади квадрата

$$S_s = 0,41.$$

Так как закон распределения вероятности среднего арифметического неизвестен, воспользуемся неравенством П.Л. Чебышева: с вероятностью не менее 0,9

$$16,5 \leq S \leq 17,1.$$

$$\text{где } Q_i = Q.$$

Сопоставляя результат, полученный в последнем примере, с исходными данными в примере 30, видим, что оценки математических ожиданий обладают таким же свойством, как и сами математические ожидания: среднее арифметическое произведения нескольких независимых результатов измерений равно произведению их средних арифметических

$$\bar{Q} = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \dots$$

Характеристика рассеяния произведения связана с характеристиками рассеяния множителей более сложной зависимостью, которая будет рассмотрена позже.

На основании рассмотренных примеров 36, 37, и 39 можно заключить, что если

$$Q = f(A, B, \dots),$$

где независимые результаты измерений  $A, B, \dots$  заданы эмпирическими законами распределения вероятности, полученными с помощью цифровых измерительных

приборов, то распределение вероятности

$$P(Q_K) = \sum P(A_i) \cdot P(B_i) \dots,$$

$$Q_K = f(A_i, B_j, \dots)$$

где суммируются только те произведения  $P(A_i)P(B_i) \dots$ , для которых

$$Q_K = f(A_i, B_j, \dots) = Q_K.$$

Если результаты измерений  $A, B, \dots$  заданы теоретическими моделями эмпирических законов распределения вероятности, то следует опять-таки воспользоваться тем, что интегральная функция распределения вероятности  $F(Q)$  представляет собой вероятность того, что

$$f(A, B, \dots) < Q.$$

Это неравенство в многомерном пространстве выполняется для всех точек с координатами  $A, B, \dots$ , геометрическим местом которых является область  $G$ , ограниченная гиперповерхностью

$$f(A, B, \dots) = Q.$$

Поэтому через плотность совместного распределения вероятности результатов измерений  $p(A, B, \dots)$  интересующая нас вероятность выражается следующим образом:

$$F(Q) = \int \dots \int_G p(A, B, \dots) dA dB \dots$$

Если результаты измерений  $A, B, \dots$ , независимы, то

$$F(Q) = \int \dots \int_G p_A(A) p_B(B) \dots dA dB \dots \quad (15)$$

**Пример 40.** Найти плотность распределения вероятности суммы двух независимых результатов измерений  $A$  и  $B$ , первый из которых подчиняется нормированному нормальному закону, а второй - равномерному закону распределения вероятности на интервале  $(-1, 1)$ .

**Решение.** 1. Интегральная функция распределения вероятности  $F(Q)$  композиции двух рассматриваемых в примере законов представляет собой вероятность того что

$$A + B < Q.$$

Это неравенство, выполняется для всех точек с координатами  $(A, B)$ , геометрическим местом которых является область  $G$ , представляющая собой полуплоскость, лежащую ниже прямой  $A + B = Q$  (рис. 62).

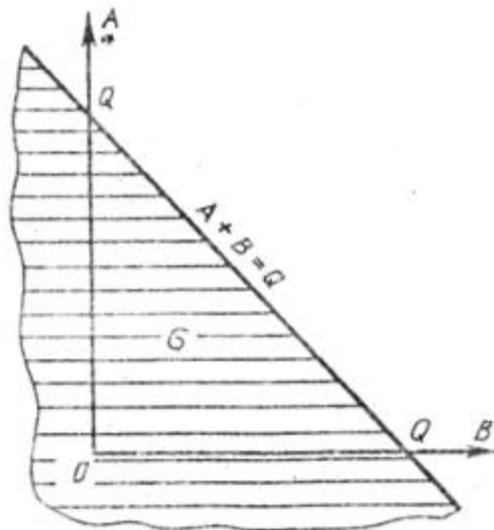


Рис. 62. Графическое решение неравенства  $A + B < Q$  в примере 40

2. Выполняя в (15) интегрирование сначала по  $B$  (при постоянном  $A$ ), а затем по  $A$  (или в обратном порядке) получим:

$$F(Q) = \int_{-\infty}^{\infty} p_A(A) dA \int_{-\infty}^{Q-A} p_B(B) dB = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(B) dB \int_{-\infty}^{Q-B} p_A(A) dA$$

Отсюда плотность распределения вероятности суммы двух независимых результатов измерений

$$p_Q(Q) = \frac{dF(Q)}{dQ} = \int_{-\infty}^{\infty} p_A(A) p_B(Q-A) dA = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(B) p_A(Q-B) dB.$$

3. Так как в рассматриваемом примере  $p_B(B) \neq 0$  лишь в промежутке  $(-1, 1)$ , то

$$p_Q(Q) = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(B) p_A(Q-B) dB = \int_{-1}^1 \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-B)^2}{2}} dB.$$

Подстановкой  $B = Q + v$ ;  $dB = dv$  последний интеграл приводится к виду:

$$p_Q(Q) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \int_{-(1+Q)}^{1-Q} e^{-\frac{1}{2}v^2} dv = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{1-Q} e^{-\frac{1}{2}v^2} dv - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-(1+Q)} e^{-\frac{1}{2}v^2} dv \right).$$

Отсюда

$$p_Q(Q) = \frac{1}{2} [L(1-Q) - L(-1-Q)] = \frac{1}{2} [L(1-Q) + L(1+Q)],$$

где  $L$  - функция Лапласа. График плотности распределения вероятности композиции нормированного нормального и равномерного на интервале  $(-1, 1)$  законов распределения вероятности независимых результатов измерений показан на рис. 63.

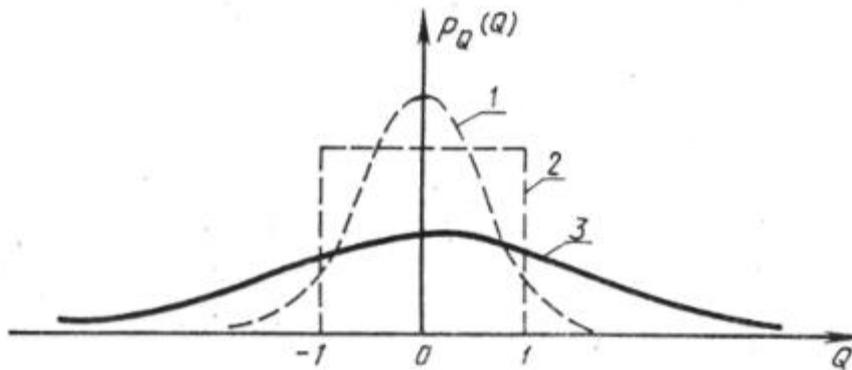


Рис. 63. График плотности распределения вероятности (3) композиции нормированного нормального (1) и равномерного (2) законов распределения

Любые математические операции над результатами измерений связаны с преобразованиями их законов распределения вероятности. При сложных функциях большого числа результатов измерений это сопряжено с преодолением значительных технических трудностей. Поэтому в таких случаях часто ограничиваются приближенными вычислениями на уровне оценок числовых характеристик.

Пусть, например,

$$Q = f(A, B),$$

где  $A$  и  $B$  по-прежнему некоторые результаты измерений. Вводя в рассмотрение показания и поправки, можем написать:

$$A = X + \theta_x; B = Y + \theta_y; Q = Z + \theta_z.$$

где поправки будем для простоты считать известными точно постоянными величинами, а

$$X = \bar{X} + \delta_x; Y = \bar{Y} + \delta_y; Z = \bar{Z} + \delta_z.$$

$$\bar{Z} + \theta_z + \delta_z = f(\bar{X} + \theta_x + \delta_x; \bar{Y} + \theta_y + \delta_y)$$

Идея приближенных вычислений состоит в том, что сложную функцию представляют рядом, в котором ограничиваются первыми членами разложения. В данном случае, считая поправки и случайные отклонения от средних значений, малыми по сравнению с  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$ , разложим функцию  $f$  в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} \bar{Z} + \theta_z + \delta_z = f(\bar{X}, \bar{Y}) + \frac{\partial f}{\partial X}(\theta_x + \delta_x) + \frac{\partial f}{\partial Y}(\theta_y + \delta_y) + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2}(\theta_x + \delta_x)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2}(\theta_y + \delta_y)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

Первые слагаемые в правой и левой частях этого выражения не зависят от поправок и случайных отклонений от средних значений. Поэтому

$$\bar{Z} = f(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (17)$$

Как обычно, вместе средних значений  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  могут быть использованы лишь их оценки. Это позволит получить оценку  $\bar{Z}$ , дисперсия которой будет минимальной, если из всех возможных оценок  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  будут выбраны имеющие наименьшую дисперсию. Таковыми являются средние арифметические показаний средств измерений. Поэтому эффективная оценка  $\bar{Z}$  получается в результате подстановки в формулу (17) средних арифметических:

$$\bar{Z} = f(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (18)$$

Для определения поправки  $\theta_z$  вычтем уравнение (17) из уравнения (16):

$$\theta_z + \delta_z = \frac{\partial f}{\partial X}(\theta_x + \delta_x) + \frac{\partial f}{\partial Y}(\theta_y + \delta_y) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2}(\theta_x + \delta_x)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2}(\theta_y + \delta_y)^2 + \dots \quad (19)$$

и усредним левую и правую части получившегося выражения:

$$\begin{aligned} \theta_z = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} (\overline{(\theta_x + \delta_x)^2}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} (\overline{(\theta_y + \delta_y)^2}) + \dots = \\ = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \theta_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \sigma_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \sigma_y^2 + \dots \end{aligned} \quad (20)$$

Отсюда видно, что даже если  $\theta_x = \theta_y = 0$ , все равно может возникнуть необходимость во внесении поправки

$$\theta_z \approx \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \sigma_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \sigma_y^2,$$

если только ею нельзя пренебречь. Возникновение  $\theta$  поправки на неточность вычислений, объясняемое наличием квадратичных членов разложения, является важной особенностью приближенных вычислений на уровне оценок числовых характеристик.

Вычтем теперь уравнение (20) из уравнения (19), ограничившись линейными членами разложения. Получим

$$\delta_z = \frac{\partial f}{\partial X} \delta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \delta_y.$$

Усреднение квадрата левой и правой частей этого выражения позволяет найти приближенное значение дисперсии результата функционального преобразования:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 = \overline{\delta_z^2} = \overline{\left( \frac{\partial f}{\partial X} \delta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \delta_y \right)^2} = \\ = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 \sigma_x^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \overline{\delta_x \delta_y} + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 \sigma_y^2 = \\ = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 \sigma_x^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} R + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 \sigma_y^2 \end{aligned}$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — средние квадратические отклонения результатов измерений А и В; R — центральный момент второго порядка совместного распределения случайных значений А и В.

Общее правило образования центральных моментов совместного распределения двух случайных чисел  $x$  и  $y$ :

$$\overline{(x - \bar{x})^{r-k} (y - \bar{y})^k} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^{r-k} (y - \bar{y})^k p(x, y) dx dy, r > k,$$

где  $r$  — номер или порядок момента. Смешанный момент второго порядка

$$R = \overline{(x - \bar{x})(y - \bar{y})} = \overline{\delta_x \delta_y}$$

называется корреляционным и служит мерой линейной статистической связи между двумя случайными числами, которая в отличие от функциональной, указывает на то, что по каким-то причинам случайные числа обнаруживают тенденцию к синхронному изменению, причем не обязательно в одном направлении. Например, увеличение случайных значений  $x$  сопровождается и некоторым увеличением (рис. 64, а, или наоборот уменьшением — рис. 64, б) случайных значений  $y$ . Обычно это бывает следствием влияния какого-то общего фактора, например, изменения температуры в помещении, где проводятся измерения, или падения напряжения в сети питания и т. п. В первом случае корреляционный момент больше нуля, и говорят о положительной корреляции между случайными числами, во втором — об отрицательной корреляции. Наконец, если в значениях, принимаемых случайными числами, не усматривается никакой статистической связи, их корреляционный момент равен нулю. Такие случайные числа считаются независимыми — рис. 64, в. Обратное утверждение о том, что при  $R = 0$  случайные числа или величины независимы, неверно. Так, корреляционный момент случайных величин А и Q в примере 34

$$R = \overline{(x - \bar{x})(y - \bar{y})} = \overline{A(A^2 - \bar{A}^2)} = \mu\sigma_A^3 - \bar{A}\sigma_A^2 = 0,$$

поскольку для симметричных распределений асимметрия  $\mu$  равна нулю, однако эти величины связаны между собой зависимостью  $Q=A^2$ . Только в частном случае, когда случайные числа или величины подчиняются нормальному закону распределения вероятности, выполнение условия  $R=0$  означает их независимость.

На практике вместо смешанного центрального момента второго порядка может быть вычислена лишь его оценка

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x}\bar{y}.$$

Переходя в выражениях (20) и (21) к оценкам, получим:

$$\theta_z = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \theta_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} S_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} S_y^2 + \dots;$$

$$S_z^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 S_x^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 S_y^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \bar{R};$$

$$S_z = \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 S_x^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 S_y^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \bar{R}}$$

где частные производные называются функциями влияния.

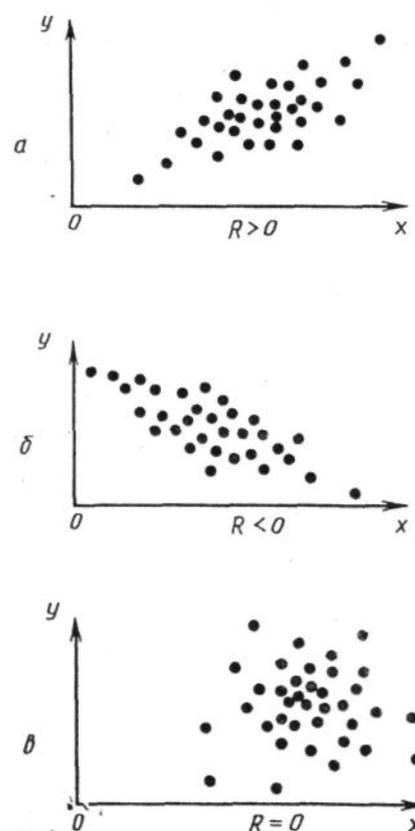


Рис. 64. Варианты статистической связи между двумя случайными числами.

В случае большого числа независимых результатов измерений

$$S_z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^2 S_y^2 + \dots} \quad (22)$$

**Пример 41.** Найти стандартное отклонение площади квадрата в примере 39 по формуле (22).

**Решение.** Так как  $s = r_1 r_2$  то  $\frac{\partial s}{\partial r_1} = r_2$ ;  $\frac{\partial s}{\partial r_2} = r_1$ . Используя вместо  $r_1$  и  $r_2$

их средние арифметические  $\bar{r}_1 = \bar{r}_2 = \bar{r}$ , получим

$$S_s = \sqrt{\bar{r}^2 S_r^2 + \bar{r}^2 S_r^2} = \bar{r} S_r \sqrt{2}.$$

Числовые значения  $\bar{r}$  и  $S_r^2$  вычислены в примере 30. Подставляя их, найдем

$$S_s = 4.1,$$

что соответствует ранее полученному результату.

**Пример 42.** Решить пример 31 методом приближенных вычислений на уровне оценок числовых характеристик.

**Решение.** 1. Согласно выражению (18),

$$\bar{r}^2 = \bar{r}^2 = 4.1^2 = 16.8.$$

Поправка на неточность этого значения

$$\theta_{r^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} r^2 \right) S_r^2 = S_r^2 = 0.5,$$

откуда окончательно

$$\bar{r}^2 = 16.8 + 0.5 \approx 17.3,$$

что соответствует результату, полученному в примере 31.

2. По формуле (22)

$$S_{r^2} = \sqrt{\left( \frac{\partial r^2}{\partial r} S_r \right)^2} = \sqrt{4r^2 S_r^2} = 2r S_r = 5.77,$$

где расхождение в последнем знаке с результатом, полученным в примере 31, свидетельствует о приближенном характере вычислений.

**Пример 43.** С какой скоростью должно вращаться тело в примере 1, чтобы центробежная сила равнялась 2Н? Результаты измерения массы тела и радиуса окружности (в метрах) приведены в табл. 20 и 17.

**Решение.** 1. На основании решения примера 1

$$v = \sqrt{\frac{rF}{m_T}}.$$

2. Согласно формуле (18)

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{\bar{r}F}{\bar{m}_T}} = \sqrt{\frac{4.1 \cdot 2}{0.9}} = 3.02 \text{ м/сек.}$$

Поправка, компенсирующая неточность вычисления этого значения,

$$\theta_v = -\frac{1}{8} \sqrt{\frac{F}{\bar{m}_T \bar{r}}} S_r^2 - \frac{1}{8} \sqrt{\frac{\bar{r}}{\bar{m}_T F^3}} S_F^2 + \frac{3}{8} \sqrt{\frac{\bar{r}F}{\bar{m}_T}} S_{m_T}^2 = -0.01 \text{ м/сек.}$$

так как  $S_r^2 = 0,5 \text{ м}^2$ ;  $S_F^2 = 0$ ;  $S_{m_T}^2 = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$ . Следовательно,

$$\bar{v} = 3.01 \text{ м/сек}$$

3. По формуле (22)

$$S_v = \sqrt{\frac{1}{4} \frac{F}{m_T r} S_r^2 + \frac{1}{4} \frac{r}{m_T F^3} S_F^2 + \frac{1}{4} \frac{rF}{m_T} S_{m_T}^2} = 0.26 \text{ м/сек.}$$

4. Стандартное отклонение  $\bar{v}$

$$S_v = 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ м/сек.}$$

Поскольку закон распределения вероятности  $\bar{v}$  неизвестен, то на основании неравенства П.Л. Чебышева с вероятностью, большей 0,9  
 $2.9 \text{ м/сек} \leq v \leq 3.1 \text{ м/сек.}$

### 5.3. РЕШЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Наиболее общим случаем функционального преобразования результатов измерений является преобразование одной многомерной величины, изображаемой точкой с координатами  $A, B, C, \dots$  в  $n$ -мерном пространстве, в другую многомерную величину-  $Q$ , изображаемую точкой с координатами  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  в  $m$ -мерном пространстве. Результаты измерений  $A, B, C, \dots$  образуют одну систему случайных значений, а координаты  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  — другую, причем  $m \leq n$ .

Многомерная интегральная функция распределения вероятности системы случайных значений  $F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$  в рассматриваемом случае представляет собой вероятность того, что

$$f_1(A, B, C, \dots) < Q_1;$$

$$f_2(A, B, C, \dots) < Q_2;$$

.....

$$f_m(A, B, C, \dots) < Q_m;$$

Совокупность этих неравенств определяет некоторую область  $G$  в  $m$ -мерном пространстве, причем ни одно из неравенств не нарушается, если точки с координатами  $A, B, C, \dots$  находятся в пределах этой области. Вероятность последнего

$$F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \int \dots \int_G p(A, B, C, \dots) dA dB dC \dots$$

Если результаты измерений независимы, то

$$F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \int \dots \int_G p_A(A) p_B(B) p_C(C) \dots dA dB dC \dots$$

Плотность распределения вероятности системы случайных значений

$$p(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \frac{\partial^m F}{\partial Q_1 \dots \partial Q_m}.$$

На практике иногда представляет интерес вероятностно-статистическое описание каждого из значений  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  в отдельности. Эта задача решается путем интегрирования  $F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$  по остальным переменным. В то же время, преобразование одной системы случайных значений  $(A, B, C, \dots)$  в другую  $(Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$  может быть представлено совокупностью уравнений

$$f_1(A, B, C, \dots) = Q_1;$$

$$f_2(A, B, C, \dots) = Q_2;$$

.....

$$f_m(A, B, C, \dots) = Q_m,$$

не предполагающей их совместного решения. Каждое из этих уравнений, называемых

совокупными, решается методами, рассмотренными в разд. 5.2.

Если совокупные уравнения являются линейными, то преобразование одной системы случайных значений в другую может быть представлено в матричной форме, например,

$$\begin{array}{l} Q_1 \\ Q_2 \\ 0 \end{array} \left| \begin{array}{ccc} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \cdot \begin{array}{l} A \\ B \\ C \end{array},$$

где  $d_{ij}$  — коэффициенты в совокупных уравнениях.

Принципиально другим является случай, когда требуется определить значения  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ , связанные со значениями  $A, B, \dots$ , определяемыми посредством измерений, системой линейных уравнений

$$\begin{cases} f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_m, A, B, \dots) = 0; \\ f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_m, A, B, \dots) = 0; \\ \dots \\ f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_m, A, B, \dots) = 0, \end{cases}$$

предполагающей их совместное решение. После подстановки в эти уравнения, называемые совместными, полученных экспериментально значений  $A, B, \dots$  они принимают вид:

$$\begin{cases} f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = 0; \\ f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = 0; \\ \dots \\ f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = 0, \end{cases}$$

где знак равенства носит уже чисто условный характер, т. к. коэффициенты, входящие в эти уравнения, выражены через результаты измерений, не равные в точности значениям  $A, B, \dots$ . Поэтому эти уравнения называются условными. Идея их решения методом наименьших квадратов принадлежит Гауссу.

Если в условные уравнения ввести поправки  $\theta_i$ , обращающие их в строгие тождества и называемые в данном случае невязками, то метод наименьших квадратов будет состоять в том, чтобы найти такие оценки  $\overline{Q_1}, \overline{Q_2}, \dots, \overline{Q_m}$ , значений  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ , при которых сумма квадратов невязок была бы минимальной, т. е. в уравнениях

$$\begin{cases} f_1(\overline{Q_1}, \overline{Q_2}, \dots, \overline{Q_m}) + \theta_1 = 0; \\ f_2(\overline{Q_1}, \overline{Q_2}, \dots, \overline{Q_m}) + \theta_2 = 0; \\ \dots \\ f_n(\overline{Q_1}, \overline{Q_2}, \dots, \overline{Q_m}) + \theta_n = 0, \end{cases}$$

величины  $\theta_i$  удовлетворяли бы условию

$$\sum_{i=1}^n \theta_i^2 = \min.$$

Так как

$$\theta_i = f_i(\overline{Q_1}, \overline{Q_2}, \dots, \overline{Q_m})$$

то требование минимизации суммы квадратов невязок можно записать следующим образом\*:

$$\sum_{i=1}^n \theta^2_i = \sum_{i=1}^n f^2_i(\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_m) = \min.$$

Функция нескольких переменных  $f^2_i$  достигает минимума в точке, где все ее частные производные равны нулю. Поэтому оценки интересующих нас значений находятся в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial Q_1} = 0; \\ \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial Q_2} = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial f_i}{\partial Q_m} = 0. \end{cases}$$

\* Если условные уравнения неравноценны, то каждое из них берется со своим весом  $g_j$ . В этом случае минимизируется

$$\sum_{i=1}^n g_i^2 \theta_i^2 = \sum_{i=1}^n g_i^2 f_i^2(\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_m) = \min.$$

Порядок дальнейших расчетов не меняется.

Веса условных уравнений выбираются обратно пропорциональными их дисперсиям, но так, чтобы

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1.$$

Обозначим коэффициенты при неизвестных в условных уравнениях через  $q_{ij}$ , а свободный член через  $l_i$ . Тогда последние уравнения можно будет представить в виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (q_{i1} \bar{Q}_1 + q_{i2} \bar{Q}_2 + \dots + q_{im} \bar{Q}_m - l_i) q_{i1} = 0; \\ \sum_{i=1}^n (q_{i1} \bar{Q}_1 + q_{i2} \bar{Q}_2 + \dots + q_{im} \bar{Q}_m - l_i) q_{i2} = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^n (q_{i1} \bar{Q}_1 + q_{i2} \bar{Q}_2 + \dots + q_{im} \bar{Q}_m - l_i) q_{im} = 0. \end{cases}$$

Раскрыв в них скобки, получим систему так называемых нормальных уравнений

$$\begin{cases} \bar{Q}_1 \sum_{i=1}^n q_{i1} q_{i1} + \bar{Q}_2 \sum_{i=1}^n q_{i1} q_{i2} + \dots + \bar{Q}_m \sum_{i=1}^n q_{i1} q_{im} = \sum_{i=1}^n q_{i1} l_i; \\ \bar{Q}_1 \sum_{i=1}^n q_{i2} q_{i1} + \bar{Q}_2 \sum_{i=1}^n q_{i2} q_{i2} + \dots + \bar{Q}_m \sum_{i=1}^n q_{i2} q_{im} = \sum_{i=1}^n q_{i2} l_i; \\ \dots\dots\dots \\ \bar{Q}_1 \sum_{i=1}^n q_{im} q_{i1} + \bar{Q}_2 \sum_{i=1}^n q_{im} q_{i2} + \dots + \bar{Q}_m \sum_{i=1}^n q_{im} q_{im} = \sum_{i=1}^n q_{im} l_i; \\ \sum_{i=1}^n (q_{i1} \bar{Q}_1 + q_{i2} \bar{Q}_2 + \dots + q_{im} \bar{Q}_m - l_i) q_{im} = 0. \end{cases}$$

которая будет более обозримой, если суммирование по  $i$  обозначить квадратными скобками. При таком обозначении, введенном Гауссом,



$$\begin{cases} \bar{m}_\sigma - 3,98 + \theta_1 = 0; \\ \bar{m}_T - 0,9 + \theta_2 = 0; \\ \bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3,12 + \theta_3 = 0; \\ \bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4,96 + \theta_4 = 0. \end{cases}$$

3. Суммирование произведений каждой функции  $f_i$  на ее производную по первой переменной  $\bar{m}_\sigma$  дает

$$(\bar{m}_\sigma - 3,98) \cdot 1 + 0 + (\bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3,12) \cdot 1 + (\bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4,96) \cdot 1 = 0,$$

по второй ( $\bar{m}_T$ ) —

$$0 + (\bar{m}_T - 0,9) \cdot 1 - (\bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3,12) \cdot 1 + (\bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4,96) \cdot 1 = 0,$$

Таким образом, система нормальных уравнений имеет вид:

$$3\bar{m}_\sigma + 0 = 12,06;$$

$$0 + 3\bar{m}_T = 2,74.$$

4. Каждое из полученных нормальных уравнений дает значение одной из искомым оценок, но, следуя общей схеме расчетов, напомним

$$\bar{m}_\sigma = \frac{\begin{vmatrix} 12,06 & 0 \\ 2,74 & 3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{vmatrix}} = \frac{36,18}{9} = 4,02; \bar{m}_T = \frac{\begin{vmatrix} 3 & 12,06 \\ 0 & 2,74 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{vmatrix}} = \frac{8,22}{9} = 0,91.$$

5. При таких значениях оценок невязки

$$\theta_1 = -0,04; \theta_2 = -0,01; \theta_3 = 0,01; \theta_4 = 0,03,$$

а сумма их квадратов

$$\sum_{i=1}^n \theta_i^2 = 0,0016 + 0,0001 + 0,0001 + 0,0009 = 0,0027.$$

6. Стандартное отклонение первой оценки

$$S_{\bar{m}_\sigma} = \sqrt{\frac{1}{4-2} \cdot \frac{3}{9} \cdot 0,0027} = 0,02,$$

второй —

$$S_{\bar{m}_T} = \sqrt{\frac{1}{4-2} \cdot \frac{3}{9} \cdot 0,0027} = 0,02.$$

7. На основании неравенства П. Л. Чебышева с вероятностью не менее 0,9

$$3,96 \leq \bar{m}_\sigma \leq 4,08 \text{ кг};$$

$$0,85 \leq \bar{m}_T \leq 0,97 \text{ кг}.$$

8. Рассмотрим теперь случай, когда заранее известно, что точность взвешивания тары примерно в 1,6 раза выше, чем консервированного продукта брутто:

$$\sigma_{\bar{m}_\sigma}^2 \approx 2,5 \sigma_{\bar{m}_T}^2$$

Ценность второго условного уравнения тогда больше, чем первого. Если учитывать ценность условных уравнений весовыми коэффициентами, обратно пропорциональными их дисперсиям, то

$$g_1 = 0,2, g_2 = 0,5; g_3 = 0,15; g_4 = 0,15,$$

так как дисперсии третьего и четвертого условных уравнений равны сумме двух первых, а сумма всех весовых коэффициентов должна равняться единице.

Суммирование умноженных на  $g_i^2$  произведений каждой функции  $f_i$  на ее про-

изводную по первой переменной ( $\bar{m}_\sigma$ ) теперь даст

$$0.04(\bar{m}_\sigma - 3.98) \cdot 1 + 0 + 0.0225(\bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3.12) \cdot 1 +$$

$$+ 0.0225(\bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4.96) \cdot 1 = 0,$$

по второй ( $\bar{m}_T$ ) —

$$0 + 0.25(\bar{m}_T - 0.9) \cdot 1 - 0.0225(\bar{m}_\sigma - \bar{m}_T - 3.12) \cdot 1 +$$

$$+ 0.0225(\bar{m}_\sigma + \bar{m}_T - 4.96) \cdot 1 = 0,$$

Таким образом, система нормальных уравнений имеет вид:

$$0.085\bar{m}_\sigma + 0 = 0.341;$$

$$0 + 0.295\bar{m}_T = 0.266.$$

10. Как непосредственно, так и с помощью определителей получаем

$$\bar{m}_\sigma = \frac{\begin{vmatrix} 0.341 & 0 \\ 0.266 & 0.295 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.085 & 0 \\ 0 & 0.295 \end{vmatrix}} = \frac{0.101}{0.025} = 4.01; \bar{m}_T = \frac{\begin{vmatrix} 0.085 & 0.341 \\ 0 & 0.266 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.085 & 0 \\ 0 & 0.295 \end{vmatrix}} = \frac{0.023}{0.025} = 0.90.$$

12. Невязки, обращающие в тождества условные уравнения,

$$\theta_1 = -0.03; \theta_2 = 0; \theta_3 = 0.01; \theta_4 = 0.05,$$

12. Стандартные отклонения оценок  $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_m$  при неравноценных условных уравнениях

$$S_{\bar{Q}_j} = \sqrt{\frac{1}{n-m} \cdot \frac{D_{jj}}{D} \sum_{i=1}^n g_i^2 \theta_i^2}.$$

Отсюда

$$S_{\bar{m}_\sigma} = \sqrt{\frac{1}{4-2} \cdot \frac{0.295}{0.025} (0.04 \cdot 0.0009 + 0.0225 \cdot 0.0001 + 0.0225 \cdot 0.0025)} = 0.024 \text{ж}$$

$$S_{\bar{m}_T} = \sqrt{\frac{1}{4-2} \cdot \frac{0.085}{0.025} 0.0000955} = 0.013.$$

13. На основании неравенства П. Л. Чебышева с вероятностью не ниже 0,9

$$3.93 \leq \bar{m}_\sigma \leq 4.09 \text{кз};$$

$$0.86 \leq \bar{m}_T \leq 0.94 \text{кз}.$$

## ГЛАВА 6

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ И ПОЛЕЙ

#### 6.1. ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

До сих пор наше рассмотрение ограничивалось только такими величинами, изменением которых во времени можно пренебречь. Подобное положение сохраняется далеко не всегда. Более того, зависимость измеряемой величины от времени иногда представляет основной интерес, как, например, при измерении мгновенного значения переменного напряжения или тока. Измерение  $Q(t)$  в таких случаях относится к *динамическим*.

Изменение физической величины во времени называется *процессом*. Процесс может характеризоваться постоянными параметрами. У синусоидального напряжения или тока, например, такими параметрами являются амплитуда, частота, начальная фаза. Их измерение к динамическим не

относится.

При воздействии на средство измерений изменяющейся во времени физической величины начинают проявляться инерционные свойства средства измерений. Оно не успевает реагировать на изменение входного сигнала  $Q(t)$ , в результате чего выходной сигнал  $X(t)$  оказывается искаженным по сравнению с входным (рис. 65). Если его пересчитать на вход с помощью функции, обратной функции преобразования, то результат будет отличаться от входного воздействия на значение поправки  $\Theta(t)$



Рис. 65. Пример входного воздействия и отклика на выходе средства измерений

Принимая для простоты функцию преобразования равной 1, можно записать, что

$$\Theta(t) = Q(t) - X(t) \quad (23)$$

Для определения  $\Theta(t)$  нужно знать инерционные (динамические) свойства средства измерений. Они выражаются с помощью *динамических характеристик*, однозначно устанавливающих отклик средства измерений на определенным образом изменяющееся входное воздействие. Простейшей моделью такого воздействия является единичная ступень (см. рис. 65)

$$Q(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ 1 & \text{при } t > 0 \end{cases}$$

Отклик на нее  $h(t)$  называется *переходной характеристикой*, отражающей переходный процесс от одного установившегося состояния на выходе средства измерений к другому при переходе  $Q(t)$  на входе от уровня  $Q(t) = 0$  к уровню  $Q(t) = 1$ . Единичная ступень обозначается символом  $1(t)$ .

Зная переходную характеристику средства измерений, можно рассчитать его реакцию (отклик) на любое входное воздействие. Расчет основывается на так называемом *принципе суперпозиции* (наложения).

" Любое входное воздействие можно представить как сумму начальной ступени  $Q(0) \cdot 1(t)$  и множества следующих через равные промежутки времени  $\Delta t$  ступеней (рис. 66), которые равны

$$\Delta Q(n\Delta\tau) \approx \Delta\tau Q'(n\Delta\tau)$$

отклики на каждую! ступень, смещенную на время  $n \Delta t$ , пропорциональны значению этой ступени и переходной характеристике  $h(t - n \Delta t)$ . Принцип суперпозиции в данном случае заключается в суммировании в каждый дискретный момент времени  $t$  откликов на все предшествующие ступени, т. е.

$$X(t) \approx Q(0)h(t) + \sum_{n=1}^{\left[ \frac{t}{\Delta\tau} \right]} \Delta\tau(n\Delta\tau)h(t - n\Delta\tau)$$

Переходя к пределу при  $n \rightarrow \infty$  и  $\Delta\tau \rightarrow 0$ , получим одну из форм так называемого интеграла наложения (интеграла Дюамеля) :

$$X(t) = Q(0)h(t) + \int_0^t Q'(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (24)$$

С помощью несложных преобразований можно получить и другие его

$$\text{формы } X(t) = Q(0)h(0) + \int_0^t Q(t)h'(t-\tau)d\tau$$

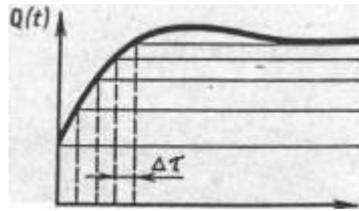


Рис.66. разложение входного воздействия на ступени

$$X(t) = Q(0)h(t) + \int_0^t Q'(t-\tau)h(\tau)d\tau$$

$$X(t) = Q(0)h(t) + \int_0^t Q(t-\tau)h'(\tau)d\tau$$

Можно было бы предположить, что с помощью этих формул при известной переходной характеристике  $h(t)$  решается основная задача измерения — определение входного воздействия  $Q(t)$  по отклику на него  $X(t)$ . Однако, вследствие того, что  $h(t)$  и  $X(t)$  при измерениях всегда известны с некоторой неопределенностью, решение этой задачи наталкивается на исключительные трудности. На практике чаще всего ограничиваются оценкой  $\Theta(t)$  сверху и снизу. Для этого, учитывая априорную информацию об измеряемой физической величине  $Q(t)$ , выбирают модели входных воздействий  $Q_1(t)$  и  $Q_2(t)$ , при которых  $\Theta_1(t)$  и  $\Theta_2(t)$  будут соответственно больше и меньше  $\Theta(t)$ . Затем с помощью одного из уравнений (24) . . . (27) при известной переходной характеристике средства измерений вычисляют  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ , после чего по формуле (23) определяют  $\Theta_1(t)$  и  $\Theta_2(t)$ , позволяющие установить границы, в пределах которых находятся  $\Theta(t)$  и  $Q(t)$  :

$$\Theta_1(t) > \Theta(t) > \Theta_2(t);$$

$$X(t) + \Theta_1(t) > Q(t) > X(t) + \Theta_2(t)$$

Другим видом испытательного сигнала (простейшей моделью входного воздействия) является *единичный импульс*

$$Q(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq 0, \\ \infty & \text{при } t = 0 \end{cases}$$

называемый так потому, что площадь, ограниченная этой функцией, равна 1. Функция такого вида (рис. 67), являющаяся первой производной от единичной ступени, обозначается  $\delta(t)$  и называется дельта - функцией или функцией

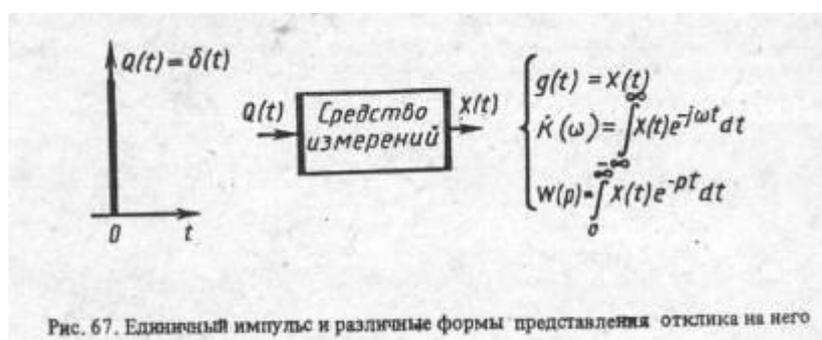


Рис. 67. Единичный импульс и различные формы представления отклика на него

Дирака.

Отклик средства измерений на единичный импульс (как, впрочем, и на любой другой сигнал) можно рассматривать во временном, частотном или операторном представлении. В зависимости от этого различают три вида динамических характеристик: импульсную характеристику, комплексный коэффициент преобразования (передачи) и передаточную функцию.

Отклик средства измерений на единичный импульс во временном представлении называется импульсной характеристикой и обозначается  $g(t)$ .

Поскольку единичный импульс является производной от единичной ступени, отклик на единичный импульс на выходе линейного средства измерений (импульсная характеристика) является производной от отклика на единичную ступень (переходной характеристики):  $g(t) = h'(t)$ . Используя это соотношение, из уравнений (25) и (27) получаем:

$$X(t) = \int_0^t Q(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (28)$$

$$X(t) = \int_0^t Q(t-\tau)g(\tau)d\tau \quad (29)$$

Эти выражения при выборе соответствующих моделей входных воздействий позволяют с помощью импульсной характеристики установить пределы, в которых находится  $\Theta(t)$ .

Переходная или импульсная характеристики определяются экспериментально. При их использовании по методу суперпозиции осуществляется сначала разложение выбранной модели входного воздействия на „элементарные“ функции времени, а затем суммирование откликов на них. Последнюю операцию называют иногда *свертыванием*, а интегралы в выражениях (24) . . . (29) — *интегралами свертки*. Из них выбирается тот, у которого проще подынтегральная функция.

Спектр отклика средства измерений на единичный импульс называется комплексным коэффициентом преобразования (передачи). Он обозначается  $K(\omega) = K(\omega)e^{-i\varphi(\omega)}$ , где модуль  $K(\omega)$  и аргумент  $\varphi(\omega)$  называются соответственно амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристиками.

По определению,

$$\dot{K}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i\omega t} dt \quad (30)$$

Таким образом, непосредственным экспериментальным способом определения комплексного коэффициента преобразования является спектральный анализ отклика на единичный импульс. При другом способе непрерывный равномерный спектр единичного импульса на входе заменяется последовательным рядом дискретных спектральных линий. При подаче на вход гармонического колебания  $Q(t) = Q_m \sin(\omega t + \varphi_0)$  амплитуда  $X_m$  отклика  $X(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi_x)$  на выходе линейного средства

измерений связана с амплитудой входного воздействия через коэффициент передачи  $K$  на частоте  $\omega$ :

$$X_m = KQ_m$$

, а разность фаз  $\varphi = \varphi_x - \varphi_0$  определяет задержку выходного сигнала по отношению к входному на этой частоте (рис. 68). Подавая на вход сигналы различных частот, можно построить АЧХ и ФЧХ/

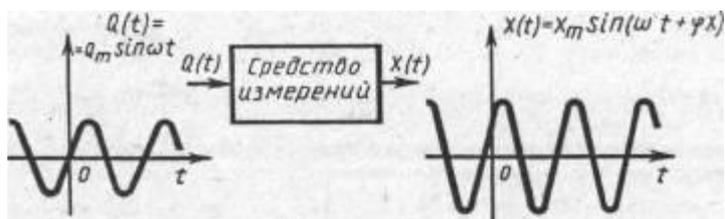


Рис. 68. Прохождение гармонического сигнала через средство измерений

В общем случае комплексный спектр отклика  $S_X(\omega)$  связан с комплексным спектром входного воздействия  $S_Q(\omega)$  соотношением

$$S_X(\omega) = K(\omega) S_Q(\omega) \quad (31)$$

Использование комплексного коэффициента преобразования (передачи) для определения границ, в пределах которых находится значение поправки  $\Theta(t)$ , включает:

вычисление спектров  $S_{Q_1}$  и  $S_{Q_2}$  специально подобранных моделей входных воздействий  $Q_1(t)$  и  $Q_2(t)$ ,

определение спектров откликов на эти воздействия по формуле (31);

обратное преобразование Фурье полученных спектров откликов  $k$ , расчет  $\Theta_1(t)$  и  $\Theta_2(t)$  по формуле (23).

Изображение (по Лапласу) отклика средства измерений на единичный импульс называется передаточной функцией и обозначается  $W(p)$ . Таким образом, передаточная функция связана с импульсной характеристикой прямым преобразованием Лапласа. Важной особенностью передаточной функции является возможность ее определения теоретическим путем - посредством решения операторным методом дифференциального уравнения, описывающего работу средства измерений.

Определение пределов, в которых находится значение поправки  $\Theta(t)$  с помощью передаточной функции включает:

нахождение изображений  $Q_1(p)$  и  $Q_2(p)$  специально подобранных моделей входных воздействий  $Q_1(t)$  и  $Q_2(t)$ ;

определение по формуле  $X(p) = W(p) Q(p)$  изображений откликов на эти воздействия;

переход с помощью обратного преобразования Лапласа от изображений к оригиналам откликов  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$  и расчет по формуле (23)  $\Theta_1(t)$  и  $\Theta_2(t)$ .

Однозначная взаимосвязь между рассмотренными динамическими характеристиками означает их полную эквивалентность и предполагает возможность рационального выбора в каждом конкретном случае наиболее подходящей. Так, если работа средства измерений описывается известным дифференциальным уравнением, то в качестве динамической характеристики целесообразно выбрать передаточную функцию, получаемую путем решения этого уравнения операторным методом. Если динамическая характеристика определяется экспериментально, то ее выбор зависит от типов имеющихся приборов и видов входных воздействий. Вполне возможен как временной, так и частотный подход к решению вопроса.

Динамические характеристики относятся к нормируемым метрологическим характеристикам средств измерений и соответствие их нормам должно контролироваться при поверке последних. Соответствующие физические величины для этого необходимо воспроизводить в динамическом режиме. Такое воспроизведение может быть как централизованным, так и децент-

рализованном. При централизованном воспроизведении единиц физических величин в динамическом режиме на высшем метрологическом уровне находятся государственные *специальные* эталоны. При децентрализованном воспроизведении кроме единицы измеряемой физической величины используется единица времени, передаваемая от государственного первичного эталона.

Пример 45.

В виде иллюстрации рассмотрим имеющий самостоятельное значение пример прохождения импульсных сигналов длительностью  $\tau_{и}$  через промежуточный измерительный преобразователь (полосовой фильтр), имеющий АЧХ

$$K_{(\omega)} = e^{-\alpha^2 \omega^2}$$

и ФЧХ

$$\gamma(\omega) = k\omega$$

Неизвестной характеристикой входных воздействий является форма импульсов.

1. В качестве моделей  $Q_1(t)$  и  $Q_2(t)$  выберем наиболее динамичное входное воздействие - единичный импульс - и наименее динамичное - импульс колоколо-образной формы длительностью  $\tau_u$ . Таким образом,

$$Q_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq 0 \\ \infty & \text{при } t=0; \end{cases}$$

$$Q_1(t) = Q_{2m} e^{-\beta^2 t^2},$$

где длительность импульса  $\tau_{и}$  условно определяется по достижении  $Q_2(t)$  в момент времени  $t = \frac{\tau_{и}}{2}$  некоторого уровня

$$Q_{2_0} = Q_{2m} e^{-\beta^2 \left(\frac{\tau_u}{2}\right)^2}$$

Отсюда

$$e^{\beta^2 \left(\frac{\tau_u}{2}\right)^2} = \frac{Q_{2m}}{Q_{2_0}}$$

Прологарифмировав левую и правую части этого равенства, получим

$$\frac{1}{4} \beta^2 \tau_{и}^2 \ln e = \ln \frac{Q_{2m}}{Q_{2_0}}$$

Для простоты будем отсчитывать  $\tau_{и}$  на таком уровне  $Q_{2_0}$ , чтобы

$$\frac{Q_{2m}}{Q_{2_0}} = e$$

Тогда

$$\beta^2 = \frac{4}{\tau_u^2}$$

и

$$Q_2(t) = e^{-\frac{4t^2}{\tau_u^2}}$$

Примем для простоты  $Q_{2m} = 1$  Тогда

$$Q_2(t) = e^{-\frac{4t^2}{\tau^2 \pi}}$$

2. Откликом  $X_1(t)$  на единичный импульс является импульсная характеристика  $q(t)$  связанная, согласно выражению (30), с комплексным коэффициентом передачи  $K(\omega)$  обратным преобразованием Фурье. В нашем случае

$$K(\omega) = K(\omega)e^{-j\varphi(\omega)} = e^{-a^2\omega - jk\omega}$$

ПОЭТОМУ

$$X_1(t) = g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\omega^2 - jk\omega} e^{j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\omega^2 + j(t-k)\omega} d\omega \quad (32)$$

$$X_1(t) = e^{\frac{(t-k)^2}{4a^2}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{(\alpha\omega - j\frac{t-k}{2\alpha})^2} d\omega$$

Добавим к показателю экспоненты и вычтем из него слагаемое  $\frac{(t-k)^2}{4a^2}$ . Получим

$$X_1(t) = e^{\frac{(t-k)^2}{4a^2}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{(\alpha\omega - j\frac{t-k}{2\alpha})^2} d\omega \quad (33)$$

Подстановкой  $a\omega - j\frac{t-k}{2\alpha} = x$ ;  $d\omega = \frac{1}{\alpha} dx$  и заменой интеграла в бесконечных пределах на два интеграла в пределах от нуля до бесконечности последнее выражение приводится к виду

$$X_1(t) = \frac{2}{a} e^{-\frac{(t-k)^2}{4a^2}} \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx$$

Где табличный интеграл равен  $\frac{\sqrt{\pi}}{2}$  получим

$$X_1(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{a} e^{-\frac{(t-k)^2}{4a^2}}$$

Единичный импульс на выходе средства измерений задерживается на время  $t = k$ , уменьшается и приобретает колоколообразную форму.

3. Верхняя граница  $\Theta(t)$  согласно формуле (23), определяется как

$$\Theta_1(t) = \delta(t) - X_1(t) = 0 \Big|_{t>0} - \frac{\sqrt{\pi}}{a} e^{-\frac{(t-k)^2}{4a^2}} = -\frac{\sqrt{\pi}}{a} e^{-\frac{(t-k)^2}{4a^2}} \quad (35)$$

4. Спектр колоколообразного импульса  $Q_2(t)$

$$S_{Q_2}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-4\frac{t^2}{\tau^2 u}} e^{-j\omega t} dt$$

вычисляется теми же приемами, что  $X_1(t)$  в выражениях (32), (33):

$$S_{Q_2}(\omega) = \frac{\tau_u \sqrt{\pi}}{2} e^{-\frac{\tau^2 u \omega^2}{16}}$$

Спектр отклика на такое входное воздействие, согласно выражению (31),

$$S_{X_2}(\omega) = K(\omega) S_{Q_2}(\omega) = e^{-a^2 \omega^2 - jk\omega} \frac{\tau_u \sqrt{\pi}}{2} e^{-\frac{\tau^2 u \omega^2}{16}} = \frac{\tau_u \sqrt{\pi}}{2} e^{-y^2 \omega^2 - jk\omega}$$

Где  $y^2 = a^2 + \frac{\tau^2 u}{16}$ , а сам отклик

$$X_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int S_{X_2}(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{\tau_u}{4\sqrt{\pi}} \int e^{-y^2 \omega^2 + j(t-k)\omega} d\omega \quad (36)$$

Из сравнения формулы (36) с формулами (32) и (34) следует, что

$$X_2(t) = \frac{\tau_u}{\sqrt{16a^2 + \tau^2 u}} e^{-4\frac{(t-k)^2}{16a^2 + \tau^2 u}}$$

Таким образом, после прохождения через полосовой фильтр импульс  $Q_2(t)$  оставаясь колоколообразным, несколько расширяется, уменьшается и задерживается во времени.

5. Нижняя граница  $\Theta(t)$  по формуле (23)

$$\Theta_2(t) = \Theta_2(t) - X_2(t) = e^{-4\frac{t^2}{\tau^2 u}} - \frac{\tau_u}{\sqrt{16a^2 + \tau^2 u}} e^{-4\frac{(t-k)^2}{16a^2 + \tau^2 u}} \quad (37)$$

6. В реальных условиях импульсы на выходе измерительного преобразователя с указанными АЧХ и ФЧХ будут отличаться от выходных на  $\Theta(t)$

$$\Theta_1(t) > \Theta(t) > \Theta_2(t)$$

Анализ выражений (35) и (37) позволяет установить, как на искажение импульсов влияет ширина полосы пропускания преобразователя (с уменьшением  $\alpha$  она увеличивается) и

фазовая задержка, пропорциональная  $k$ .

## 6.2. ИЗМЕРЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН, ПРОЦЕССОВ И ПОЛЕЙ

Практически постоянными и закономерно изменяющимися с течением времени многообразие измеряемых величин не ограничивается. Среди них встречаются случайные по своей природе, случайно меняющиеся во времени и в пространстве. Случайной, например, является масса пшеницы, собираемой ежегодно с одного и того же гектара. В разные годы ее урожайность может меняться на десятки процентов, и это не будет свидетельствовать о невоспроизводимости измерений. Случайной является температура, измеряемая в одно и то же время (например, в новогоднюю ночь) в точке с одними и теми же географическими координатами (например, в г. Сочи). Случайными являются скорость электрона, вылетающего из нагретого катода электронной лампы, сила света, проникающего на дно водоема, и многие, многие другие величины. Строго говоря, все физические величины можно считать случайными, но на практике к ним относят только те, случайным характером которых нельзя пренебречь.

Термин «измерение случайных величин» нужно понимать как условный; на самом деле измеряются числовые характеристики их законов распределения вероятности (либо определяются сами законы), которые, как известно, не являются случайными. Установить размер или измерить значение случайной величины нельзя именно потому, что они случайны.

С помощью однократного измерения определить вероятностные характеристики случайной-величины, естественно, невозможно.

*Многokратное измерение* нужно стремиться организовать так, чтобы рассеянием результата из-за случайности отсчета можно было пренебречь по сравнению с рассеянием из-за случайного характера самой измеряемой величины. Тогда при монотонных функциях преобразования  $f(Q)$  закон распределения вероятности измеряемой величины  $p(Q)$  находится путем преобразования закона распределения вероятности показания средства измерений  $p_x(X)$  по формуле

$$p(Q) = p_x [f(Q)] \left| \frac{df(Q)}{dQ} \right|$$

Если случайным характером отсчета пренебречь нельзя, то закон распределения вероятности результата измерения должен рассматриваться как композиция закона распределения вероятности случайной величины  $Q$  и закона распределения вероятности показания при  $Q = \text{const}$ . Определить искомый закон в этом случае очень сложно, поэтому обычно ограничиваются оценками числовых характеристик закона распределения вероятности случайной величины  $Q$ . Оценка ее среднего значения равна среднему арифметическому результатов однократных измерений, а оценка дисперсии - разности между оценками дисперсий композиции и показания при  $Q = \text{const}$ .

Изменение физической величины во времени, как уже говорилось в

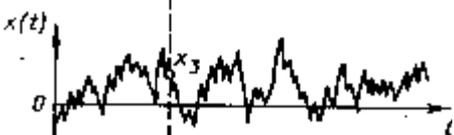


разд. 6.1, называется *процессом*. Если при повторениях он каждый раз

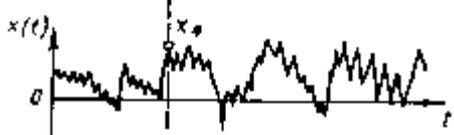
протекает случайным образом, то это *случайный процесс*.



Существуют два способа описания случайных процессов. При первом из них каждому текущему моменту времени  $t$  ставятся в соответствие случайные величины  $x_{i \in [1, \dots, n]}$ ;



при втором — случайный процесс  $Q(t)$  задается множеством своих реализаций  $x(t)$  (рис. 69). Случайные величины  $x_i$  в каждом сечении  $t = \text{const}$  подчиняются определенному закону распределения вероятности. Если он



одинаков для любого сечения, т. е. не зависит от времени, то процесс называется *стационарным*; в противном случае

Рис. 69. Реализации случайного процесса

*нестационарным*. Стационарные случайные процессы обладают свойством *эргодичности*, заключающемся в том, что вероятностные характеристики, вычисленные по множеству реализаций и ПО любой ИЗ них, равны между собой. Это позволяет при измерениях обходиться одной реализацией стационарного случайного процесса.

Регистрация реализации случайного процесса - типичная задача динамических измерений, рассмотренная в разд. 6.1.

Исчерпывающая информация о случайном процессе содержится в его многомерной интегральной функции распределения вероятности

$$F_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) = P\{x(t_1) \leq x_1, \dots, x(t_n) \leq x_n\}$$

характеризующей вероятность того, что в моменты времени  $t_i$  случайные величины  $x_i$  не превысят определенных своих значений, и в многомерной дифференциальной функции (плотности) распределения вероятности

$$p_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) = \frac{\delta^n F_n}{\delta x_1 \dots \delta x_n}$$

На практике ограничиваются оцениванием числовых характеристик, или моментов, которые в общем случае являются функциями времени. Они представляют собой некоторые средние значения, причем для неэргодических случайных процессов усреднение должно производиться по множеству реализаций, а для эргодических может выполняться по одной из них (по времени).

Для стационарного случайного процесса, в частности, начальный момент первого порядка (среднее значение) определяется как

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)dt$$

Это так называемая *постоянная составляющая* стационарного случайного процесса (рис. 70), которую редко определяют, так как измерительная задача обычно заключается в выяснении динамики, развития явления. В дальнейшем будут рассматриваться случайные процессы с  $x(t) = 0$ , т. е. без постоянной составляющей.

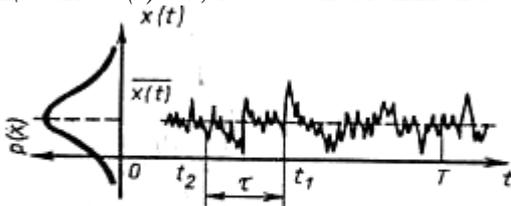


Рис. 70. Нормальный стационарный случайный процесс

Мерой статистической связи между значениями стационарного случайного процесса без постоянной составляющей в моменты времени  $t_1$  и  $t_2 = t_1 - \tau$  служит смешанный центральный момент 2-го порядка  $\overline{x(t_1)x(t_1 - \tau)}$ , называемый *корреляционным*.

Вероятностно-статистические характеристики стационарного случайного процесса не зависят от времени, поэтому  $t_1$  можно выбрать произвольно, приняв  $t_1 = t$ . Тогда корреляционный момент будет зависеть только от  $\tau$ . В силу эргодичности он равен

$$p(\tau) = \overline{x(t)x(t-\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau)dt \quad (38)$$

С переходом от фиксированного времени к текущему корреляционный момент стал функцией. Определенная выражением (38) *корреляционная функция* обладает следующими свойствами.

1. При  $\tau = 0$  корреляционная функция  $p(0) = \overline{x(t)x(t)} = \overline{x^2} = \alpha_x^2$  максимальна и равна

дисперсии стационарного случайного процесса (рис. 71.). Если измеряемой физической величиной является, например, сила тока  $i(t)$ , то  $p(0) = i^2$  — полная мощность, выделяемая на сопротивлении в 1 Ом. В том случае, когда процесс имеет постоянную и переменную составляющие,  $p(0) = \alpha_x^2 + x^2$ , где  $\alpha_x^2$  и  $x^2$  мощности соответственно переменной и постоянной составляющих

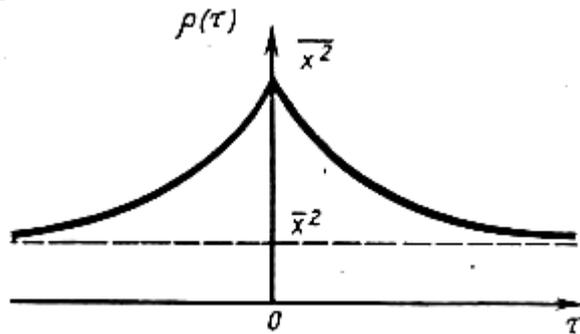


Рис. 71. Корреляционная функция стационарного случайного процесса

Максимальное значение корреляционной функции при  $\tau = 0$  объясняется тем, что статистическая связь между неразличимыми по времени значениями  $x(t)$  является наибольшей. Корреляционную функцию часто нормируют по ее максимальному значению:  $r(\tau) = \rho(\tau)/\rho(0)$ , тогда  $r(0) = 1$ .

2. Корреляционная функция является четной, т. е.  $\rho(\tau) = \rho(-\tau)$ . Это можно показать, выбрав в качестве текущего момента времени  $t_2 = t$  и обозначив  $t_1 = t_2 + \tau$  (см. рис. 70). Спектр корреляционной функции состоит, следовательно, только из косинусоидальных составляющих.

3. При  $\tau \rightarrow \infty$   $\rho(\tau) \rightarrow 0$  (у процессов с постоянной составляющей - к  $\bar{x}^2$ , если в  $x(t)$  нет детерминированной составляющей).

4. Корреляционная функция  $p(t)$  монохроматического колебания является косинусоидой с такой же частотой. Доказательство этого важного свойства будет рассмотрено ниже, а важным следствием является то, что при корреляционном преобразовании теряется информация о фазовой структуре процесса.

- 5. Корреляционная функция суммы независимых процессов равна сумме их корреляционных функций. Вместе с предыдущим это свойство используется в оптимальной фильтрации для суммирования гармоник сигнала в момент  $t = 0$ .

6. Корреляционная функция связана со спектром мощности случайного процесса прямым и обратным преобразованиями Фурье:

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (39)$$

$$\rho(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int G(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (40)$$

Это положение известно как теорема преобразования Винера-Хинчина. Таким образом, спектр мощности, как и корреляционная функция, может служить неслучайной характеристикой случайного процесса.

**Корреляционная функция является основной характеристикой стационарных**

случайных процессов, поддающейся измерению и определяющей их внутренние статистические свойства. На практике, однако, из-за конечности времени усреднения  $T$  определяется не сама корреляционная функция (38), а ее оценка

$$\hat{p}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau)dt$$

что указывает на необходимость внесения в результат измерения поправки. Представление о ней можно получить из следующего примера.

**Пример 46.** Найдем корреляционную функцию гармонического колебания  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$  и поправку при ее измерении с интервалом усреднения  $T$ .

Оценка корреляционной функции

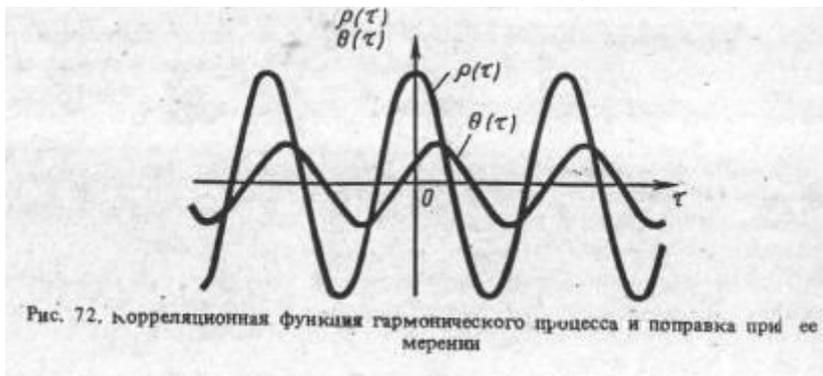
$$p(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot U_m \sin[\omega(t + \tau) + \varphi] dt = \frac{U_m^2}{2T} \int_0^T [\cos \omega \tau - \cos(2\omega t + \omega \tau + 2\varphi)] dt =$$

$$\frac{U_m^2}{2} \cos \omega \tau - \frac{U_m^2}{4\omega T} \int_0^T \cos(2\omega t + \omega \tau + 2\varphi) d2\omega t$$

После подстановки  $2\omega t = x$  получим

$$\hat{p}(\tau) = \frac{U_m^2}{2} \cos \omega \tau - \frac{U_m^2}{4\omega T} \int_0^{2\omega T} \cos(x + \omega \tau + 2\varphi) dx = \frac{U_m^2}{2} \cos \omega \tau - \frac{U_m^2}{2} \frac{\sin \omega T}{\omega T} \cos(\omega \tau + \omega T + 2\varphi)$$

Так как корреляционная функция  $p(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \hat{p}(\tau) = \frac{U_m^2}{2} \cos \omega \tau$ , то поправка



$$\Theta(\tau) = \frac{U_m^2}{2} \frac{U_m^2}{\omega T} \cos(\omega \tau + \omega T + 2\varphi)$$

$$p(\tau) = \hat{p}(\tau) + \Theta(\tau)$$

Таким образом, поправка  $\Theta(\tau)$  является гармонической функцией той же частоты, что и  $p(\tau)$ , но с начальной фазой, содержащей информацию о фазе гармонического колебания  $u(t)$  (рис. 72). Поправка в  $\Theta(\tau)$  особенно значительна на низких частотах и убывает с увеличением времени усреднения  $T$ . При  $\tau \rightarrow 0$  корреляционная функция сложного сигнала  $p(0) \rightarrow \hat{p}(0)$ , так как поправки суммируются с разными фазами (в том числе и с противоположными).

Средства измерений, предназначенные для определения корреляционной функции (коррелометры), могут работать как в реальном масштабе времени (рис. 73), так и с

накоплением информации (рис. 74). В первом случае в измерительную цепь включается регулируемая линия задержки, умножитель и интегрирующая цепочка (регистр сдвига, умножитель и сумматор в цифровом варианте)) во втором осуществляется промежуточная запись информации на магнитную или бумажную ленту. В обоих случаях важнейшей нормируемой метрологической характеристикой служит время усреднения (постоянная времени интегрирующей цепи). Соответствие этой величины норме должно контролироваться при проверке

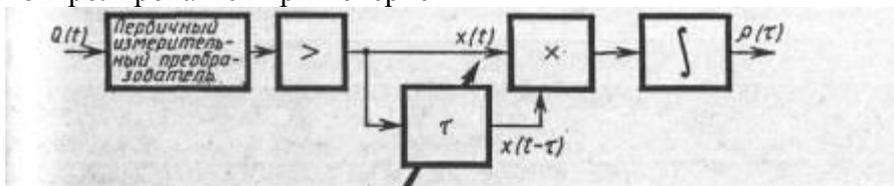


Рис. 73. Измерение корреляционной функции в реальном масштабе времени



Рис. 74. Измерение корреляционной функции с использованием запоминающего устройства

Другим способом определения корреляционной функции является обратное преобразование Фурье (40) спектра мощности. Оба способа совершенно равнозначны, и выбор одного из них определяется практи-'вскими соображениями.

Возможность измерения или вычисления по формуле (39) спектраль-Ц<sup>о</sup> и плотности мощности стационарного случайного процесса используется <sup>КПя</sup> определения АЧХ средств измерений с линейной и стационарной ста

тической характеристикой. Для них спектральные плотности мощности входного и выходного сигналов при подаче на вход стационарного случайного процесса связаны соотношением

$$G_x(\omega) = K^2(\omega) \cdot G_Q(\omega) \quad (41)$$

Если спектр мощности испытательного сигнала в виде стационарного случайного процесса известен,

$$K(\omega) = \sqrt{\frac{G_x(\omega)}{G_Q(\omega)}}$$

где  $G_x(\omega)$  - измеряемая величина. Если же  $G_Q(\omega)$  неизвестен, то он измеряется спектрометром более высокого класса точности с известной АЧХ:

$$G'_x(\omega) = (K')^2(\omega) G_Q(\omega) \quad (42)$$

Тогда из формул (41) и (42) следует, что

$$K(\omega) = K'(\omega) \sqrt{\frac{G_x(\omega)}{G'_x(\omega)}}$$

В любом случае нелинейность статической и динамической характеристик средства измерений приводит к искажению выходных сигналов по сравнению с входными, что должно учитываться при подготовке и проведении измерений, а также при обработке и анализе их результатов.

Обобщением понятия случайного процесса является понятие *случайного поля*.

Под полем понимают функцию  $Q(x, y, z, \dots)$  нескольких координат. Она может быть двух-, трех-, .., n-мерной. В реальном пространственно-временном континууме физические величины являются функциями трехмерного пространства и времени.

Изменение физической величины вдоль любого направления случайного поля аналогично

случайному процессу с той лишь разницей, что роль времени играет пространственная координата. Оно задается соответствующими многомерными функциями распределения вероятности физической величины.

Если закон распределения вероятности не меняется вдоль пространственной координаты, то поле называется *однородным*, если не зависят от направления в пространстве - *изотропным*.

*Пространственная* корреляционная функция однородного и изотропного случайного поля

$$p(\Delta r) = \overline{x(\vec{r}_1)x(\vec{r}_2)}$$

где  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  — координаты двух различных точек пространства, а  $\Delta \vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2$ .

*Пространственно-временная* корреляционная функция -стационарного (по времени), однородного и изотропного (в пространстве) случайного поля

$$p(\tau, \Delta \vec{r}) = \overline{x(t_1, r_1)x(t_2, r_2)}$$

где  $\tau = t_2 - t_1$ , а черта означает усреднение и по времени и по пространству. По аналогии с процессами для полей вводится понятие пространственных частот.

*Пространственный* спектр неслучайного поля

$$S(\vec{k}) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\vec{r})e^{-j\vec{k}\vec{r}} d\vec{r}$$

*пространственно-временной* —

$$\dot{S}(\omega, \vec{k}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t, \vec{r})e^{-j(\omega t + \vec{k}\vec{r})} dt d\vec{r}$$

где  $k$  и  $\omega$  — соответственно пространственные и временные частоты.

Пространственно-временной спектр „мощности“ стационарного, однородного и изотропного случайного поля связан с его пространственно-временной корреляционной функцией соотношениями Винера-Хинчина:

$$G(\omega, \vec{k}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau, \Delta \vec{r})e^{-j(\omega\tau + \vec{k}\Delta \vec{r})} d\tau d\vec{r}$$

$$p(\tau, \Delta \vec{r}) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega, \vec{k})e^{-j(\omega\tau + \vec{k}\Delta \vec{r})} d\omega d\vec{k}$$

Средства измерений пространственных и пространственно-временных характеристик случайных полей могут быть контактными и неконтактными.

*Контактные* неподвижные средства регистрируют только процессы, поскольку для обзора пространства необходимо относительное движение. Недостатком контактных средств является возмущение измеряемого поля первичным измерительным преобразователем. Оно должно учитываться при организации и проведении измерений и интерпретации их результатов.

*Неконтактные* средства измерений могут быть с высокой и низкой разрешающей способностью. Обзор пространства первыми производится счет сканирования или относительного движения с накоплением и усреднением данных. У вторых усреднение по пространству происходит благодаря низкой разрешающей способности.

**Во всех случаях интервал усреднения по времени и по пространству является важнейшей нормируемой метрологической характеристикой.**

Она должна контролироваться при проверке средств измерений, приниматься во внимание при подготовке и проведении измерений, при обработке и анализе их результатов.

## КВАЛИМЕТРИЯ

### 7.1. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА

Квалиметрия — раздел метрологии, изучающий вопросы измерения качества. Здесь используются те же законы и правила, что и в области измерения физических величин, но есть и некоторые особенности, которые наглядно проявляются в сравнении. Рассмотрение их начнем с сопоставления измеряемых величин.

1. Многообразие нашего мира определяется *свойствами* различных его сторон. Это свойства живой и неживой материи, свойства физических объектов и явлений, свойства происходящих в мире социальных и исторических процессов и многие, многие другие. Определенная группа свойств относится к такому обобщенному понятию, как *качество* (труда, промышленной продукции, произведений искусства, принимаемых решений, организационной деятельности и т. п.).

2. Любое свойство может быть выражено в большей или меньшей степени, т. е. имеет количественную характеристику. В то же время всякое свойство может проявляться по-разному. Одним из проявлений инертности тел, например, является сила, с которой они притягиваются к Земле (вес). Долгое время она использовалась в качестве количественной характеристики инертности. Но в невесомости эта сила равна нулю, а свойство инертности остается и проявляется в другом. Таким образом, количественных характеристик у каждого свойства может быть несколько. Наиболее удачная из них выбирается по соглашению и называется *мерой*. Мерами физических свойств являются *физические величины*: масса, время, давление, скорость и другие. Мерами свойств, определяющих качество, служат *показатели качества*. Понятно, что любые формы сотрудничества возможны только в случае, если его участники будут пользоваться одинаковыми мерами.

3. Установлено 12 областей измерений физических величин:

- измерения геометрических величин;
- измерения механических величин;
- измерения давления и вакуума;
- теплофизические и температурные измерения;
- измерения времени и частоты;
- измерения электрических и магнитных величин;
- измерения акустических величин и др.

Показатели качества в квалиметрии<sup>1</sup> группируются в областях, установленных РД 50-64-84 (см. разд. 1.2):

- показатели назначения;
- показатели надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости);
- показатели экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии и трудовых ресурсов;
- эргономические показатели; эстетические показатели;
- показатели технологичности; показатели стандартизации и унификации и др.

4. Каждая из перечисленных областей измерений объединяет несколько физических величин или показателей качества. Например, к *геометрическим величинам* относятся длина, площадь, плоский и телесные углы и др., к *механическим* — масса, скорость, ускорение и др. Важнейшими *электрическими* и *магнитными величинами* являются сила электрического тока, электрическое напряжение, электрическое сопротивление,

электрическая емкость, магнитный поток, магнитная индукция, индуктивность и некоторые другие. К *показателям технологичности продукции* относят удельную трудоемкость изготовления, удельную материалоемкость изделия, удельную энергоемкость и среднюю разовую оперативную трудоемкость технического обслуживания (ремонта) изделий данного вида. *Экономические показатели*, характеризующие затраты на разработку, изготовление, эксплуатацию или потребление продукции, включают: затраты на изготовление и испытания опытных образцов; себестоимость изготовления продукции; затраты на расходные материалы при эксплуатации технических объектов и др.

5. Физические величины используются для описания свойств, в совокупности определяющих качество, но понятия „физическая величина" и „показатель качества" не тождественны. Физические величины отражают объективные свойства природы, а показатели качества — общественную потребность в конкретных условиях. Так, например, масса — физическая величина, а масса изделия — показатель его транспортабельности; скорость — физическая величина, а эксплуатационная скорость автобуса — показатель его назначения; освещенность — физическая величина, а освещенность на рабочем месте — эргономический показатель.

6. Как и физические величины, показатели качества имеют *размерность* или могут быть *безразмерными*. На них в полной мере распространяются все положения теории размерностей, рассмотренные в разд. 1.3.

7. Количественной характеристикой показателей качества, как и физических величин, является их *размер*, который нужно отличать от *значения* — выражения размера в определенных единицах. Размер и значение от выбора единиц не зависят. Например, трудоемкость изготовления и (или) эксплуатации продукции определяется количеством времени, затраченного на изготовление и (или) эксплуатацию единицы продукции, и выражается для промышленных изделий в нормо-часах. Ясно, что трудоемкость изготовления конкретного узла или агрегата (показатель технологичности продукции) не изменится, если ее выразить, например, в человеко-днях. Не изменяются и экономические показатели, такие, например, как себестоимость или цена изделия от того, что будут выражены не в рублях, а в копейках.

Отвлеченное число, входящее в значение показателя качества (равно, как и в значение физической величины), называется *числовым значением*. Понятно, что оно-то как раз и зависит от выбора единиц.

8. значения показателей качества, как и значения физических величин, могут быть *абсолютными* и *относительными*. Абсолютные значения физических величин всегда имеют размерность, а относительные — всегда безразмерные. В отличие от этого абсолютные значения показателей качества могут быть как размерными, так и безразмерными, а относительные — только безразмерными. Пример абсолютных значений показателей качества, имеющих размерность, приведен в п. 5, механизм образования безразмерных абсолютных значений будет рассмотрен в п. 9. Примерами относительных значений показателей технологичности продукции являются: относительная трудоемкость изготовления и (или) эксплуатации

$$T_{o.v.p.} = \frac{T_{e.p.}}{T}$$

где  $T_{вр}$  — трудоемкость по видам производимых работ, например, трудоемкость заготовительных работ, трудоемкость профилактического обслуживания и т. п.;  $T$  — трудоемкость изготовления и (или) эксплуатации;

относительная себестоимость изготовления и (или) эксплуатации

$$C_{o.с.р.} = \frac{C_{в.р.}}{C_T}$$

$C_{в.р.}$  — себестоимость по видам производимых работ, например, суммарная себестоимость ремонтов, суммарная себестоимость профилактического обслуживания и т. д.;  $C_T$  — технологическая себестоимость изготовления и (или) эксплуатации.

8. Аналогично делению физических величин на *основные* и *производные* показатели качества делятся на *единичные* и *комплексные*. Единичные относятся к одному из свойств, определяющих качество, комплексные — сразу к нескольким свойствам. Производные физические величины связаны с основными (и дополнительными) фундаментальными физическими законами, или посредством определений (см. разд. 1.2). Точно так же комплексные показатели качества могут быть связаны с единичными через функциональные зависимости, отражающие объективные законы природы, а могут быть некоторой комбинацией их, соответствующей определению комплексного показателя. Примерами комплексных показателей качества продукции первого типа служат такие показатели транспортабельности лесопиломатериалов, как их количество в партии (в кубометрах) и масса (в килограммах). Количество лесопиломатериалов в партии  $v = n^2 Ldh$ , где единичные показатели  $L, d, h$  - соответственно длина, ширина и толщина досок стандартных размеров, а  $n$  - их число. Масса лесопиломатериалов в партии

$$m = pv = pn^2 Ldh$$

где единичный показатель качества сухой древесины - ее плотность  $p \approx 7 \cdot 10^2$  кг/м<sup>3</sup>. Примером комплексного показателя назначения второго типа является годовая производительность автобуса

$$W_a = 365 a_u \beta \gamma q v t_H$$

где  $a_u, \beta, \gamma$  - соответственно коэффициенты использования парка автобусов, пробега автобуса и его вместимости при номинальной вместимости  $q$ , чел.;  $v$  - эксплуатационная скорость автобуса, км/ч;  $t_H$  - средняя продолжительность времени в наряде, ч.

В случаях, когда комплексный показатель качества не представляет собой возможный выразить через единичные с помощью объективной функциональной зависимости, применяют субъективный способ образования комплексных показателей по принципу среднего взвешенного:

Наименование комплексного показателя качества

Математическое выражение

Среднее арифметическое взвешенное

$$\hat{Q} = \sum_{i=1}^n q_i Q_i$$

Среднее гармоническое взвешенное	$\tilde{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{q_i}}$
Среднее квадратическое взвешенное	$\bar{Q} = \sqrt{\sum_{i=1}^n q_i^2 Q_i^2}$
Среднее геометрическое взвешенное	$\overline{Q} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Q_i^{g_i}}$

С помощью весовых коэффициентов  $g_i$ , как и прежде, учитывается важность или ценность каждого единичного показателя качества  $Q_i$ . Ценность результатов измерения физических величин тем больше, чем меньше их рассеяние. Поэтому при обработке результатов нескольких серий измерений, при решении систем линейных уравнений методом наименьших квадратов весовые коэффициенты выбираются обратно пропорциональными дисперсиям (см. разд. 3.8; 5.3). В квалиметрии „вес“ показателей качества определяется иными соображениями. Показатели назначения, например, являются обычно наиболее важными. Однако на сколько или во сколько раз один показатель важнее другого сказать трудно. Эта сложная задача определения весомости показателей качества часто решается экспертным методом, исходя из условия

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1$$

При соблюдении этого условия среднее взвешенное в разд. 3.7, 3.8 переходит в среднее арифметическое значение, а выражение для среднего гармонического взвешенного существенно упрощается.

Суммирование единичных показателей качества с учетом их весов должно производиться в соответствии с правилами теории размерностей. Поэтому очень часто от абсолютных значений единичных показателей качества предварительно переходят к относительным. Абсолютное значение комплексного показателя получается в этом случае безразмерным.

*Среднее арифметическое взвешенное* используется преимущественно тогда, когда в комплексный показатель качества объединяются однородные единичные показатели, а разброс между слагаемыми невелик.

Пример 47. Основными единичными показателями качества кокса являются содержание в нем серы  $S_c$ , зольность  $A_c$ , прочность  $M_{10}$  и  $M_{40}$ . При увеличении каждого из этих показателей на 1 % производительность доменной печи в первых трех случаях снижается соответственно на 20, на 2, и на 3 %, а в четвертом - повышается на 1,3 %. При этих условиях комплексный показатель, характеризующий зависимость производительности доменной печи от качества кокса, может быть представлен в виде среднего арифметического взвешенного

$$\hat{Q} = g_1 S_c + g_2 A_c + g_3 M_{10} + g_4 M_{40}$$

где коэффициенты весомости естественно выбрать равными изменению производительности доменной печи при увеличении значений перечисленных показателей качества кокса на 1 %. При значениях показателей качества кокса  $S_c = 0,7 \%$ ;  $A_c = 11 \%$ ;  $M_{10} = 8 \%$ ;  $M_{40} = 78 \%$ , соответствующих требованиям государственного стандарта,

$$\hat{Q} = -0,2 \ 0,007 - 0,02 \ 0,11 - 0,03 \ 0,08 + 0,013 \ 0,78 = 4,14 \cdot 10^{-3}.$$

*Среднее гармоническое взвешенное* применяется тогда, когда разброс между слагаемыми более значительный.

*Среднее квадратическое взвешенное* используется в методе наименьших квадратов (см. разд. 5.3). В квалиметрии этот метод также применяется очень широко.

Наиболее распространенным и универсальным является *среднее геометрическое взвешенное*. Оно применяется при комплексировании неоднородных показателей качества, в том числе разнородной продукции, соответствующих разным условиям ее применения и имеющим значительный разброс.

В комплексных показателях качества низкие значения одних единичных показателей могут компенсироваться высокими значениями других. Иногда это соответствует реальным жизненным ситуациям. Многолетними наблюдениями и специальными исследованиями, например, установлено, что одежда и обувь отечественного производства в целом более прочна и долговечна, чем импортная. Однако последняя имеет более привлекательный внешний вид, чем объясняется повышенный спрос на импорт. Высокие эстетические показатели качества в данном случае компенсируют низкие показатели надежности и долговечности. Другой пример: за счет снижения отдельных показателей качества повышают показатели транспортабельности (в частности, массогабаритные характеристики) оборудования и изделий, устанавливаемых на летательных аппаратах. Таких примеров множество.

В то же время недопустимо компенсировать низкие значения главных, важнейших показателей качества высокими значениями второстепенных. Для исключения такой возможности комплексный показатель качества домножают на так называемый *коэффициент вето*, обращающийся в 0 при выходе любого из важнейших единичных показателей за допустимые пределы и равный 1 во всех остальных случаях, благодаря коэффициенту вето комплексный показатель качества падает до нуля, если хотя бы один из важнейших единичных показателей оказывается неприемлемым.

10. Так же, как производные физические величины, комплексные показатели качества можно продолжать и дальше комбинировать между собой, добиваясь все большего и большего обобщения свойств, формирующих в целом представление о качестве. Таким образом, структура показателей качества является *многоуровневой* — рис. 75. Основу ее составляют единичные показатели, характеризующие отдельные свойства, определяющие качество. Число этих показателей, конечно, меньше, чем многообразие свойств. Единичные показатели качества являются мерами лишь тех свойств, которые представляются существенными при рассмотрении качества под вполне определенным углом зрения. Таким образом, уже на их уровне формируется некоторое упрощенное представление о качестве или, как говорят, его *модель*. При переходе к комплексным показателям на каждом вышестоящем уровне модель становится все более грубой, пока ни сводится, наконец, к характеристике качества с помощью одного единственного обобщенного комплексного показателя верхнего уровня. .

Принципы формирования комплексных показателей на каждом уровне такие же, как и на нижнем: на основе функциональных связей или определений, либо по формулам, приведенным на с. 193 Комплексные показатели качества, относящиеся к определенной группе его свойств, называются *групповыми*. Разновидностью комплексного показателя качества, позволяющего с

экономической точки зрения определить оптимальную совокупность свойств изделия, является *интегральный показатель качества*, приведенный в разд. 1.2. Например, интегральным показателем качества буровой установки может быть удельная глубина бурения

$$K_u = \frac{H_{\Sigma}}{Z_c + Z_3}$$

где  $H_{\Sigma}$  - суммарная глубина проходки буровой установки до капитального ремонта, м;  $Z_c, Z_3$  — соответственно себестоимость и затраты на эксплуатацию буровой установки до капитального ремонта.

Примером интегрального показателя качества транспортных средств могут служить удельные затраты на 1 километр пробега

$$K_u = \frac{Z_c + Z_3}{L}$$

где  $Z_c$  и  $Z_3$  — соответственно себестоимость и затраты на эксплуатацию транспортного средства до капитального ремонта;  $L$  - пробег транспортного средства до капитального ремонта, км.

*Обобщенный показатель качества* относится к такой совокупности свойств продукции, по которой оценивается ее качество. При экономических расчетах в роли обобщенного комплексного показателя обычно выступает интегральный показатель качества.

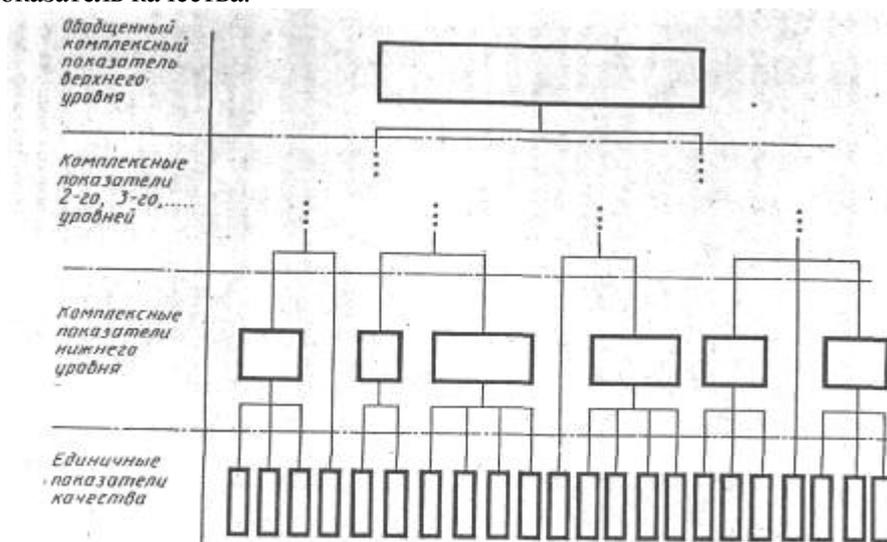


Рис. 75. Многоуровневая структура показателей качества

11. Показатели качества, как и физические величины, меняются с течением времени. В одних случаях этим изменением можно пренебречь, в других — нельзя. Качество продукции, например, снижается к концу срока ее службы, причем в течение этого периода могут быть интервалы, когда продукция не эксплуатировалась из-за неисправностей, нахождения на техобслуживании или в ремонте. Эти обстоятельства учитываются показателями надежности, к числу которых относятся показатели сохраняемости, безотказности, ремонтпригодности, долговечности и др. По своей природе они в корне отличаются от всех остальных показателей качества продукции и оперировать с ними, как с другими (включать со своими весами в формулы, приведенные на с. 193), нельзя. Один из способов учета этого показателя рассмотрим на примере.

Пример 48. Некоторые показатели качества металлорежущего станка:

Показатель качества	Числовое значение показателя качества
Годовая производительность при безотказной работе, тыс. деталей	20
Время простоев из-за отказов, %	6
Стоимость станка, тыс. руб.	50
Годовые затраты на ремонт, тыс. руб.	4
Прочие годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб.	40
Срок службы, годы	3

Годовой суммарный полезный эффект- от эксплуатации станка (количество изготавливаемых деталей) с учетом простоев из-за отказов

При сроке службы продукции более одного года интегральный показатель ее качества рассчитывается по формуле

$$K_u = \frac{P_{\Sigma}}{Z_c \cdot \aleph(t) + Z_o}$$

если ежегодный полезный эффект  $P_{\Sigma}$  и ежегодные эксплуатационные затраты  $Z_o$  остаются постоянными, срок службы составляет целое число лет, а окупаемость единовременных капитальных вложений на создание продукции  $Z_c$  учитывается поправочным множителем

$$\aleph(t) = \frac{(1 + E_n)}{\sum_{i=1}^t (1 + E_n)} = \frac{E_n (1 + E_n)^{t-1}}{(1 + E_n)^t - 1}$$

где  $E_n$  - нормативный коэффициент экономической эффективности;  $t$  - срок службы продукции. При  $E_n = 0,15$ , например, для рассматриваемого станка

$$K_u = \frac{18,8}{50 \cdot 0,381 + 44} = 0,30 \frac{\text{тыс.дет.}}{\text{руб.}}$$

Если ежегодный полезный эффект  $P_{\Sigma}$  и ежегодные эксплуатационные затраты  $Z_o$  с течением времени меняются, то

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^t P_{\Sigma_i} (1 + E_n)^i}{Z_c \cdot (1 + E_n)^t + \sum_{i=1}^t Z_{o_i} (1 + E_n)^i}$$

## 7.2. ИЗМЕРЕНИЕ КАЧЕСТВА

Итак, показатели качества в квалиметрии играют ту же роль, что физические

величины в технических измерениях. Однако значения этих показателей еще ничего не говорят об объекте измерения — качестве. Действительно, что можно сказать о качестве кокса, значения показателей качества которого приведены в примере 47, или о качестве станка в примере 48?

Высокое оно или низкое? Для того, чтобы ответить на этот вопрос, нужно, очевидно, сравнить значения их показателей качества со значениями тех же показателей качества, но какой-либо другой разновидности кокса и какого-нибудь другого металлорежущего станка. На основании сравнения можно будет сделать заключение о том, качество какого кокса или станка выше, а это уже результат измерения качества по шкале порядка. Если же удастся определить, на сколько выше, или во сколько раз, то качество будет измерено по шкале интервалов или по шкале отношений. Таким образом, одна из схем измерения качества состоит из двух этапов:

- 1) определение значений показателей качества;
- 2) сравнение значений показателей качества.

Если значения показателей качества находятся не расчетным путем, то их определение — обычная измерительная задача. Согласно разд. 2.1, она может решаться инструментальным или экспертным методом, разновидностями которого можно считать органолептический и социологический методы измерений.

*Инструментальный метод* основывается на использовании технических средств измерений. Этим методом определяется, например, масса продукции, габаритные размеры изделия, время наработки на отказ и т. п. Измерения могут выполняться по любой из измерительных шкал, но чаще всего используется шкала отношений. Инструментальный метод является наиболее распространенным во всех отраслях народного хозяйства, особенно в промышленности. В силу объективности, высокой точности и возможности автоматизации измерений, вплоть до создания гибких измерительных установок и систем, этот метод является предпочтительным и должен применяться всегда, когда это возможно и экономически оправдано.

*Экспертный метод* измерения показателей качества применяется тогда, когда использование технических средств измерений невозможно, сложно или экономически неоправдано. Очень часто к нему прибегают, например, при определении эргономических и эстетических показателей. Экспертами используются все измерительные шкалы, но чаще всего — шкалы порядка и интервалов (особенно реперные с балльной системой градации).

В *органолептическом методе* измерений в качестве первичных измерительных преобразователей используются органы чувств экспертов — зрения, слуха, обоняния, осязания и вкуса. Широкое распространение органолептический метод получил в медицине, пищевой и парфюмерной промышленности.

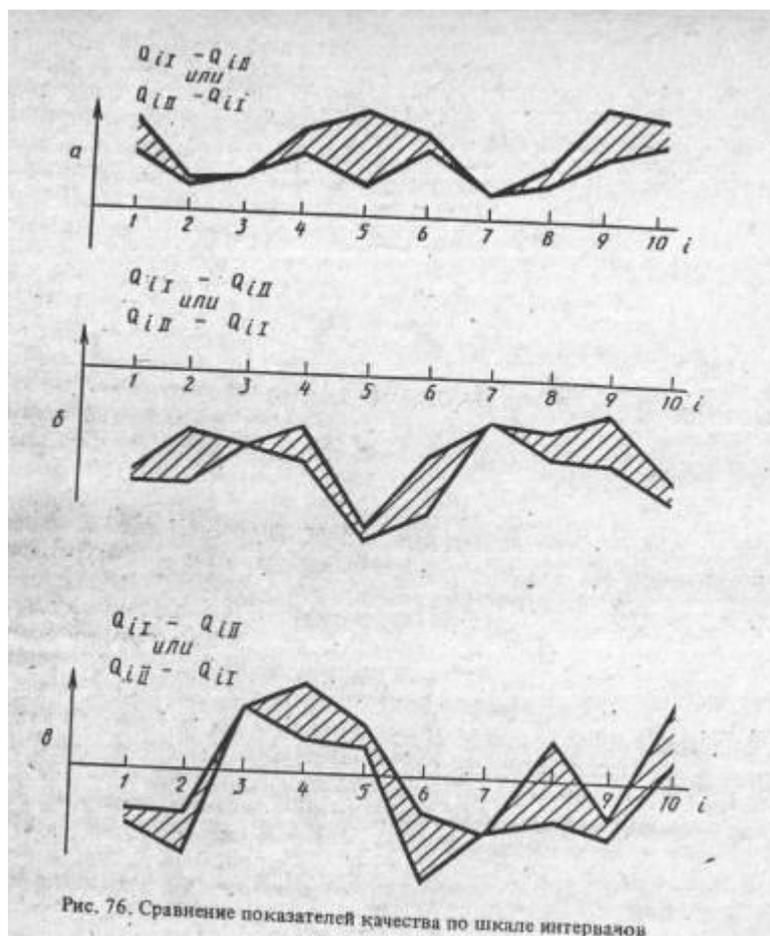
*Комбинаторный метод* измерений сочетает инструментальное и органолептическое измерение качества продукции.

*Социологический метод* измерения показателей качества строится на массовых опросах населения или отдельных его социальных групп, члены которых тем самым выступают в качестве экспертов. Опрос может проводиться путем анкетирования, интервьюирования, голосования и т. п. Этот метод требует научно обоснованных систем сбора и обработки информации, предполагающих широкое применение средств автоматизации и

вычислительной техники. Социологический метод используется для определения значений показателей качества товаров народного потребления (например, спроса), выяснения общественного мнения и т. п. С помощью измерений определяются обычно значения единичных показателей качества, и то не всегда. Патентно-правовые и экономические показатели, показатели однородности продукции, стандартизации и унификации получают расчетным путем. Посредством расчетов находят также значения комплексных показателей, хотя определение весовых коэффициентов при этом производится обычно экспертным или инструментальным методом. Во всех случаях нужно помнить, что результаты измерений являются случайными значениями показателей качества и математические действия над ними должны выполняться по правилам, рассмотренным в гл. 5. **Сравнение показателей качества, значения которых измерены или получены расчетным путем, может производиться по шкале интервалов либо по шкале отношений.** При этом нужно иметь в виду, что качество как объект измерения является многомерным. В природе такими объектами являются, например, пространство, электромагнитное поле, океаническая среда и многие другие. Ни один из этих объектов не может быть охарактеризован только одной физической величиной — мерой одного из свойств многомерного по своей природе объекта измерения. Районирование Мирового океана производится, например, по температуре, солености, электропроводности, прозрачности, освещенности, звукопроводности и целому ряду других физических, химических и физико-химических величин. Подобным же образом качество как многомерный объект измерения характеризуется множеством показателей качества, значения которых одновременно нужно сравнивать у двух сопоставляемых образцов. Ситуации, которые при этом могут возникнуть, показаны на рис. 76 и 77, где значения третьего и седьмого показателей качества получены расчетным путем без использования результатов измерений.

**При сравнении показателей качества учитывается характер их динамики. Если изменение значения показателя таково, что влечет за собой повышение качества, то при сравнении по шкале интервалов разность между исходным и сравниваемым с ним значением показателя качества берется со знаком плюс; в противном случае — со знаком минус.** При таком условии положительным результатам сравнения (рис. 76, а) соответствует повышение качества продукции или изделия по сравнению с исходным образцом, отрицательным (рис. 76, б) - снижение качества. Нулевой уровень (ось абсцисс на рис. 76) соответствует неизменному качеству. Наиболее сложным является случай, когда одни результаты сравнения оказываются положительными, а другие — отрицательными (рис. 76, в). В этом случае для вынесения однозначного решения нужно переходить к более грубой модели качества, составленной из укрупненных комплексных показателей.

**При сравнении показателей качества по шкале отношений характер их динамики учитывается следующим образом: отношение числовых значений показателей качества составляется так, чтобы при повышении качества по сравнению с исходным оно было больше единицы; при снижении качества - меньше единицы.**



Тогда при результатах сравнения, больших единицы (рис. 77, а), можно сказать, что качество продукции или образца повысилось по сравнению с исходным, при результатах сравнения, меньших единицы, — понизилось. Единичный уровень соответствует неизменному качеству. Если одни результаты сравнения больше единицы, а другие меньше (рис. 11, б), то для вынесения решения о характере изменения качества нужно переходить к сравнению комплексных показателей.

Пример 49. Определил, качество новой подкладочной ткани, сравнив ее с выпускаемой тканью арт. 33121. Значения показателей качества тканей приведены в табл. 23.

Решение. Результаты сравнения значений показателей качества по шкале отношений приведены в последнем столбце табл. 23. Они говорят о том, что качество новой ткани хуже, чем" выпускаемой. Для определения целесообразности ее производства необходимо проанализировать еще экономические показатели и узкоцелевое назначение.

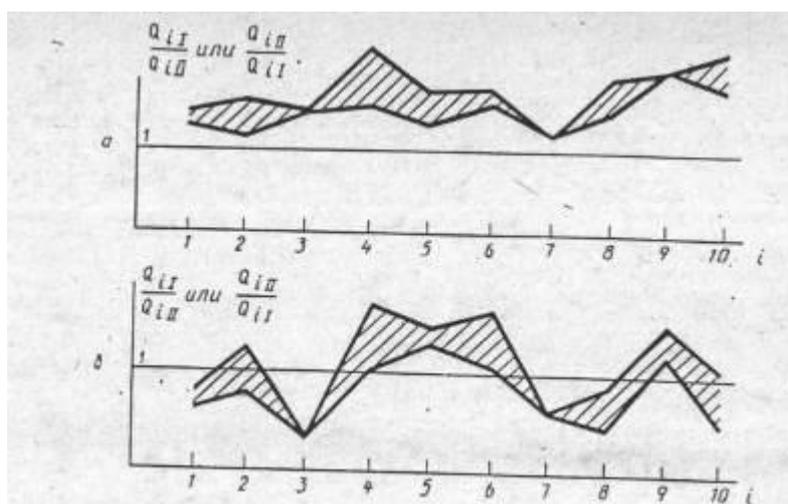


Рис. 77. Сравнение показателей качества по шкале отношений

таблица 23

Показатели качества	Числовое значение показателя качества		Результат сравнения показателей качества по шкале отношений
	Новой ткани	арт.33121	
<i>Показатели назначения</i>			
Разрывная нагрузка полоски ткани 50×200 мм:			
Основа ,Н	401,8	470,4	0,9
Уток ,Н	215,6	264,6	0,8
Усадка после стирки:			
Основа ,%	5	4,7	0,9
Уток ,%	2	1,5	0,8
Прочность к воздействию			
Пены, балл	4	5	0,8
Мыла, балл	4	5	0,8
Воды, балл	4	5	0,8
сухого трения, балл	4	5	0,8
Мокрого трения, балл	4	5	0,8
Стойкость к истиранию по плоскости, цикл	400	600	0,7
<i>Эстетические показатели</i>			
Колористическое оформление, балл	18	20	0,9
Отделка, балл	10	12	0,9
Структура, балл	7	8	0,9

Пример 50. определить соответствие одной из марок углеродистой качественной стали требованиям стандарта СЭВ. Необходимые данные приведенные в табл. 24

Показатели качества	Числовое значение показателя качества		Результат сравнения показателя качества по шкале отношений
	стали	Стандартизированное	

Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	352,8	323,4	1,1
Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup>	597,8	548,8	1,1
Относительное удлинение, %	16	16	1,0
Относительное сужение, %	40	40	1,0
Ударная вязкость, Дж/м <sup>2</sup>	6	5	1,2
Содержание серы, %	0,04	0,04	1,0
Содержание фосфора, %	0,036	0,04	1,1
Допустимое отклонение содержание углерода, %	±0,01	±0,01	1,0
Допустимое отклонение содержание кремния, %	±0,02	±0,03	1,5
Допустимое отклонение содержание марганца, %	±0,03	±0,03	1,0

Решение. Результаты сравнения значения показателей качества по шкале отношений, приведенные в последнем столбце табл. 24, свидетельствуют о том, что качество стали рассматриваемой марки выше требований стандарта СЭВ.

Пример. 51. Сравнить по качеству отечественный кокос, показатели которого приведены в примере 47, с английским, имеющим следующие значения тех же показателей:

$$S_c(A) = 1,2\%; A_c(A) = 9,8\%; M_{10}(A) = 9,8\%; M_{40}(A) = 70\%$$

Решение 1. сравнение значений показателей качества по шкале отношений дает

$$\frac{S_c(A)}{S_c} = 1,7; \frac{A_c(A)}{A_c} = 0,9; \frac{M_{10}(A)}{M_{10}} = 1,2; \frac{M_{40}(A)}{M_{40}} = 1,1$$

На основании этих данных можно предположить, что качество отечественного кокса, по – видимому, выше, но утверждать это нельзя. Тем более нельзя сказать, во сколько раз оно выше (или быть может ниже). Перйдем поэтому к сравнению обобщенных комплексных показателей.

2. для английского кокса обобщенный комплексный показатель качества. Введенный в пример 47,

$$\hat{Q}_A = -0,2 \cdot 0,012 - 0,02 \cdot 0,098 - 0,03 \cdot 0,098 + 0,013 \cdot 0,7 = 1,8 \cdot 10^{-3}$$

Таким образом, качество отечественного кокса в 2 раза выше английского, так как обеспечивает вдвое большую производительность доменной печи.

В примерах 49 и 50 измерение качества производилось по принципу „выше — ниже“, т. е. по шкале порядка. Схема такого малоинформативного измерения качества может быть гораздо более простой и состоять не из двух, а из одного только второго этапа, так как в определении значений показателей качества нет необходимости: достаточно знать, что они больше или меньше соответствующих значений, характеризующих выбранный для сравнения образец. Одинаковые значения показателей качества при этом могут вообще не учитываться. Это правило формулируется следующим образом: для **измерения качества по шкале порядка достаточно сравнить значения только отличающихся показателей** качества. Применение этого правила значительно (иногда в десятки раз) снижает трудоемкость измерения качества по сравнению с затратами труда, которых требует применение других шкал.

Измерение качества по шкале интервалов или по шкале отношений более информативно и позволяет получить ответы на вопросы „на сколько?“ или „во сколько раз?“ качество чего-то одного выше (или ниже) качества другого. Для этого нужно сравнить (соответственно по шкале интервалов или по шкале отношений, как в примере 51) значения обобщенных комплексных показателей. Обычно такое сравнение производится для выработки сигнала управления качеством, пропорционального разности или отношению значений обобщенных показателей.

**Измерение качества' по шкале отношения возможно только в том случае, когда значения всех показателей качества определены по шкале отношений. Если хотя бы одно из них определено по шкале интервалов, качество может быть измерено только по шкале интервалов. Если хоть один показатель качества измерен по шкале порядка, измерение качества возможно только по шкале порядка.**

Результат измерения качества зависит от выбора исходного образца для сравнения. Если качество исходного образца низкое, то чуть более высокое по сравнению с ним все равно будет низким, и наоборот, Таким образом, при произвольном выборе исходного образца можно получить представление о качестве лишь по отношению к нему. В абсолютном понимании это представление может оказаться заниженным или завышенным. В то же время нельзя преднамеренно выбирать исходный образец очень высокого или очень низкого качества. В первом случае это приведет к неоправданным, а потому ненужным затратам на еще большее повышение качества изделий, а во втором — не будет стимулировать должных темпов роста качества продукции. И то и другое не соответствует общественной потребности. Поэтому задача правильного выбора исходного (его называют базовым или эталонным) образца носит в квалиметрии сложный характер и налагает большую ответственность.

Эталонные образцы, называемые эталонами качества или просто эталонами, по своему назначению делятся на три группы:

*эталон, отражающий достигнутый уровень качества* (в отрасли, в народном хозяйстве, в мире, наивысший достигнутый уровень у нас в стране или за рубежом и т. п.). Основное назначение этих эталонов — оценка качества серийной продукции при ее аттестации и присвоении категории или государственного Знака качества;

*эталон, отражающий перспективный уровень качества.* Они носят опережающий характер, призваны стимулировать научно-технический прогресс. Эти эталоны используются при разработке и выдаче технических заданий, составлении рабочих и технических проектов, направленных на

достижение прогнозируемых показателей качества продукции:

*специальные эталоны*, предназначенные для решения частных задач: определения и анализа динамики качества, сопоставления отдельных комплексных показателей и т. д.

Показатели качества эталона (единичные и комплексные), используемые для сравнения, называются *базовыми*. Выбор эталона и базовых показателей качества для обеспечения единства измерений должен быть закреплен нормативным документом: отечественным или международным стандартом, техническими условиями и т. п. "Быстрые темпы научно-технического прогресса обуславливают необходимость систематического пересмотра значений базовых показателей. Срок действия эталона, как правило, не должен превышать одного — трех лет.

В разд. 7.1 отмечалось, что в конкретных образцах продукции повышение одних показателей качества нередко достигается за счет снижения других. Низкие показатели надежности компенсируются высокими эстетическими показателями, высокие показатели транспортабельности обуславливают снижение показателей назначения и т. д. Нельзя поэтому в качестве значений базовых показателей устанавливать наивысшие значения показателей качества, достигнутые в разных образцах продукции: такое их сочетание будет недостижимым. **В качестве эталона должен утверждаться реальный образец, а в качестве значений базовых показателей — значения его показателей качества. Сравнить при измерении качества нужно образец с образцом (по всей номенклатуре показателей), а не значения отдельных показателей качества со значениями, относящимися к разным эталонам.** Это правило остается в силе и в том случае, когда совокупность значений, относящихся к разным эталонам, является реальной. Нельзя, например, для одних свойств изделия считать базовыми значения показателей качества, установленные перспективным стандартом, для других — достигнутые в развитых капиталистических странах, для третьих — среднеотраслевые значения показателей. В лучшем случае качество при этом может быть измерено только по шкале порядка. Необходимым условием измерения качества по шкале отношений является утверждение единого эталона качества и полной номенклатуры его показателей.

Если считать представление о нулевом качестве интуитивно понятным и не нуждающемся в регламентации, то утверждение эталона качества **устанавливает масштаб на шкале отношений** и делает возможным измерение **качества в абсолютной мере**. Однако здесь его особенность, **характерная** только <sup>1</sup> для квалиметрии. Состоит она в том, что абсолютные значения показателей качества не подходят для измерения качества в абсолютной мере. С **одними из** них качество связано прямо пропорциональной зависимостью, а с другими — обратно пропорциональной. Поэтому для абсолютного **измерения качества** используются не абсолютные, а **относительные** показатели (примеры их приведены в табл. 23 и 24), правило образования которых обеспечивает прямо пропорциональную зависимость качества от их значений.

Так как относительных показателей много, то ломаная линия, соединяющая их значения, образует некоторый *уровень*, который может быть выше или ниже эталонного, либо пересекаться с ним — рис. 78. *Эталонный уровень*, соответствующий значениям базовых показателей, является прямой линией, параллельной оси абсцисс и пересекающей ось ординат в точке  $(0;1)$ . Таким образом, эталонное качество выступает в роли безразмерной

**единицы, с которой сравнивается качество продукции.** Если все значения ее относительных показателей больше единицы, то качество продукции выше эталонного, если меньше — то ниже. Если часть значений относительных показателей больше, а часть меньше единицы, а также в случае, когда качество продукции нужно выразить в абсолютной мере одним числом (которое будет означать, во сколько раз это качество выше или ниже эталонного), объединяют относительные показатели в обобщенный комплексный показатель качества.



Комплексирование относительных показателей качества производится по тем же, правилам, что и абсолютных (см. разд. 7.1, с. 193, примеры 47 и 51). Так, если в примере, показанном на рис. 78, обобщенный комплексный показатель качества находится как среднее арифметическое относительных показателей, то его абсолютное значение будет равно 1,2. С учетом весовых коэффициентов, которые по-разному влияют на ординаты относительных показателей, это значение, конечно, **изменится**. Изменится оно и при другом правиле вычисления комплексного показателя. Но если абсолютные и относительные показатели комплексуются одинаковыми весами и по одним и тем же правилам, то порядок их ранжирования не меняется

Пример 52. Оценить качество цифрового вольтметра по данным, приведенным в табл. 25

Показатели качества	Числовое значение показателя качества		Значение относительно показателя качества	Коэффициент весомости, экспертным методом
	вольтметра	эталона		
Класс точности	М	М	1,00	0,25
Быстродействие, ме	0,3...1000	0,8...2000	0,715...0,5	0,04...0,06
Чувствительность, мкВ	10	10	1,00	0,15
Входное сопротивление, Мом	2000	2500	0,80	0,10

Напряжение питания:

Диапазон, В	200±10%	220±6%	1,67	0,05
Частотный диапазон, Гц	50±1,5%	50±1,5%	1,0	0,05
Стабильность во времени	0,001	0,001	1,0	0,03
Температурный диапазон, °С	0...50	0...50	1,0	0,05
Время безотказной работы, ч	320	320	1,0	0,10
Габаритные размеры, мм	530×210×43	491×223×40	0,9	0,03
Масса, кг	0	4	0,66	0,02

Решение. Часть значений относительных показателей качества больше или равно единице, а часть меньше. Определим поэтому обобщенный комплексный показатель качества.

По формуле среднего взвешенного арифметического

$$\hat{Q} = 1 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,07 + 0,715 \cdot 0,04 + 0,5 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,15 + 0,8 \cdot 0,1 + 1,67 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,01 + 0,9 \cdot 0,03 + 0,66 \cdot 0,02 = 0,96.$$

По формуле среднего взвешенного геометрического

Таким образом, качество вольтметра хотя и незначительно, но ниже качества эталона.

$$\bar{Q} = 1^{0,25} \cdot 0,715^{0,04} \cdot 1^{0,07} \cdot 0,5^{0,06} \cdot 1^{0,15} \cdot 0,8^{0,1} \cdot 1,67^{0,05} \cdot 1^{0,05} \cdot 1^{0,03} \cdot 1^{0,05} \times \\ \times 1^{0,1} \cdot 0,9^{0,03} \cdot 0,66^{0,02} = 0,94$$

При широкой номенклатуре показателей сведение их к одному единственному показателю качества сопряжено с большой потерей информации. Чтобы избежать этого, из общего числа показателей выбирают те, которые характеризуют качество с какой-нибудь одной стороны (эстетической, экономической или другой). С помощью таких показателей определяются, например, уровень качества изготовления продукции, ее нормативный, технический и технико-экономический уровни.

*Уровень качества изготовления продукции* — это характеристика ее качества, устанавливающая степень соответствия фактических значений показателей качества изготовленной продукции (до начала эксплуатации) требованиям нормативно-технических документов.

*Нормативный уровень качества продукции* используется при решении всевозможных правовых вопросов.

*Технический уровень* формируется такой совокупностью показателей качества продукции, в которую не входят экономические (см. пример! 47, 49 ... 52). Как правило, этот уровень определяется для сопоставления продукции с зарубежными образцами. Связано это с тем, что значения экономических показателей отечественной продукции сравнивать с

зарубежными иногда затруднительно, так как очень часто зарубежные экономические показатели разработки, изготовления и эксплуатации продукции вовсе неизвестны.

Наиболее широкой и обобщенной характеристикой качества продукции является ее *технико-экономический уровень*, включающий экономические показатели. Он используется при определении категории качества в системе аттестации продукции.

Уровень качества может характеризоваться как всей совокупностью выбранных показателей, так и обобщенным групповым.

**Пример 53. Определить технико-экономический уровень улучшенной модификации металлорежущего станка, сравнив его с базовой моделью (пример 48). Станок улучшенной модификации имеет следующие показатели качества:**

Показатель качества	Числовое значение
Годовая производительность при безотказной работе, тыс. деталей	20
Время простоев из-за отказов, %	3
Стоимость станка, тыс. руб.	200
Годовые затраты на ремонт, тыс.руб.	2
Прочие годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб.	40
Срок службы, годы	12

Решение. Годовой суммарный полезный эффект от эксплуатации новой модификации станка

$$P'_2 = 20(1 - 0,03) = 19,4 \text{ тыс. дет.}$$

Принимая, как раньше  $E_n = 0,15$ , найдем, что интегральный показатель качества, модифицированного станка

$$K'_u = \frac{19,4}{200 \cdot 0,16 \cdot 42} = 0,26 \frac{\text{тыс.дет.}}{\text{руб.}}$$

Таким образом, новый станок хотя и обладает улучшенными технико-эксплуатационными характеристиками, но менее выгоден, чем базовая модель.

Групповые показатели наряду с не вошедшими в группы используют-<ся для измерения качества на более высоком уровне обобщения.

Пример 54. Определить качество грохота ГЦЛ по данным, приведенным в табл. 26.

Показатели качества	Числовые значения показателя		Значение относительного показателя качества
	ГЦЛ	эталон	
Производительность, W, т/ч	630	700	0,90

Срок службы до первого капитального ремонта $T_{cp}$ , мес.	10,5	11	0,95
Наработка на отказ $T_0$ , ч.	550	500	1,10
Среднее время восстановления $T_в$ , ч.	3,5	4	1,14
Количество отказов $\mu$	12	14	1,17
Коэффициент технического использования $K_{и}$	0,984	0,990	0,99
Оптовая цена $C_1$ , руб.	3200	3500	1,13
Средняя стоимость одного часа эксплуатации $C_2$ , руб.	0,40	0,45	1,14
Средняя стоимость одного простоя из-за ремонта $C_3$ , руб.	500	560	1,12
Отношение площади просеивающей поверхности к общей площади грохота	0,9	0,8	1,12
Уровень шума, дБ. (допустимый уровень шума 90 дБ)	87	84	0,97

**Решение.** Некоторые значения относительных показателей больше, а некоторые - меньше единицы. Выделим в связи с этим группу из первых девяти показателей качества и определим по ним технико-экономический уровень грохота ГЦЛ, используя интегральный показатель качества

$$I = \frac{W \cdot T_{cp} \cdot K_{и}}{C_1 + C_2 K_{и} T_0 - C_3 T_в}$$

Подставляя в эту формулу значения показателей качества из табл. 26, получим

$$I_{гцл} = 152 \frac{T}{руб.}$$

$$I_{эт} = 128 \frac{T}{руб.}$$

Теперь можно сказать, что уровень качества грохота ГЦЛ определяется следующими тремя относительными показателями:

технико-экономическим  $q_{т-э} = I_{гцл} / I_{эт} = 1,19$ ;

техническим  $q_{т} = 1,12$ ;

эргономическим  $q_э = 0,97$ .

**В принципе эти показатели можно объединить в один - обобщенный, но в то же время нетрудно заметить, что хотя значение последнего из них меньше единицы, это не является определяющим, так как уровень шума грохота ГЦЛ не превышает допустимый. Поэтому можно сразу заключить, что качество грохота ГЦЛ выше качества эталона.**

Использование интегральных показателей качества иногда вызывает затруднение из-за того, что для отдельных видов продукции (таких, например, как предметы домашнего обихода, украшения и т. п.) сложно определить величину полезного эффекта. В этих случаях поступают следующим образом. Условно принимают интегральный показатель качества эталона равным единице. Тогда из определения интегрального показателя (см.. пример 48) следует, что

$$P_{\Sigma_0} = Z_{c,0} \alpha(t) + Z_{3,0}$$

У нового образца  $m$  свойств, измеряемых субъективно экспертным методом, и  $n$  свойств, измеряемых объективно инструментальным методом, отличаются от подобных им свойств эталона. Если эти отличия невелики, то их можно учесть поправками  $\Theta_i$  и  $\Theta_j$  к полезному эффекту

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma_0} + \sum_{i=1}^m \Theta_i + \sum_{j=1}^n \Theta_j$$

Поправки находятся из соотношений:

$$a_i = \frac{\Theta_i}{P_{\Sigma}}; \beta_j = \frac{Q_{j0} - Q_j}{Q_{j0}} \cdot \frac{\Theta_j}{P_{\Sigma}}$$

где  $a$  и  $\beta$  определяются экспертным методом, а  $Q_j$  и  $Q_{j0}$  измеряются инструментально. С учетом этих соотношений

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma_0} \left( 1 + \sum_{i=1}^m a_i + \sum_{j=1}^n \frac{Q_{j0} - Q_j}{Q_{j0}} \beta_j \right)$$

Если значение интегрального показателя качества новой продукции

$$K_u = \frac{P_{\Sigma}}{Z_{c,0} \alpha(t) + Z_{3,0}}$$

получается по этой методике расчета больше единицы, то качество ее выше эталонного, если меньше - то ниже.

Пример 55. Сравнительные данные двух домашних холодильников приведен\* в табл. 27. Новый холодильник отличается лучшими эстетическими показателями за счет современной формы и внешнего оформления. Эргономические показатели его также выше из-за наличия автоматического устройства для оттаивания и удаления накопившегося льда.

Дать сравнительную оценку качества холодильников.

Показатели качества	Числовое значение показателя качества холодильника	
	нового	старого
Объем холодильной камеры, л	150	120
Объем морозильной камеры, л	16	11
Средний срок службы, лет	12	10

Стоимость холодильника, руб.	250	200
Годовые эксплуатационные затраты, руб.	18	15

**Решение.** Суммарный полезный эффект от эксплуатации старого холодильника

$$P_{\Sigma_{cm}} = 200 \cdot 0,173 + 15 = 49,6 \text{ руб.}$$

Предположим, что экспертным методом установлены:

- 1) коэффициент, учитывающий улучшение эстетических показателей  
 $a_1 = 0,05$ ;
- 2) коэффициент, учитывающий улучшение эргономических показателей  
 $a_2 = 0,07$ ;
- 3) весовой коэффициент увеличения на 30 л объема холодильной камеры  
 $\beta_1 = 0,6$ ;
- 4) весовой коэффициент увеличения на 5 л объема морозильной камеры  
 $\beta_2 = 0,4$ .

С учетом этого суммарный полезный эффект от эксплуатации нового холодильника составит

$$P_{\Sigma} = 49,6(1 + 0,05 + 0,07 + \frac{30}{120} \cdot 0,6 + \frac{5}{11} \cdot 0,4) = 72 \text{ руб.}$$

а интегральный показатель его качества

$$K_u = \frac{72}{250 \cdot 0,16 + 18} = 1,24$$

Следовательно, уровень качества нового холодильника на 24 % выше, чем старого.

Измерение качества в абсолютном выражении позволяет решать многие народнохозяйственные задачи, связанные с оценкой качества разнородной продукции. Такие задачи возникают при анализе работы министерств и ведомств, территориально-производственных и агропромышленных комплексов, научно-производственных объединений и отдельных предприятий, выпускающих разнородную продукцию, при подведении итогов социалистического соревнования в районном, городском, областном, республиканском и всесоюзном масштабе и т. д.

Представим, например, что нужно оценить качество продукции, выпускаемой предприятиями отдельного района. На территории района находятся ткацкая фабрика, мясомолочный комбинат, авторемонтные мастерские и завод по производству химических удобрений. Продукция этих предприятий несопоставима, но имеет общую характеристику — качество. Качество выпускаемой фабрикой ткани (см., например, табл. 23) может быть измерено путем сравнения ее обобщенного комплексного показателя с базовым, либо путем объединения в обобщенный комплексный показатель 1 единичных относительных показателей качества. Аналогично может быть измерено качество продукции других предприятий. Объединение полученных показателей в обобщенный, характеризующий в целом качество продукции, выпускаемой в этом районе, производится по принципу среднего взвешенного. Весовые коэффициенты при этом определяются по формуле

$$g_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i}$$

где  $C_i$  — объем производства продукции каждого вида в денежном выражении,  $n$  — количество видов разнородной продукции (ткань, мясо, молоко и т. д.).

Следуя дальше по этому пути, можно измерить качество продукции, выпускаемой в области (включающей несколько районов), в городе, в республике, в целом в народном хозяйстве СССР. Результаты измерения качества используются при подведении итогов народнохозяйственной деятельности и выработке управленческих решений.

### 7.3. ЭКСПЕРТНЫЙ МЕТОД

В квалиметрии экспертный метод применяется: 1) для измерения показателей качества, 2) для определения значений весовых коэффициентов. Однако он не является принадлежностью только квалиметрии. Экспертный метод применяется и при измерении физических величин, в медицине (консилиумы), в искусстве (жюри), в социально-политической сфере (референдумы), в государственном и хозяйственном управлении (коллегиальность). Но именно потребности квалиметрии поставили этот метод измерений на строгую научную основу.

Независимо от целей и задач применение экспертного метода предполагает соблюдение следующих условий:

экспертная оценка должна производиться только в том случае, когда нельзя использовать для решения вопроса более объективные методы; в работе экспертной комиссии не должно быть факторов, которые могли бы влиять на искренность суждений экспертов; мнения экспертов должны быть независимыми;

вопросы, поставленные перед экспертами, не должны допускать различного толкования;

эксперты должны быть компетентны в решаемых вопросах; количество экспертов должно быть оптимальным;

ответы экспертов должны быть однозначными и обеспечивать возможность их математической обработки.

**Качественный состав экспертной комиссии — важное условие эффективности экспертного метода.** Вполне очевидно, что во всех без исключения случаях экспертиза должна проводиться грамотными, высококвалифицированными, вполне компетентными в рассматриваемых вопросах и достаточно опытными специалистами. Весьма полезным является их специальное предварительное обучение и совершенно необходимым — инструктаж. На завершающем этапе формирования экспертной группы целесообразно провести тестирование, самооценку, взаимооценку экспертов, анализ их надежности и проверку согласованности мнений.

*Тестирование* состоит в решении экспертами задач, подобных реальным, с известными (но не экспертам) ответами. На основании результатов тестирования устанавливается компетентность и профпригодность экспертов.

*Самооценка* экспертов состоит в ответе каждым из них в строго ограниченное время на вопросы специально составленной анкеты, в результате чего быстро и просто проверяются ими же самими их

профессиональные знания и деловые качества. Оценка их дается каждым экспертом по балльной системе. При всей субъективности такой оценки опыт показывает, что экспертные группы с высокими показателями самооценки экспертов ошибаются в меньшей степени.

Весьма показательной является *взаимная оценка экспертами друг друга* (также по балльной системе). Для этого они должны, разумеется, иметь опыт совместной работы.

При наличии сведений о результатах работы эксперта в других экспертных группах критерием его квалификации может стать *показатель* или *степень надежности* — отношение числа случаев, когда мнение эксперта совпало с результатами экспертизы, к общему числу экспертиз, в которых он участвовал. Использование этого подхода к отбору экспертов требует накопления и анализа большого объема информации, но открывает возможность непрерывного совершенствования качественного состава экспертных групп.

Каждый эксперт дает одно из значений отсчета, являющегося, согласно основному постулату метрологии, случайным числом. Порядок и правила дальнейших действий рассмотрены в гл. 3 и 5. В частности, однократное измерение экспертным методом требует использования большого объема априорной информации. При визуальной топографической съемке, например, большое значение имеет глазомер эксперта, при измерении эстетических показателей качества — его художественный вкус и т. д. Многократное измерение одной той же физической (или другой) величины постоянного размера, либо показателя качества может быть организовано с последующим усреднением экспериментальных данных во времени (если измерение выполняется одним экспертом) или по множеству (если измерение производится одновременно несколькими экспертами). Первый способ применяется редко, так как субъективные особенности эксперта выступают в этом случае в качестве постоянно действующих факторов, трудно поддающихся исключению, компенсации или учету. Во втором способе они выступают в качестве случайных и нивелируются при усреднении по множеству. Отсчет, полученный группой экспертов, представляется множеством его отдельных значений или законом распределения вероятности. При большом количестве отдельных значений отсчета по правилу „трех сигм“ легко обнаруживаются и устраняются ошибочные. Если отсчет подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то его среднее арифметическое при количестве экспертов  $n > 30 \dots 40$  тоже подчиняется нормальному закону, а при меньшем их числе — закону распределения вероятности Стьюдента. Интервал возможных значений измеряемой величины или показателя качества в окрестностях среднего арифметического значения с выбранной доверительной вероятностью устанавливается по графикам, приведенным на рис. 45.

При подборе экспертов большое внимание уделяется *согласованности их мнений*, которая характеризуется смещенной или несмещенной оценкой дисперсии отсчета. С этой целью на этапе формирования экспертной группы проводятся контрольные измерения с математической обработкой их результатов. Нередко при этом используется не один, а сразу несколько объектов измерений, которые в зависимости от их ценности или качества нужно расставить по шкале порядка, т. е. определить их ранг, ибо измерение по шкале порядка называется ранжированием. За меру согласованности" мнений экспертов в этом случае принимается так называемый *коэффициент конкордации*

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)}$$

где  $S$  - сумма квадратов отклонений суммы рангов каждого объекта экспертизы от среднего арифметического рангов,  $n$  — число экспертов,  $m$  — число объектов экспертизы. В зависимости от степени согласованности мнений экспертов коэффициент конкордации может принимать значения- от 0 (при отсутствии согласованности) до 1 (при полном единодушии).

Пример 56. определить степень согласованности мнений 5-ти экспертов ранжирования которыми 7-ми объектов экспертизы приведены в табл.28

Таблица 28

Номер объекта экспертизы	оценка эксперта					Сумма рангов	Отклонение от среднего арифметического	Квадрат отклонения от среднего арифметического
	1	2	3	4	5			
	-	-	-	-	-			
	г	г	г	г	г			
	о	о	о	о	о			
1	4	6	4	4	3	21	1	1
2	3	3	2	3	4	15	-5	25
3	2	2	1	2	2	9	11	121
4	6	5	6	5	6	28	8	64
5	1	1	3	1	1	7	-13	169
6	5	4	5	6	5	25	5	25
7	7	7	7	7	7	35	15	225

Решение. 1. Среднее арифметическое рангов

$$\frac{21 + 15 + 9 + 28 + 7 + 25 + 35}{7} = 20$$

2. Используя результаты промежуточных вычислений, приведенные в табл. 28, получаем

$$S = 630.$$

3. Коэффициент конкордации

$$W = \frac{12 \cdot 630}{25(343 - 7)} = 0,9$$

Степень согласованности мнений экспертов можно считать удовлетворительной.

Если степень согласованности мнений экспертов оказывается неудовлетворительной, принимают специальные меры для ее повышения. Сводятся они, в основном, к проведению тренировок с обсуждением результатов и разбором ошибок. Если возможности для предварительной подготовки экспертов нет, измерение экспертным методом проводится по *методу Дельфы\**. Характерными чертами этого метода являются:

анонимность; эксперты не встречаются друг с другом, чтобы избежать влияния авторитета и красноречия кого-либо из них;

многоэтапность; после каждого тура опроса все эксперты знакомятся с мнениями друг друга и при необходимости представляют письменные обоснования своих точек зрения. Соглашаясь или не соглашаясь с мнениями своих коллег, они могут пересматривать свою точку зрения;

контроль; после каждого тура проверяется согласованность мнений экспертов до тех пор, пока разброс отдельных мнений не снизится до 1 ранее

выбранного значения.

При особо ответственных измерениях экспертным методом могут вчитываться весовые коэффициенты квалификации экспертов.

**Количество экспертов тоже играет важную роль.** С ростом числа экспертов в группе точность измерения повышается. Это фундаментальное свойство. Любого многократного измерения определено выражением (11). Чтобы воспользоваться им для определения численности экспертной группы и, обеспечивающей заданную точность измерения, нужно опять-таки подготовительный период установить закон распределения вероятности отчета, получаемого экспертным методом, или хотя бы его среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$ , не зависящие от  $n$ . Тогда по графику на рис. 79, сразу же зависимость (11), можно найти число экспертов  $n$ , при ко-

\* Это метод впервые был предложен в начале 1950-х г. американскими учеными Т. Дж. Гордоном и О. Хелмером для решения военных проблем. Название его происходит от древнегреческого города Дельфы, где по преданию при храме Ашюлона IX в. до н. э. по IV в. н. э. существовал совет мудрецов (.дельфийский оракул"), давившийся своими предсказаниями.

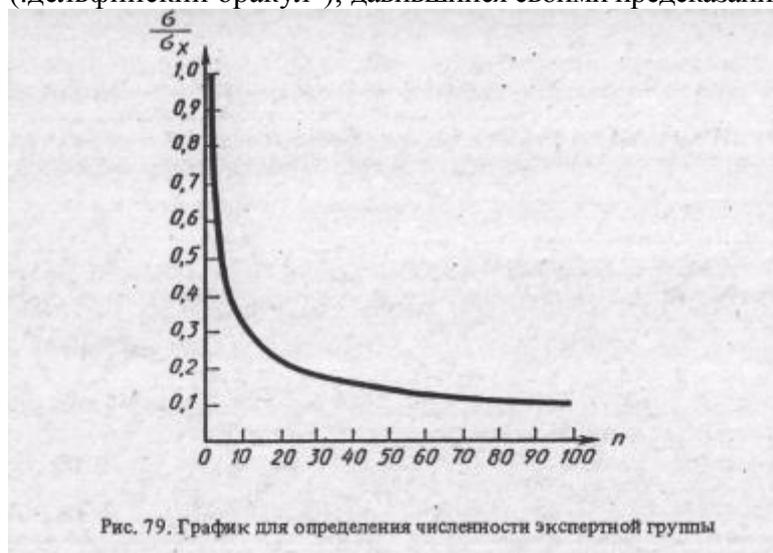


Рис. 79. График для определения численности экспертной группы

тором среднее квадратическое отклонение среднего арифметического  $\sigma$  будет соответствовать требуемому. Исходная численность экспертной группы составляет обычно не менее 7 человек. В отдельных случаях она достигает 15 ... 20 экспертов (массовый опрос проводится, как правило, только при социологических исследованиях). Если в подготовительный период  $a_x$  не определено, то достижение требуемой точности за счет расширения экспертной группы достигается уже в процессе измерения экспертным методом так, как это показано на рис. 46.

В некоторых случаях требуется обеспечить максимально возможную точность измерения экспертным методом. В этих случаях состав экспертной группы целесообразно ограничить таким числом экспертов  $n$ , при котором различие между средними арифметическими и оценками дисперсий результатов измерений при  $n$  и  $n + 1$  экспертах перестает быть значимым. Это условие проверяется по алгоритмам, приведенным на рис. 48 и 50.

По тому, в какой форме эксперты выражают свое мнение, т. е. по способу проведения экспертизы, различают:  
непосредственное измерение;  
ранжирование;

сопоставление.

При *непосредственных измерениях* экспертным методом значения физических величин или показателей качества определяются сразу в установленных единицах (то ли в единицах СИ, то ли в баллах, нормо-часах, рублях, единицах условного топлива и т. д.). Такие измерения могут по шкале отношений, так и по шкале интервалов или шкале ряда. Измерения по шкале отношений требуют наличия эталонов. К относятся органолептические методы измерения длины, массы, силы света и многие другие. Непосредственное измерение весовых коэффициентов, сумма которых должна равняться единице, производится по шкале

$$\text{интервалов. Значения } g_j = \frac{\sum_{i=1}^n G_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m G_{i,j}} \quad (43)$$

этих коэффициентов рассчитываются по формуле

где  $n$  — количество экспертов,  $m$  — число „взвешиваемых показателей,  $G_{ij}$  — коэффициент весомости  $i$ -го показателя в баллах, данный  $j$ -м экспертом.

По реперным шкалам интервалов измеряется в баллах сила морского волнения, сила землетрясений и т. п. Непосредственно путем приписывания баллов (обычно от 1 до 10) могут измеряться по шкале порядка и такие свойства, для которых нет ни эталонов, ни объективных критериев. В последнем случае из соотношения баллов сложным нельзя делать каких-либо количественных выводов.

Непосредственное измерение экспертным методом является и

*Ранжирование* состоит в расстановке объектов измерений или показателей в порядке их предпочтения, по важности или весомости. Место занятое при такой расстановке, называется рангом. Чем выше ранг, тем предпочтительней объект, весомее, важнее показатель.

Пример ранжирования пятью экспертами семи объектов экспертизы приведен в табл. 28. Если это, допустим, художественные произведения, то результат измерения их качества по шкале порядка таков: лучшим является седьмое, вторым по качеству - четвертое, затем - шестое, первое, второе, третье и пятое. Если же ранжирование проводилось с целью определения весовых коэффициентов  $g_j$  для семи показателей качества, то они рассчитываются по формуле (43), в которой  $G_{ij}$  — ранг  $j$ -го показателя, установленный  $i$ -м экспертом. В примере 56

$$g_1 = \frac{21}{140} = 0,15; \quad g_2 = \frac{15}{140} = 0,11 \quad g_3 = \frac{9}{140} = 0,06 \quad g_4 = \frac{28}{140} = 0,2 \quad g_5 = \frac{7}{140} = 0,05$$

$$g_6 = \frac{25}{140} = 0,18 \quad g_7 = \frac{35}{140} = 0,25 \quad \sum_{j=1}^7 g_j = 1.$$

Сопоставление бывает последовательным и попарным.

*Последовательное сопоставление* каждого объекта экспертизы с совокупностью всех тех, которые ниже рангом, позволяет откорректировать ранжированный ряд, уточнить позиции входящих в него объектов с учетом их важности. Оно имеет смысл тогда, когда несколько объектов экспертизы можно рассматривать как один составной объект той же природы. Порядок последовательного сопоставления следующий.

1. Объекты экспертизы располагаются в порядке их предпочтения (ранжирование).
2. Наиболее важному объекту приписывается балл или весовой коэффициент, равный 1, всем остальным в порядке уменьшения их относительной значимости — баллы или

весовые коэффициенты от 1 до 0.

3. Сопоставляется первый объект с совокупностью всех остальных. Если по мнению эксперта он предпочтительнее, чем совокупность всех остальных вместе взятых, то результат его измерения в баллах или весовой коэффициент корректируется в сторону увеличения с таким расчетом, чтобы он стал больше (иногда определяют и на сколько больше) суммы баллов или весовых коэффициентов всех остальных объектов экспертизы, которые ниже рангом. В противном случае результат измерения или весовой коэффициент первого объекта корректируется в сторону уменьшения так, чтобы он оказался меньше суммы баллов или весовых коэффициентов остальных объектов.

4. Сопоставляется второй объект с совокупностью всех остальных, стоящих ниже рангом. По установленному выше правилу корректируется результат его измерения или значение весового коэффициента (при этом нужно следить, чтобы не нарушилось предпочтение первого объекта перед совокупностью всех остальных, если оно установлено на предыдущем этапе). Такая процедура сопоставлений и корректировок продолжается вплоть до предпоследнего объекта.

5. Полученные результаты измерений или весовые коэффициенты нормируют, т. е. делят на общую сумму баллов или весовых коэффициентов. После этого они принимают значения в пределах от 0 до 1, а их сумма становится равной 1.

*По парное сопоставление*, самое простое и наиболее оправданное с психологической точки зрения, рассмотрено в примерах 3 и 4. Как можно заметить, табл. 5 и 6 являются избыточными. При по парном сопоставлении достаточно данных, приведенных в таблицах по одну сторону от диагонали. Предпочтение при этом выражается указанием номера предпочтительного объекта так, как это показано в табл. 29.

Таблица 29

Номер объекта экспертизы	1	2	3	4	5	6
1	x	1	3	1	1	1
2		x	3	2	2	2
3			x	3	3	3
4				x	5	6
5					x	6
6						x

Балл  $j$ -го объекта или весомость  $j$ -го показателя рассчитывается по формуле (43). В данном случае

$$G_{ij} = \frac{F_{ij}}{C}$$

где  $F_{ij}$  - частота предпочтения  $i$ -м экспертом  $j$ -го объекта экспертизы;  
 $C$  — общее число суждений одного эксперта, связанное с числом объектов экспертизы  $m$  (числом измеряемых показателей или коэффициентов весомости) соотношением

$$C = \frac{m(m-1)}{2}$$

Пример 57. Предположим для простоты, что пять экспертов выразили свое мнение о шести объектах экспертизы одинаково: так, как это представлено в табл. 29. Определить весомость каждого объекта и построить ранжированный ряд. ' Решение. 1. Частоты предпочтений

$$F_{i1} = \frac{4}{5} = 0,8 \quad F_{i2} = \frac{3}{5} = 0,6 \quad F_{i3} = \frac{5}{5} = 1 \quad F_{i4} = \frac{0}{5} = 0 \quad F_{i5} = \frac{1}{5} = 0,2 \quad F_{i6} = \frac{2}{5} = 0,4$$

2. Общее число суждений каждого эксперта

$$C = \frac{6(6-1)}{2} = 15$$

3. Балл или весомость каждого объекта экспертизы, по общему мнению, всех экспертов

$$G_1 = \frac{0,8}{15} + \frac{0,8}{15} + \frac{0,8}{15} + \frac{0,8}{15} + \frac{0,8}{15} = 0,27$$

$$G_2 = \frac{0,6}{15} + \frac{0,6}{15} + \frac{0,6}{15} + \frac{0,6}{15} + \frac{0,6}{15} = 0,20$$

$$G_3 = \frac{1}{15} + \frac{1}{15} + \frac{1}{15} + \frac{1}{15} + \frac{1}{15} = 0,33$$

$$G_4 = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0$$

$$G_5 = \frac{0,2}{15} + \frac{0,2}{15} + \frac{0,2}{15} + \frac{0,2}{15} + \frac{0,2}{15} = 0,07$$

$$G_6 = \frac{0,4}{15} + \frac{0,4}{15} + \frac{0,4}{15} + \frac{0,4}{15} + \frac{0,4}{15} = 0,13$$

4. Сумма

$$\sum_{j=1}^m G_j = 0,27 + 0,2 + 0,33 + 0 + 0,07 + 0,13 = 1$$

Поэтому полученные 'в п. 3 значения  $G_j$  можно рассматривать уже как нормированные  $n$ , в частности, использовать как весовые коэффициенты.

5. Ранжированный ряд объектов экспертизы имеет вид: № 3; № 1; № 2; № 6; № 5; № 4..

Опыт по парного сопоставления по табл. 29 показывает, что в силу

особенностей человеческой психики эксперты иногда бессознательно отдают предпочтение не тому объекту в очередной рассматриваемой паре, который важнее, а тому, который стоит в перечне первым. Чтобы избежать этого, используют свободную часть таблицы и проводят по парное сопоставление дважды (например, сначала первого объекта со вторым, третьим, четвертым и т. д., затем второго с первым, третьим, четвертым, ... и так до последнего, а потом в обратном порядке: последнего с предпоследним, ... и до первого, предпоследнего с последним, предыдущим ... и вновь до первого. Таким образом, каждая пара объектов сопоставляется дважды, причем в разном порядке и по истечении некоторого времени). При таком сопоставлении, называемым *полным* или *двойным*, удается иногда избежать случайных ошибок, кроме того, выявить экспертов, небрежно относящихся к своим обязанностям или не имеющих определенной точки зрения. Иначе говоря, двойное по парное сопоставление обладает более высокой надежностью, чем однократное. Порядок расчетов при нем остается прежним, за исключением того, что

$$C = m(m - 1)$$

Уточнить результаты измерений или значения весовых коэффициентов, полученные по парным сопоставлением, можно методом последовательного приближения. Первоначальные результаты (см. п. 3 примера 57) рассматриваются в этом случае как первое приближение. Во втором приближении они используются как весовые коэффициенты  $G_j(1)$  суждений экспертов. Полученные с учетом этих весовых, коэффициентов новые результаты в третьем приближении рассматриваются опять как весовые коэффициенты  $G_j(2)$  тех же мнений экспертов и т. д. Согласно теореме Перрона-Фробениуса, при определенных условиях, которые на практике всегда выполняются, этот процесс сходится, т. е. нормированные результаты измерений  $g_j$  или весовые коэффициенты стремятся к некоторым постоянным значениям, строго отражающим соотношения между объектами экспертизы при установленных экспертами исходных данных.

Пример 58. Результаты полного по парного сопоставления одним экспертом пяти объектов экспертизы представлены табл. 30 подобной табл 6, с той лишь разницей, что с целью исключения из рассмотрения отрицательных чисел предпочтение  $j$ -го объекта перед  $i$ -м обозначено цифрой 2, равноценность - цифрой 1, а предпочтение  $i$ -го объекта перед  $j$ -м - цифрой 0.

Таблица 30

	1	2	3	4	5	$G_j(1)$	$g_j(1)$	$G_j(2)$	$g_j(2)$	$G_j(3)$	$g_j(3)$
1	1	2	2	1	2	8	0,32	36	0,395	124	0,435
2	0	1	2	2	2	7	0,28	27	0,297	83	0,291
3	0	0	1	0	0	1	0,04	1	0,011	1	0,004
4	1	0	2	1	2	6	0,24	22	0,242	70	0,246
5	0	0	2	0	1	3	0,12	5	0,055	7	0,024
$\Sigma$						25	1,000	91	1,000	285	1,000

Что можно сказать о результате измерения в третьем приближении? Решение.

1. В первом приближении

$$G_1(1) = 1 + 2 + 2 + 1 + 2 = 8;$$

$$G_2(1) = 0 + 1 + 2 + 2 + 2 = 7;$$

$$G_3(1) = 0 + 0 + 1 + 0 + 0 = 1;$$

$$G_4(1) = 1 + 0 + 2 + 1 + 2 = 6;$$

$$G_5(1) = 0 + 0 + 2 + 0 + 1 = 3.$$

2. Во втором приближении

$$G_1(2) = 8 \cdot 1 + 7 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 1 + 3 \cdot 2 = 36;$$

$$G_2(2) = 8 \cdot 0 + 7 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 2 + 3 \cdot 2 = 27;$$

$$G_3(2) = 8 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 6 \cdot 0 + 3 \cdot 0 = 1;$$

$$G_4(2) = 8 \cdot 1 + 7 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 1 + 3 \cdot 2 = 22;$$

$$G_5(2) = 8 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 6 \cdot 0 + 3 \cdot 1 = 5.$$

3. В третьем приближении

$$G_1(3) = 36 \cdot 1 + 27 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 22 \cdot 1 + 5 \cdot 2 = 124;$$

$$G_2(3) = 36 \cdot 0 + 27 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 22 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 83;$$

$$G_3(3) = 36 \cdot 0 + 27 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 22 \cdot 0 + 5 \cdot 0 = 1;$$

$$G_4(3) = 36 \cdot 1 + 27 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 22 \cdot 1 + 5 \cdot 2 = 70;$$

$$G_5(3) = 36 \cdot 0 + 27 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 22 \cdot 0 + 5 \cdot 1 = 7.$$

4. Значения  $g_j$ , приведенные в табл. 30, заметно отличаются в первом и третьем

приближении. С каждым следующим приближением они будут уточняться. В ходе

уточнения все более подчеркивается предпочтительность первого объекта экспертизы

и низкая значимость третьего (в меньшей мере - пятого).

5. Если экспертов несколько, то окончательные результаты должны быть получены путем усреднения их данных.

Метод последовательного приближения позволяет получить строгие количественные результаты измерения по шкале отношений, если известно (или определено экспертным методом), во сколько раз вес или показатель лучшего из объектов экспертизы превосходит вес или такой же показатель худшего объекта. В этом случае через это отношение  $a$  предпочтение  $j$ -го объекта экспертизы перед  $i$ -м выражается числом  $1 + \Delta$ , равноценность — единицей, а предпочтение  $i$ -го объекта перед  $j$ -м — числом  $1 - \Delta$ , где

$$\Delta = \frac{a-1}{a+1} + \sqrt{\frac{0,05}{m}}$$

После этого по парное сопоставление производится методом последовательного приближения. Процесс уточнения значений  $g_j$  продолжается до тех пор, пока точность не достигнет заданной. Так как с каждым приближением изменение  $g_j$  становится все меньшим и меньшим, это условие можно записать в виде

$$\lg(k) - g_j(k-1) \leq e$$

где обычно принимается  $e = 0,001$ , если  $1 < a < 1,5$ , и  $e = 0,01$ , если  $a > 5$ . При промежуточных значениях,  $a$  выбираются и промежуточные значения  $e$ .

После окончания расчетов фактическое отношение значений показателей или весов крайних членов ранжированного ряда  $a_\phi$  сравнивается с

исходным  $a$ . Если отношение

$$\beta = \frac{a}{a_\phi}$$

близко к единице, задача считается решенной. В противном случае корректируется

$$\Delta = \beta \left( \frac{a-1}{a+1} + \sqrt{\frac{0,05}{m}} \right)$$

и расчет повторяется.

Пример 59. Лучший объект из шести по сравниваемому показателю превосходит худший в 2,4 раза. Следовательно,

$$\Delta = \frac{2,4-1}{2,4+1} + \sqrt{\frac{0,05}{6}} \approx 0,5$$

Мнения эксперта об объектах представлены табл. 31.

Таблица 31

	1	2	3	4	5	6
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
2	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5
3	0,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5
4	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	0,5
5	0,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,5
6	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0

Перейти к исходным данным для вычисления весовых коэффициентов с точностью не ниже 0,5 %.

Решение. 1. В  $k$  -  $m$  приближении, обеспечивающем заданную точность,  $g_1(k) = 0,243$ ;  $g_2(k) = 0,148$ ;  $g_3(k) = 0,176$ ;  $g_4(k) = 0,161$ ;  $g_5(k) = 0,146$ ;

$$g_6(k) = 0,126.$$

2. Ранжированный ряд имеет вид:

$$g_1(k); g_2(k); g_3(k); g_4(k); g_5(k); g_6(k)$$

3. Отношение весов крайних членов ранжированного ряда

$$a_\phi = \frac{0,243}{0,126} = 1,94$$

4. Поправочный коэффициент

$$\beta = \frac{2,4}{1,94} = 1,24$$

5. С учетом поправочного коэффициента

$$\Delta = 1,24 \cdot 0,5 = 0,62$$

6. Таким образом, исходные данные для парного сопоставления методом последовательного приближения имеют вид, представленный табл. 32.

Таблица 32

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

1	1,0	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
2	0,38	1,0	0,38	1,62	0,38	1,62
3	0,38	1,62	1,0	0,38	1,62	1,62
4	0,38	0,38	1,62	1,0	1,62	0,38
5	0,38	1,62	0,38	0,38	1,0	1,62
6	0,38	0,38	0,38	1,62	0,38	1,0

Опрос экспертов может быть очным и заочным, групповым и индивидуальным, персонифицированным и анонимным. Свои мнения эксперты могут выражать в письменной (путем заполнения таблиц, анкет) или в устной форме (давая интервью, участвуя в дискуссии). Все эти и любые другие варианты экспертного опроса имеют свои достоинства и недостатки, поэтому выбор того или иного из них осуществляется в зависимости от конкретных условий и обстоятельств.

## ГЛАВА 8

### ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

#### 8.1. НОРМАТИВНО-ПРАВОВАЯ РЕГЛАМЕНТАЦИЯ

Наличие в метрологии большого числа принципиальных положений, устанавливаемых по соглашению, отличает ее от других естественных наук. К таким положениям относятся:

- выбор основных физических величин;
- выбор реперных точек и установление размеров основных единиц;
- правила образования производных единиц;
- способ воспроизведения и передачи информации о размере единиц;
- правила формирования и выбор систем единиц;
- выбор нормируемых метрологических характеристик средств измерений;
- установление норм точности средств измерений;
- установление нормальных условий измерений;
- выбор методик измерений;

ограничение точности измерений — (критерий (10) использование равномерного закона распределения вероятности для ситуационного моделирования;

- выбор значения коэффициента  $k$  при учете дефицита измерительной информации;
- выбор вероятности, с которой принимаются статистические решения;
- требования к оценкам (минимизация суммы квадратов невязок, например, ■ в методе наименьших квадратов) ;
- правила экспертизы, требования к экспертам и т. д.

Малейший произвол и несогласованность в решении этих- вопросов влекут за собой нарушение единства измерений и дезорганизацию хозяйственной деятельности. Поэтому все решения, принимаемые по соглашению, должны быть строго регламентированы, т. е. облечены в форму юридических актов, имеющих четкую правовую основу. Эти вопросы являются объектом законодательной метрологии — комплекса юридических и нормативно-технических документов, регламентирующих метрологические положения, правила и нормы, устанавливаемые по соглашению.

Актами высшей государственной власти в нашей стране являются *законы*, принимаемые Верховным Советом СССР и Верховными Советами союзных и автономных республик. Основным закон нашего государства - Конституция Союза Советских Социалистических

Республик. Своды законов в отдельных областях называются *кодексами*. Таков Кодекс законов о труде (КЗОТ), Уголовный кодекс (УК РСФСР и других союзных республик) и т. д. Одним из основных актов законодательной метрологии является, например, статья 152 УК РСФСР, предусматривающая уголовное наказание за неоднократный или в крупных размерах выпуск недоброкачественной, несоответствующей стандартам либо техническим условиям продукции. На сессиях Верховного Совета СССР, Верховных Советов союзных и автономных республик принимаются *постановления*.

В периоды между сессиями Президиумы Верховного Совета СССР, Верховных Советов союзных и автономных республик издают *указы*. Например, 18 мая 1984 г. Президиум - Верховных Советов СССР издал указ „Об административной ответственности за нарушение правил по стандартизации и качеству продукции, выпуска в обращение и содержания средств измерений и пользования ими". После утверждения сессиями Верховных Советов указы становятся законами.

Законодательными актами по метрологии являются постановления Советского правительства. Первым из них был декрет Совета Народных Комиссаров (СНК) РСФСР от 14 сентября 1918 г. „О введении Международной метрической системы мер и весов". В 1921 г. В.И. Ленин подписал постановление Совета Труда и Оборона „О всероссийской поверке мер и весов". Специальным постановлением Центрального Исполнительного Комитета (ЦИК) и СНК СССР в 1924 г. введено в действие „Положение о мерах и весах". В 1925 г. СНК СССР выпустил постановление „О признании заключенной в Париже 20 мая 1875 г. Международной метрической конвенции для обеспечения международного единства и усовершенствования метрической системы, имеющей силу для СССР". В 1932 г. принято постановление ЦИК и СНК СССР „О мерах и весах", в 1938 г. - постановление СНК СССР „Об упорядочении измерительной хозяйства Союза ССР". В трудные годы войны Советское правительство продолжало уделять метрологии неослабное внимание. В 1942 г. вышло постановление „О мерах и контрольно-измерительных приборах, подлежащих обязательной государственной поверке и клеймению". В самое последнее время важнейшими в области законодательной метрологии были постановления Совета Министров СССР от 4 апреля 1983 г. № 273 „Об обеспечении единства измерений в стране" и от 28 сентября 1983 г. № 936 „О государственном надзоре за стандартами и средствами измерений в СССР", постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 12 мая 1986 г. „О мерах по коренному повышению качества продукции".

Государственные комитеты СССР издают нормативно-правовые акты (постановления, распоряжения, указания и т. д.) общесоюзного распространения в рамках своей компетенции. Вопросы законодательной метрологии относятся к компетенции Госстандарта СССР. Они регламентируются *нормативно-техническими документами*, в число которых входят стандарты, технические условия, методические указания, положения, инструкции, правила и др.

*Нормативно-технический документ* — документ, устанавливающий требования к объектам стандартизации, обязательный для исполнения в определенных областях деятельности, разработанный в установленном порядке и утвержденный компетентным органом.

Основным из нормативно-технических документов является *стандарт*, устанавливающий требования к группам однородной продукции и в необходимых случаях требования к конкретной продукции, правила, обеспечивающие ее разработку, производство и применение, а также требования к иным объектам стандартизации, устанавливаемым Советом Министров СССР.

В зависимости от требований к объектам стандартизации подразделяются на следующие категории: государственные (ГОСТ), отраслевые (ОСТ), республиканские (РСТ).

*Государственные стандарты* утверждают Госстандарт СССР и Госстрой СССР (по

закрепленной за ним номенклатуре). Эти стандарты являются обязательными для всех министерств и ведомств, предприятий, организаций и учреждений. *Отраслевые стандарты* утверждают министерства (ведомства) СССР, являющиеся головными (ведущими) по видам выпускаемой продукции. Эти стандарты являются обязательными для предприятий, организаций и учреждений, независимо от их ведомственной подчиненности.

*Республиканские стандарты* утверждают в порядке, установленном Советом Министров союзной республики по согласованию с Госстандартом СССР.

Требования к конкретной продукции (моделям, маркам) устанавливаются техническими условиями.

*Технические условия* утверждаются по отраслевому принципу соответствующими министерствами, ведомствами, центральными органами кооперативных и иных общественных организаций.

Технические условия на продукцию машиностроения утверждаются в порядке, устанавливаемом министерством (ведомством) — разработчиком.

Технические условия в соответствии с областью их распространения обязательны для предприятий, организаций и учреждений, изготовляющих, поставляющих (реализующих), хранящих, транспортирующих, использующих (эксплуатирующих) и ремонтирующих продукцию.

Стандарты и технические условия разрабатываются на основе высших достижений отечественной и зарубежной науки, техники, технологии и передового опыта и должны предусматривать решения, оптимальные для экономического и социального развития страны.

Производимая и реализуемая в СССР продукция должна соответствовать требованиям стандартов и технических условий.

Кроме того, на каждом предприятии, в учреждении или организации действуют приказы, указания и распоряжения администрации, а также нормативно-технические документы, включающие стандарты предприятия (СТП), правила, инструкции, методики и т. п.

*Стандарты предприятий*, разрабатываемые предприятиями (организациями), обязательны для подразделений и служб предприятия (организации), утвердившего стандарт.

Стандарты предприятий устанавливают:

"порядок проведения работ в области управления производством, в том числе управления качеством продукции (работ), технологические процессы, технические нормы и требования, требования к технологической оснастке и инструменту, производимым и применяемым только на данном предприятии.

8-529 -

225

На поставляемую продукцию стандарты предприятий не утверждаются, и в конструкторской документации основного производства не допускаются ссылки на стандарты предприятия.

Порядок разработки и оформления стандартов предприятия устанавливает ГОСТ 1.4-85. Построение, содержание и изложение стандартов предприятий должно соответствовать требованиям ГОСТ 1.5—85.

С помощью перечисленных документов законодательная метрология охватывает все уровни управления: от государственного до уровня руководства отдельными предприятиями и организациями, причем стандартизация служит нормативно-правовой основой всех видов метрологической деятельности. Благодаря этому, достигается повсеместное соблюдение метрологических правил, требований и норм, установленных по соглашению, и обеспечивается единство измерений в стране.

## 8.2. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ, СТАНДАРТИЗАЦИИ И КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Необходимость международного сотрудничества в области метрологии стала очевидной с развитием научного, культурного и торгового обмена между странами. В 1875 г. по инициативе петербургских академиков Б.С. Якоби, О.В. Струве и Г.И. Вильда в Париже „для обеспечения международного единства и усовершенствования метрической системы" была подписана *Метрическая конвенция*, в соответствии с которой международное сотрудничество подписавших ее государств устанавливалось путем:

а) создания первого международного метрологического научного учреждения — Международного бюро мер и весов (МБМВ), содержащегося на взносы стран, подписавших конвенцию, и ведущего исследования по совместно вырабатываемым программам;

б) учреждения Международного комитета мер и весов (МКМВ) из наиболее авторитетных ученых-метрологов стран — членов конвенции для руководства МБМВ;

в) созыва не реже одного раза в шесть лет Генеральных конференций по мерам и весам „для обсуждения и принятия необходимых мер по распространению и усовершенствованию метрической системы".

МБМВ, находящееся в Севре (близ Парижа), занимается:

созданием международных эталонов и шкал для основных физических величин; хранением международных эталонов;

сличением национальных эталонов с международными;

согласованием методик, выполняемых при этом измерений; . определением и согласованием значений фундаментальных физических констант.

МКМВ на своих ежегодных заседаниях рассматривает текущие вопросы деятельности МБМВ. Начиная с 1927 г., при МКМВ создаются консультативные комитеты, координирующие, каждый в своей области, международные работы и вырабатывающие рекомендации по изменению определений и размеров единиц физических величин, которые МКМВ может принимать непосредственно или выносить на утверждение Генеральной конференции по мерам и весам в целях обеспечения унификации единиц. Генеральная конференция является высшим руководящим органом, определяющим долговременную научную политику стран, подписавших Метрическую конвенцию, и принимающим на международном уровне все принципиальные решения в области единиц физических величин и их эталонов. С 1875 г. она созывалась 17 раз. Последняя, XVII ГКМВ состоялась в октябре 1983 г.

В 1933 г. советская делегация на Генеральной конференции по мерам и весам предложила распространить международное сотрудничество на область изготовления и применения средств измерений. После большой подготовительной работы в 1956 г. была подписана межправительственная конвенция об учреждении *Международной организации законодательной метрологии* (МОЗМ). Целью этой организации является унификация законов, правил и инструкций в сфере деятельности метрологических служб государств — членов МОЗМ, т. е. обеспечение единства измерений в международном масштабе законодательным путем, что дает возможность установить взаимное доверие к результатам всех видов измерений в странах — партнерах по торговле, производству и научному обмену, избежать непроизводительных расходов на перепроверку технических характеристик сырья, материалов и изделий МОЗМ разрабатывает международные рекомендации по терминологии, методам измерений, правилам испытаний и поверки средств

измерений, всем видам нормативно-технических документов, регламентирующих передачу информации о размере единиц физических величин от их эталонов средствам измерений.

Структура МОЗМ аналогична структуре Международной организации стран, подписавших Метрическую конвенцию. Международное бюро законодательной метрологии (МБЗМ) находится в Париже. Его деятельностью руководит Международный комитет законодательной метрологии (МКЗМ), собирающийся ежегодно. Раз в 4 ... 6 лет созываются Международные конференции по законодательной метрологии, в которых участвуют полномочные представители всех стран — членов организации. Разработкой конкретных рекомендаций занимаются секретариаты-докладчики (СД) по планам и под контролем секретариатов-пилотов (СП), согласовывающих эти рекомендации со всеми странами - членами МОЗМ. Согласованные рекомендации представляются в МОЗМ и затем утверждаются Международной конференцией.

МОЗМ тесно сотрудничает с ИСО — *Международной организацией по стандартизации*, созданной в 1946 г. на совещании представителей 25 стран (в том числе СССР) в Лондоне/Целью ИСО, согласно второй статье Устава, „является содействие развитию стандартизации в мировом масштабе для облегчения международного товарообмена и взаимопомощи, а также для расширения сотрудничества в области интеллектуальной, научной, технической и экономической деятельности". В качестве неправительственной организации ИСО пользуется консультативным статусом ООН и является крупнейшей международной организацией, ведущей в области стандартизации по очень широкому кругу вопросов.

Высшим руководящим органом ИСО является Генеральная Ассамблея — полномочное собрание делегатов, созываемое один раз в три года. В период между сессиями Генеральной Ассамблеи организацией руководит собирающийся ежегодно Совет. Текущую административно-техническую работу выполняет Центральный секретариат в Женеве (Швейцария). Практическая работа по стандартизации ведется в технических комитетах (ТК), сферы деятельности которых разграничены.

Стандартизация — гораздо более широкое понятие, чем регламентация метрологической деятельности. Под стандартизацией, согласно определению, принятому ИСО в 1962 г., понимается работа по установлению и применению правил с целью упорядочения деятельности в данной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон и, в частности, для достижения всеобщей оптимальной экономии, принимая во внимание рабочие условия и требования техники безопасности. Основным видом работы технических комитетов является разработка, согласование и представление на утверждение Совета проектов международных стандартов, которые имеют рекомендательный характер. В настоящее время их насчитывается несколько десятков тысяч. Для непосредственной разработки проекта международного стандарта в ТК создаются подкомитеты и рабочие группы.

Стандартизацией в области метрологии занимаются следующие технические комитеты ИСО: ИСО/ТК 12 „Величины, единицы, обозначения, переводные коэффициенты и таблицы", ИСО/ТК 28 „Нефтепродукты", ИСО/ТК 30 „Измерение расхода жидкости в закрытых каналах", ИСО/ТК 43 „Акустика", ИСО/ТК 57 „Метрология и свойства поверхности", ИСО/ТК -112 „Вакуумная техника", ИСО/ТК 113 „Измерение расхода жидкости в открытых каналах", ИСО/ТК 158 „Анализ газа". Число технических комитетов непрерывно увеличивается: иными словами, увеличивается ко-

личество областей, охватываемых международной стандартизацией.

В некоторых направлениях стандартизация развивается автономно. Так, например, в области электротехники и электроники с 1904 г. международные рекомендации по стандартизации вырабатывает *Международная электротехническая комиссия* (МЭК). Россия вступила в МЭК в 1911 г., а Советский Союз стал ее членом в 1921 г. Участие СССР в МЭК направлено на согласование требований стандартов МЭК с требованиями отечественной нормативно-технической документации путем внедрения показателей стандартов МЭК в национальные стандарты и введения требований отечественной нормативно-технической документации в документации, разрабатываемые МЭК.

Структура МЭК (Совет, технические комитеты, подкомитеты, рабочие группы) аналогична структуре ИСО. Центральное бюро находится в Женеве. В 1976 г. между МЭК и ИСО подписано соглашение, в соответствии с которым обе международные организации признаются независимыми в организационном и финансовом отношении и сотрудничают на добровольных началах. Сферы влияния разграничены областями техники, входящими в их компетенцию. ИСО занимается стандартизацией во всех отраслях экономики, промышленности и техники, за исключением электротехники и электроники, которые входят в компетенцию МЭК. По общим вопросам стандартизации ИСО и МЭК выступают согласованно.

Необходимо подчеркнуть, что хотя международные стандарты не являются обязательными, они отражают интересы большинства стран и поэтому принимаются за основу при разработке национальных стандартов, обеспечивая тем самым конкурентоспособность товаров на мировом рынке. Промышленно развитые страны прилагают значительные усилия к тому, чтобы использовать международную стандартизацию для получения преимуществ в торговле. Если той или иной стране удастся в основу международного стандарта положить свой национальный стандарт, она освобождается от необходимости перестраивать производство в соответствии с рекомендациями международного стандарта, что неизбежно связано с дополнительными капиталовложениями и повышением себестоимости продукции.

Помимо ИСО и МЭК рекомендации по стандартизации, но в более узких областях, разрабатывают и некоторые другие международные организации, например, *Международная комиссия по освещению* (нормы освещения дорог, улиц, школ, театров и промышленных зданий); *Международная комиссия по большим плотинам* (рекомендации по заполнителям для гидротехнических бетонов и пластификаторам); *Международная межправительственная морская консультативная комиссия* (международные соглашения по правилам перевозки грузов различного типа, правилам перевозки опасных грузов, правилам определения остойчивости судов, их тоннажа) и др. По примерным подсчетам, из общего числа четырех с лишним тысяч международных и региональных организаций, функционирующих в современном мире, более 350 в той или иной мере занимаются вопросами стандартизации. Советский Союз принимает активное участие в работе *Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям* (МКРЕ), *Международного агентства по атомной энергии* (МАГАТЭ), *Международной конфедерации по измерительной технике и приборостроению* (ИМЕКО), и, в частности, в ТК 8 „Метрология“.

Примером региональной организации, придающей метрологии пер-

востепенное значение, является созданная в 1957 г. *Европейская организация по контролю качества* (ЕОКК). В задачи ЕОКК, объединяющей 17 стран Европы, входит разработка, пропаганда и совершенствование методов и средств контроля с целью повышения качества изделий, снижения их себестоимости, повышения производительности труда, разработка научных основ проблемы качества, надежности и долговечности. Для решения этих задач ЕОКК организует ежегодные научно-технические конференции, проводит семинары, наряду с постоянными техническими комитетами создает специальные комитеты и секции, издает журналы, в том числе ежеквартальный журнал „Д Сачество“, труды конференций, организует курсы обучения специалистов и т. д. СССР является членом ЕОКК с 1967 г. В 1971 г. в Москве под девизом „К высшему качеству — через стандарт“ состоялась XV конференция ЕОКК при участии 24 стран. Конференция явилась большим вкладом в дело улучшения качества продукции и сыграла важную роль в развитии науки об управлении качеством в СССР.

229

1-й симпозиум ЕОКК по метрологии состоялся в 1984 г. в г. Львове. На этом симпозиуме по решению Совета ЕОКК создан постоянный Технический комитет по метрологии.

В настоящее время достигнута предварительная договоренность между ЕОКК, Американской ассоциацией по контролю качества и Японским союзом инженеров и научных работников о создании Международной Ассоциации качества. Задача этой организации будет состоять в контроле качества изделий в мировом масштабе.

Примером социалистической экономической интеграции на региональном уровне служит Совет Экономической Взаимопомощи (СЭВ), созданный в 1949 г. Его цель, согласно первой статье Устава, заключается в том, чтобы содействовать планомерному развитию народного хозяйства, ускорению экономического и технического прогресса, повышению уровня индустриализации стран с менее развитой промышленностью, непрерывному росту производительности труда и подъему благосостояния народов стран - членов СЭВ.

Основными органами СЭВ являются Совет, Исполнительный комитет, комитеты и постоянные комиссии, секретариат. Высший орган СЭВ — сессия Совета, созываемая не реже одного раза в год, в работе которой участвуют правительственные делегации стран — членов СЭВ. Исполнительный комитет (главный исполнительный орган Совета) состоит из представителей всех стран — членов СЭВ и руководит работами, связанными с реализацией решений сессии Совета. Постоянные комитеты и комиссии Совета организуют многостороннее экономическое и научно-техническое сотрудничество в отдельных отраслях народного хозяйства. Секретариат, являясь экономическим и исполнительно-административным органом, организует подготовку заседаний органов СЭВ, проводит экономические исследования, осуществляет учет выполнения рекомендаций и решений органов Совета, подготавливает и публикует информацию по вопросам научно-технического сотрудничества стран — членов СЭВ.

Главной формой экономического сотрудничества и основным видом деятельности СЭВ является координация планов развития народного хозяйства стран — членов СЭВ. 25-я сессия СЭВ в 1970 г. приняла „Комплексную программу дальнейшего углубления и совершенствования сотрудничества и

развития социалистической экономической интеграции стран-членов СЭВ" на ближайшие 15 ... 20 лет. Комплексной программой и долгосрочными целевыми программами сотрудничества, являющимися ее развитием и конкретизацией, определены согласованная стратегия и главное содержание сотрудничества стран— членов СЭВ на длительную перспективу (до 1990 г.). Важная роль при этом отводится стандартизации.

Стандартизация в рамках СЭВ представляет собой планомерный процесс установления и применения согласованных между странами СЭВ и утвержденных соответствующими органами СЭВ правил, требований и норм, направленных на создание научно обоснованной нормативно-технической базы для эффективного осуществления всех форм сотрудничества и развития социалистической экономической интеграции стран-членов СЭВ. Она рассматривается как нормативно-техническая основа экономического и научно-технического сотрудничества (в том числе в области метрологии), как необходимый элемент механизма управления процессами социалистической экономической интеграции стран — членов СЭВ. Стандартизация в рамках СЭВ призвана обеспечивать увязку технических норм и требований к продукции, являющейся предметом взаимной торговли, гарантировать высокое качество продукции с целью повышения ее конкурентоспособности, создавать необходимые предпосылки для углубления и расширения международного социалистического разделения труда и его высшей формы - специализации и кооперирования производства, обеспечивать постепенное выравнивание уровней технических норм и требований, устанавливаемых стандартами стран - членов СЭВ, создавать необходимые предпосылки для ускоренного внедрения в народное хозяйство стран СЭВ новейших достижений науки и техники. В конечном итоге стандартизация в рамках СЭВ направлена на достижение всеми странами СЭВ наивысшего научно-технического уровня промышленных изделий и внедрения в производство наиболее прогрессивных технологических процессов.

Комплексная программа поставила задачу разработки нормативно-технических документов СЭВ по стандартизации, определяющих технические характеристики и показатели качества продукции, с целью их обязательного применения во всех формах сотрудничества стран СЭВ. 28-я сессия СЭВ в Софии в июне 1974 г. утвердила Положение о стандарте СЭВ и одобрила Конвенцию о применении стандартов СЭВ. Стандарт СЭВ представляет собой нормативно-технический документ, фиксирующий результаты конкретной деятельности органов СЭВ по стандартизации, выполненный на основе современных достижений науки, техники и передового практического опыта, разработанный и утвержденный в соответствии с порядком, предусмотренным Положением о стандарте СЭВ. Он является основным нормативно-техническим документом по стандартизации в рамках СЭВ и предназначен, как для нормативно-технического обеспечения соответствующих задач углубления и совершенствования сотрудничества и развития социалистической экономической интеграции, так и для дальнейшего развития научно-технического прогресса каждой из стран СЭВ. Стандарты СЭВ не стоят над национальными стандартами стран-членов СЭВ, а являются нормативно-техническими документами, отражающими общие интересы братских стран и направленными на эффективную реализацию Комплексной программы и долгосрочных целевых программ сотруд-

ничества.

**Стандарты СЭВ** являются документами обязательного и **прямого (не посредственного) применения в договорно-правовых отношениях стран**

**СЭВ и в их народном хозяйстве.** Эта обязательность не вытекает из Устава СЭВ, согласно которому органы СЭВ могут принимать только рекомендации (кроме организационных и процедурных вопросов), а из международного договора - Конвенции о применении стандартов СЭВ. В Советском Союзе, например, издано постановление Совета Министров СССР

от 21 марта 1975 г. „О мерах по обеспечению выполнения обязательств Советской стороны, вытекающих из Конвенции о применении стандартов

СЭВ". Постановлением предусмотрено, что с 1 апреля 1975 г. стандарты СЭВ являются обязательными и действуют наравне с государственными стандартами СССР.

*Под обязательным и прямым (непосредственным) применением стандартов СЭВ в договорно-правовых отношениях по экономическому и научно-техническому сотрудничеству между странами — участницами конвенции понимается обязательное применение стандартов СЭВ на объекты сотрудничества путем ссылки на них в документах, определяющих договорно-правовые отношения (соглашения, договоры, контакты). Под договорно-правовыми отношениями понимаются, как указано в конвенции, отношения, возникающие в процессе осуществления многостороннего и двустороннего экономического и научно-технического сотрудничества стран — участниц конвенции и их хозяйственных организаций на основе соглашений, договоров, контрактов по специализации и кооперированию производства, взаимным поставкам и торговле между этими странами, научно-исследовательским, проектно-конструкторским и экспериментальным работам, подрядным, строительным, монтажным, транспортно-экспедиционным услугам и другим соответствующим отношениям, возникающим в процессе сотрудничества. Обязательность и прямое применение стандартов СЭВ, устанавливающих высокие показатели качества продукции с учетом лучших мировых образцов и создающих нормативную основу экономического и научно-технического сотрудничества стран СЭВ, открывают широкую перспективу для расширения и укрепления интеграционных процессов между странами социалистического содружества.*

*Под применением стандарта СЭВ в народном хозяйстве стран - участниц конвенции понимается непосредственное использование его в качестве национального стандарта без изменений и переоформлений или введение стандарта СЭВ в национальные стандарты, как принято в СССР, при полном соответствии показателей национальных стандартов показателям стандарта СЭВ. При этом страны — участницы конвенции вправе устанавливать в национальных стандартах более высокие показатели качества изделий по сравнению с показателями качества стандартов СЭВ при сохранении требований взаимозаменяемости и технической совместимости. Применение стандартов СЭВ в народном хозяйстве стран — участниц конвенции непосредственно в качестве национальных стандартов позволяет отказаться от разработки аналогичных национальных документов. Это дает возможность не только сократить расходы на разработку государственных стандартов, но и, что очень важно, ускорить внедрение передового опыта в производство.*

Задачи по стандартизации сформулированы во многих разделах Комплексной программы. Кроме того, им посвящен специальный девятый раздел программы „Сотрудничество в области стандартизации“. Решением этих задач и разработкой стандартов СЭВ занимаются отраслевые постоянные комиссии, Постоянная комиссия СЭВ по стандартизации, образованная 18-й сессией СЭВ в 1962 г., Институт СЭВ по стандартизации, созданный в том же году, и отдел стандартизации Секретариата СЭВ. В Заявлении об основных направлениях дальнейшего развития и углубления экономического и научно-технического сотрудничества стран-членов СЭВ, принятом в 1984 г. на Экономическом совещании стран-членов СЭВ на высшем уровне, было признано необходимым усилить сотрудничество в области стандартизации.

Комплексная программа стала мощным стимулом развития и совершенствования сотрудничества стран СЭВ в области метрологии.

В п. 8 разд. Я программы предусмотрено решение широкого круга задач, направленных на создание единой системы эталонов СЭВ: проведение взаимных сличений национальных эталонов; создание системы стандартных образцов и материалов; унификация норм точности и методов учета количества сырья, материалов и продукции; совместное проведение научно-исследовательских работ по повышению точности эталонов СЭВ до современного мирового уровня, по разработке высокоточных уникальных измерительных установок и использованию их странами - членами СЭВ; унификация нормативно-технической документации по поверке и испытанию измерительных приборов с целью обеспечения взаимного признания странами — Членами СЭВ результатов поверки и клеймения приборов в отдельных странах СЭВ; решение правовых и финансовых вопросов, связанных с развитием метрологических работ в рамках СЭВ.

Принимая во внимание роль метрологии во всех сферах деятельности социалистических стран, а также в целях успешной реализации задач, вытекающих из Комплексной программы, Постоянная комиссия СЭВ по стандартизации в декабре 1971 г. на своем 29-м заседании постановила создать в рамках комиссий секцию по метрологии. В состав секции вошли представители стран — членов СЭВ на уровне руководителей их метрологических организаций. Представитель СССР является постоянным председателем этой секции.

Секция проводит работу в соответствии с планом Постоянной комиссии и на своих заседаниях, которые проходят, как правило, два раза в год, рассматривает результаты законченных научных исследований, одобряет проекты нормативно-технических и методических документов, проекты документации на эталоны и стандартные образцы СЭВ, отчеты по сличениям национальных эталонов, проекты годовых и перспективных планов разработки стандартов СЭВ, по разделу „Метрология“, а также вопросы, связанные с реализацией Комплексной программы, совершенствованием сотрудничества и повышением эффективности всех видов деятельности в области метрологии. Рабочими органами секции являются совещания специалистов, проводимые в странах — членах СЭВ в соответствии с графиком, утвержденным комиссией, а также рабочая группа по проблеме создания системы стандартных образцов веществ и материалов, образованная ввиду специфики и большого объема работ по этому направлению. В международном сотрудничестве по тематике

секции принимает активное участие большинство метрологических институтов СССР.

Совершенствование эталонной базы каждой из стран — членов СЭВ, создание единой системы эталонов СЭВ — одно из главных направлений сотрудничества в области метрологии, предусмотренных Комплексной программой. Система эталонов СЭВ представляет собой совокупность эталонов СЭВ в различных областях измерений, используемых **на основе согласованных правил их применения, хранения, совершенствования.** Работы по созданию эталонов СЭВ в соответствии с Комплексной программой начаты

233  
в 1971 г. В 1972 г. утверждено Положение о метрологическом статусе эталонов СЭВ. Этот документ определил назначение эталонов СЭВ и их роль по отношению к национальным эталонам, порядок создания, хранения и применения. Основное назначение эталонов СЭВ - согласование размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами стран — членов СЭВ. **В качестве эталона СЭВ может быть принят: один из национальных эталонов стран — членов СЭВ; специально созданный эталон; групповой эталон, в состав которого входят два или более национальных эталона СЭВ, воспроизводящих и хранящих единицу физической величины в определенном диапазоне значений.** Для развития эталонной базы СЭВ создано научно-производственное объединение „Интерэталонприбор”.

18 декабря 1985 г. на 41-м (внеочередном) заседании сессии СЭВ принята Комплексная программа научно-технического прогресса стран — членов СЭВ до 2000 г., в которой определены пять приоритетных направлений: электронизация народного хозяйства, комплексная автоматизация, ускоренное развитие атомной энергетики, новые материалы и технология их производства и обработки, ускоренное развитие биотехнологии. Реализация программы предусматривает совместные работы стран-членов СЭВ по нормативно-техническому и метрологическому обеспечению этих направлений, включая разработку необходимых стандартов СЭВ, правил, методов и средств измерений, соответствующих наивысшему мировому уровню. В „Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 гг. и на период до 2000 г.” записано: „Расширять стандартизацию и унификацию в рамках СЭВ”. Стандартизация в области метрологии должна обеспечить создание научно обоснованной системы нормативно-технических документов, являющейся частью общей системы нормативно-технической документации СЭВ по стандартизации. В то же время между Секретариатом СЭВ и центральным секретариатом ИСО достигнута договоренность о взаимовыгодном сотрудничестве. Это открывает возможность международной гармонизации стандартов, рекомендованной Заключительным актом Совещания по безопасности и сотрудничеству в Европе, подписанным в Хельсинки 1 августа 1975 г. Работа в этом направлении активно ведется всеми международными, региональными и национальными организациями по стандартизации.

### **8.3. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ**

**В Советском Союзе стандартизация носит государственный характер.** 15 сентября 1925 г. СНК СССР утвердил Положение о Комитете по стандартизации при СТО, председателем которого был назначен один из крупнейших организаторов Советского государства В.В. Куйбышев, считавший, что „работа по стандартизации должна идти не только одним темпом с

народным хозяйством, но и опережать его". На первом же заседании Комитета по стандартизации в 1926 г. был утвержден ряд стандартов на единицы физических величин. В 1930 г. ввиду исключительно важного значения, которое придавалось развитию стандартизации и метрологии в период индустриализации страны, Комитет по стандартизации при

234

СТО был преобразован во Всесоюзный комитет по стандартизации. Большой объем работы по стандартизации выполнялся в годы первых пятилеток наркоматами (министерствами). В 1932 г. было принято постановление СНК СССР, в котором предусматривалась организация комитетов по стандартизации при хозяйственных наркоматах. На них постановлением СНК СССР „О реорганизации дела стандартизации" в 1936 г. была возложена вся ответственность за постановку дела стандартизации в соответствующих отраслях народного хозяйства. Это способствовало дальнейшему расширению масштабов стандартизации в стране, но в ряде случаев привело к дублированию работ по стандартизации между отдельными наркоматами и ведомствами. Поэтому в 1939 г. на XVIII съезде ВКП(б) было принято решение о необходимости упорядочения дела стандартизации и обеспечения более широкого применения стандартов в народном хозяйстве. В 1940 г. вышло постановление ЦК ВКП(б) и СНК СССР „О создании Всесоюзного комитета по стандартизации при Совнаркоме СССР" (ВКС) и в этом же году издан Указ Президиума Верховного Совета СССР „Об ответственности за выпуск недоброкачественной и некомплектной продукции и за несоблюдение стандартов промышленными предприятиями".

В послевоенный период особое развитие получила стандартизация в области машиностроения, металлургии, химии, электротехники и других отраслях народного хозяйства. Система управления государственной стандартизацией подверглась некоторым изменениям. В 1948 г. ВКС был включен в состав Государственного комитета Совета Министров СССР по внедрению передовой техники в народное хозяйство (Гостехника СССР). Одновременно с государственной развивалась отраслевая и заводская стандартизация. В Директивах XIX съезда КПСС по пятому пятилетнему плану развития народного хозяйства на 1951—1955 гг. партией была поставлена конкретная задача: „решительно внедрять государственные стандарты, отвечающие современным требованиям".

С 1951 по 1953 г. руководство работами по стандартизации осуществлялось Управлением по стандартизации при Совете Министров СССР, которое с 1953 г. было в ведении Госплана СССР. В 1954 г. при Совете Министров СССР был создан Комитет стандартов, мер и измерительных приборов. Комитет возглавил всю работу по стандартизации, метрологии и измерительной технике в стране. Право утверждения стандартов в области строительства было оставлено за Государственным комитетом по делам строительства (Госстрой СССР). Июньский (1959 г.) Пленум ЦК КПСС обязал Комитет стандартов, мер и измерительных приборов разработать план мероприятий по переводу изготовления продукции массового применения на производство по государственным стандартам, а также предложения по коренному улучшению работы по унификации и нормализации однотипных изделий и их составных частей. Для разработки научно-теоретических основ стандартизации и нормализации в системе Комитета стандартов создается Всесоюзный научно-исследовательский институт по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ),

организуются базовые отделы стандартизации в отраслях промышленности, службы стандартизации в научно-исследовательских организациях и на предприятиях.

В соответствии с постановлением Совета Министров СССР от 1 января 1965 г. № 16 „Об улучшении работы по стандартизации в стране“

была разработана Государственная система стандартизации (ГСС), объединяющая работы по стандартизации на всех уровнях управления народным хозяйством.

В 1970 г. Указом Президиума Верховного Совета СССР Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР был преобразован в Государственный комитет стандартов Совета Министров - СССР (Госстандарт СССР).<sup>\*</sup> Это решение было направлено на усиление руководства делом стандартизации в стране, повышение роли стандартов в улучшении качества продукции, укрепление государственной дисциплины и на повышение ответственности в этих вопросах. Основные направления деятельности Госстандарта СССР, министерств и ведомств в области стандартизации были определены постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 10 ноября 1970 г. № 937 „О повышении роли стандартов в

улучшении качества выпускаемой продукции". В соответствии с этим постановлением в планы государственной, отраслевой и республиканской стандартизации, начиная с 1971—1972 гг., стали включаться задания по повышению технического уровня и качества важнейших изделий и по повышению уровня унификации изделий машиностроения. Этим же постановлением было предусмотрено изучение в инженерно-технических и инженерно-экономических вузах и техникумах основ стандартизации и контроля качества продукции.

В IX—XI пятилетках партия и правительство уделяли пристальное внимание повышению научно-технического уровня стандартов и их роли в улучшении качества продукции. Проводилось обновление действующих стандартов и технических условий, обеспечивалась замена устаревших показателей, обеспечивалось усиление роли стандартов в ускорении научно-технического прогресса и экономном использовании сырья, материалов и энергоресурсов.

7 января 1985 г. было принято постановление Совета Министров СССР № 13 „Об организации работы по стандартизации в СССР“, в котором этот вид деятельности на предприятиях и в организациях отнесен к основным видам работ.

В XII пятилетке продолжалась работа по ускорению пересмотра стандартов и технических условий на продукцию с целью повышения ее качества. На важность этого направления деятельности было указано в докладе Генерального секретаря ЦК КПСС т. Горбачева М.С. на июньском

(1986 г.) Пленуме ЦК КПСС: „На повышение качества продукции нацелены меры технического и экономического характера, стандартизация и аттестация продукции, ценообразование, система морального и материального поощрения. На предприятиях вводится государственная вневедомственная приемка продукции". 12 мая 1986 г. ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли постановление „О мерах по коренному повышению качества продукции“, в котором сказано: „ . . . решение проблемы кардинального повышения качества продукции является прямой обязанностью каждого (С 1978 г. - Государственный комитет СССР по стандартам; с 1989 г. - Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам.)

коллектива, каждого рабочего, специалиста и руководителя. Борьба за повышение качества продукции должна стать нормой повседневной

жизни трудовых коллективов". Этим постановлением предусмотрено усилить роль и ответственность Госстандарта СССР в осуществлении единой государственной политике в вопросах качества продукции. Госстандарт СССР

обязан обеспечить:

координацию деятельности министерств и ведомств, направленной на достижение стабильных показателей качества, надежности и высокого технического уровня выпускаемой продукции;

активное воздействие на качество продукции путем систематического совершенствования стандартов и метрологического обеспечения;

высокую эффективность деятельности органов государственной приемки;

широкое участие совместно с министерствами и ведомствами в работе международных организаций по стандартизации.

Таким образом, можно сказать, что стандартизация в СССР — элемент государственной научно-технической политики. На современном этапе научно-технической революции она оказывает решающее влияние на качество продукции и о экономику.

*Работы в области стандартизации в СССР осуществляются по следующим направлениям:*

установление параметрических и типоразмерных рядов, базовых конструкций, конструктивно унифицированных составных частей изделий, оптимальных условий стандартизации и унификации с целью рационального ограничения номенклатуры продукции (сырья, материалов, комплектующих изделий, составных частей, программных средств, готовых изделий); установление прогрессивных требований к продукции, ее разработке, производству и применению с учетом рационального использования и снижения расхода сырья, материалов, энергии, топлива, запасных частей и инструмента, уменьшения затрат труда, требований внешнего рынка, международных стандартов и рекомендаций по стандартизации международных организаций, охраны окружающей среды, безопасности труда и охраны здоровья населения, защиты от вредных воздействий (шума, вибрации, радиопомех и др.), требований технической эстетики и эргономики, а также требований к методам и средствам контроля качества продукции, отражающим высшие достижения отечественной и зарубежной науки, техники, технологии и передовой опыт;

обеспечение конструктивной, электрической, информационной, программной, диагностической и других видов совместимости продукции а также взаимозаменяемости продукции по составными частям, комплектующим изделиям, материалам, параметрам, размерам и Ц п.;

обеспечение единства и необходимой точности измерений в стране посредством установления и применения научных и организационных основ, технических средств и метрологических правил;

повышение эффективности планирования работ по стандартизации на основе применения программно-целевого метода планирования, обеспечения единства и увязки планов стандартизации с другими разделами планов экономического и социального развития страны;

обновление действующих стандартов и технических условий на продукцию с целью своевременной замены устаревших показателей и приведения их в соответствие с потребностями народного хозяйства,

населения, обороны страны и экспорта;

проведение работ по международной стандартизации с целью обобщения передового зарубежного опыта в области стандартизации и применения его в СССР, повышения технико-экономического уровня и качества продукции, а также ее конкурентоспособности;

контроль за внедрением и соблюдением стандартов и технических условий.

*Главной задачей стандартизации в СССР* является создание системы нормативно-технической документации, определяющей прогрессивные требования к продукции, изготовляемой для нужд народного хозяйства, на

селения, обороны страны и экспорта, к ее разработке, производству и применению, а также контроль за правильностью использования этой документации.

При создании системы нормативно-технической документации в СССР необходимо обеспечивать:

опережающую стандартизацию сырья, материалов, комплектующих изделий, инструмента и технологии, качество и уровень которых оказывает решающее влияние на технико-экономические характеристики машин, приборов, средств автоматизации и других промышленных изделий, а также товаров народного потребления;

комплексную стандартизацию взаимосвязанных объектов стандартизации согласованием показателей, норм, требований к этим объектам стандартизации и увязку сроков введения в действие нормативно-технических документов;

оптимальность норм, правил, показателей, включаемых в нормативно-технические документы.

Стандартизацию в настоящее время следует рассматривать как научный метод работы, исходящий из единых, оптимальных требований к объекту и характеризующийся следующими основными составляющими элементами: объектом стандартизации, оптимальными требованиями, предъявляемыми к объекту, научно-исследовательской деятельностью по нахождению оптимального решения, приданием законной силы найденному оптимальному решению, специальной системой приемов трудовой деятельности. На основе обработки большого числа различных вариантов решения одной и той же повторяющейся задачи с помощью присущих стандартизации методов она вырабатывает обязательные оптимальные правила.

Стандартизация в процессе научно-технической революции выросла в самостоятельную науку, включающую в себя ряд специальных дисциплин, разделов, отраслей. Предметом стандартизации как науки являются варианты повторяющихся ситуаций или информация об этих вариантах. Поэтому в свою очередь стандартизацию следует рассматривать как одну из составных частей более общей науки об управлении - кибернетики, как -один из методов переработки информации с целью нахождения оптимального решения.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ

#### 9.1. ПРИНЦИПЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Принципами отечественной стандартизации являются обязательность соблюдения стандартов, плановость работ по стандартизации, перспективность, динамичность, эффективность, комплексность и системность.

Обязательность стандартов у нас в стране установлена постановлением ЦК ВКП(б) и СНК СССР от 9 июля 1940 г. № 1211. Несоблюдение стандартов преследуется по закону. За нарушение требований стандартов и технических условий конкретные виновники несут дисциплинарную, материальную и уголовную ответственность.

К должностным лицам, виновным в не внедрении, в несвоевременном внедрении стандартов или их несоблюдении, в соответствии с постановлением ЦИК и СНК СССР от 13 октября 1929 г. „Об основах дисциплинарного законодательства Союза ССР и союзных республик" могут быть применены следующие *меры дисциплинарного воздействия*: замечание, выговор, строгий выговор, перевод на нижеоплачиваемую работу или смещение на низшую должность на срок не свыше года, увольнение от должности. Дисциплинарная ответственность регулируется также Положением об органах народного контроля СССР, утвержденным постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР 19 декабря 1968 г. № 1020, и предусматривающим постановку на вид, выговор, строгий выговор, а за грубые нарушения государственной дисциплины, к которым относится отступление от требований стандартов и технических условий, — отстранение от занимаемой должности.

*Материальная ответственность* наступает в случае нанесения реального имущественного ущерба предприятию, организации или государству. За ущерб, причиненный предприятию при исполнении трудовых обязанностей, виновные в этом рабочие и служащие несут материальную ответственность в размере действительного ущерба, но не свыше одной трети своей месячной тарифной ставки (оклада). Материальную ответственность в размере причиненного ущерба, но не более двух третей среднего месячного заработка, несут рабочие и служащие за порчу по небрежности материалов, полуфабрикатов и изделий, а также лица административно-технического и административно-хозяйственного персонала за непринятие мер по борьбе с порчей изделий. По „Правилам производства денежных начетов комитетами народного контроля", утвержденным постановлением Совета Министров СССР от 4 августа" 1969 г. № 612, денежные начеты на должностных лиц за выпуск недоброкачественной в том числе несоответствующей стандартам продукции, производят в размере причиненного ущерба, но не свыше трех месячных окладов лица, на которое производится начет.

За неоднократный (два и более раз) или в крупных, размерах (на сумму свыше 10 ... 20 тыс. руб.) выпуск недоброкачественной, несоответствующей стандартам либо техническим условиям продукции, согласно ст. 152 УК РСФСР, директор, главный инженер и начальник отдела технического контроля, а также лица, занимающие другие должности, но

выполняющие обязанности указанных лиц, наказываются лишением свободы на срок до 3 лет, или исправительными работами на срок до 1 года, или увольнением от должности. Уголовные кодексы Узбекской ССР, Армянской ССР, Казахской ССР, Киргизской ССР и Латвийской ССР предусматривают ответственность даже за однократный выпуск недоброкачественной продукции независимо от размеров. Аналогичная квалификация состава данного преступления имеет место и в уголовных кодексах других союзных республик.

*Уголовную ответственность* за изготовление бракованной продукции должностные лица несут и по ст. 170 . . 172 УК РСФСР (злоупотребление властью или служебным положением). Злоупотребление служебным положением имеет место, например, при умышленном допущении брака с целью выполнения плана. К уголовной ответственности по ст. 157 I УК РСФСР привлекаются также лица, выпустившие в продажу недоброкачественные, нестандартные или некомплектные товары. Этот вид ответственности распространяется на работников складов, баз снабжения, магазинов. Своим постановлением „О судебной практике по делам о выпуске недоброкачественной, нестандартной или некомплектной продукции" Пленум Верховного суда СССР, состоявшийся в октябре 1971г., обязал суды обеспечивать неуклонное применение законов об ответственности за выпуск недоброкачественной продукции, выявлять всех виновных в совершении этого преступления, вскрывать причины и условия, порождающие его, принимая при этом меры к их устранению.

В апреле 1985 г. Пленум Верховного суда СССР, вновь вернувшись к рассмотрению этого вопроса, обратил внимание судов на то, что при выпуске недоброкачественной, нестандартной или некомплектной продукции ответственности подлежат директора, главные инженеры и иные указанные в законе должностные лица не только предприятий, производящих продукцию производственно-технического назначения либо товары народного потребления, но и предприятий, осуществляющих промышленный ремонт оборудования, машин, механизмов. Уголовная ответственность указанных лиц может наступить как при умышленной, так и при неосторожной вине. Особо подчеркнуто, что выпуск продукции ненадлежащего качества не может оправдываться ссылками на использование недоброкачественного сырья либо комплектующих изделий, поставленных другими предприятиями. В этой связи судам предложено тщательно выяснять, какие предприятия поставили недоброкачественное сырье или комплектующие изделия, и решать вопрос об ответственности виновных в этом.

Ответственность за выпуск в продажу недоброкачественных, нестандартных или некомплектных товаров наступает независимо от того, поступили ли они в таком виде от изготовивших их предприятий либо были испорчены в самих магазинах, торговых базах, складах, секциях. Уголовно наказуемым признается уже сам выпуск таких товаров в продажу, фактическое приобретение их покупателями не обязательно.

В случае необоснованных отказов прокуратуры в возбуждении уголовного дела против должностных лиц, виновных в выпуске некачественной, нестандартной продукции, органы госнадзора могут обратиться в прокуратуру, осуществляющую надзор за данной прокуратурой.

В работе по стандартизации в полной мере используется такое преимущество социалистической формы ведения хозяйства, как *п л а н о - в о с т ь*. Начиная с восьмой пятилетки планирование работ по стандартизации является составной частью системы государственного планиро-

вания.

Планирование стандартизации осуществляется на основе разработки взаимоувязанных перспективных плановых документов, пятилетних и годовых планов, в состав которых входят:

проблемный раздел „Развитие стандартизации и метрологии" Комплексной программы научно-технического прогресса на 20 лет (по пятилеткам) ;

основные направления развития стандартизации и метрологии как составная часть Основных направлений экономического и социального развития СССР на 10-15 лет;

. программы стандартизации, программы метрологического обеспечения, межотраслевые комплексные программы государственной службы стандартных справочных данных (ГСССД);

программы унификации продукции, имеющей важнейшее народно-хозяйственное значение;

пятилетний и. годовой планы государственной стандартизации; государственные пятилетний и годовой планы разработки и применения в СССР стандартов СЭВ;

пятилетний и годовой планы отраслевой стандартизации; пятилетний и годовой планы республиканской стандартизации; пятилетний и годовой планы стандартизации производственных и научно-производственных, объединений, предприятий, организаций и учреждений.

Главной формой планирования стандартизации являются пятилетние планы.

Каждый пятилетний план государственной стандартизации состоит из трех частей:

1. Общетеchnические и организационно-методические стандарты межотраслевого назначения.

2. Стандарты на продукцию промышленности, строительной индустрии и сельского хозяйства.

3. Унификация агрегатов, узлов и деталей машин, технологической оснастки и инструмента.

На основе пятилетних разрабатываются годовые планы государственной стандартизации, состоящие из следующих разделов:

1. Разработка новых и пересмотр действующих государственных стандартов,

2. Государственный надзор за внедрением стандартов.

3. Государственный надзор за соблюдением стандартов, технических условий и качеством продукции.

4. Разработка рекомендаций по стандартизации в рамках СЭВ.

5. Разработка рекомендаций в рамках ИСО.

6. Государственные испытания мер и измерительных приборов.

В планах более низкого уровня конкретизируются, уточняются и развиваются позиции планов государственной стандартизации.

Перспективность работ по стандартизации обеспечивается выпуском опережающих, стандартов, устанавливающих повышенные по отношению к достигнутому уровню нормы и требования к объектам стандартизации, которые будут оптимальными в будущем. Тем самым стимулируется ускорение темпов научно-технического прогресса. Базой опережающей стандартизации служат научно-технические прогнозы. В свою очередь опережающие стандарты ставят на прочную нормативную основу перспективное планирование, обеспечивая реальность. перспективных планов государственной производственной

дисциплиной.

В процессе разработки опережающих стандартов учитываются динамика развития науки и техники. В них узакониваются не достигнутые показатели и уровень качества выпускаемой продукции, а то, что еще находится в разработке и станет реальностью только через определенное время, указанное в стандарте. Опережающие стандарты позволяют планировать процесс повышения качества, дают в руки разработчиков и потребителей информацию о параметрах изделий в недалеком будущем. В известной мере они являются программой организации производства по выпуску продукции повышенного качества. В то же время на разработчиках опережающих стандартов лежит большая ответственность за правильность прогнозирования развития науки, техники на определенный период.

В качестве примера опережающей стандартизации в машиностроении можно привести работы по переводу всей промышленности СССР на международную систему допусков и посадок ИСО, которую применяют большинство стран мира.

В программу по сотрудничеству и экономической интеграции в рамках СЭВ в 1971 г. была включена разработка Единой системы допусков и посадок на основе рекомендаций Международной организации по стандартизации. Необходимость перехода на международную систему определялась углублением экономического сотрудничества стран — членов СЭВ с развивающимися и капиталистическими странами. Единая система допусков и посадок обеспечивает международную унификацию и стандартизацию изделий и технологической оснастки, взаимозаменяемость изделий, сборочных единиц и технологической оснастки, а также совместное проведение проектно-конструкторских работ, позволяющих непосредственно применять документацию без переработки в любой из стран.

СТ СЭВ 145—75 „Единая система допусков и посадок СЭВ. Общие • положения, ряды допусков и основных отклонений" и СТ СЭВ 144—75 „Единая система допусков и посадок СЭВ. Поля допусков и рекомендуемые посадки" были утверждены в 1975 г. и введены в действие как государственные стандарты начиная с 1977 г. с конечным сроком внедрения в 1980 г.. В данном случае опережение (разность между временем утверждения стандарта в 1975 г. и конечным сроком его внедрения в 1980 г.) I составило 5 лет.

Примером опережающего стандарта, в котором были установлены определенные перспективные параметры, но не указан срок их внедрения, является ГОСТ 721-62 на номинальные напряжения для электрических сетей, источников и приемников электрической энергии общего назначения. В этом стандарте были оставлены номинальные напряжения, перечисленные в ГОСТ 721-41, и добавлены новые значения, которые еще не применялись в промышленности: 660 В, 500 и 750 кВ, бывшие для того времени опережающими.

Стандартизация номинального напряжения 660 В определила направление развития электромашиностроения по линии увеличения единичной мощности, в первую очередь асинхронных двигателей, сначала для угольных шахт, затем в горной, химической и металлургической промышленности. Стандартизация этого перспективного опережающего значения напряжения направила усилия всех научных и производственных предприятий на решение конкретных задач по созданию мощных электродвигателей, трансформаторов, электрических аппаратов и других электрических устройств на напряжение 660 В.

Аналогичным было положение с напряжениями 500 и 750 кВ, которые

указывались в стандарте, но линий электропередач такого высокого напряжения ни у нас, ни за рубежом не было. Определение этих значений как стандартных позволило нацелить все организации, связанные с передачей электроэнергии, в одном направлении. Жизнь показала- экономическую целесообразность такой стандартизации, при пересмотре стандарта в 1977 г. в него были включены новые опережающие значения напряжения для мощных электродвигателей 1140 В и для высоковольтных линий электропередач 1150 кВ.

В комплексных программах, разработанных Госкомитетом СССР по науке и технике, Госпланом СССР и Академией наук СССР на 1981-1985 гг., было предусмотрено дальнейшее развитие Единой энергетической системы СССР - создание электрооборудования и сооружение мощных линий электропередач напряжением 1150 кВ протяженностью около 1300 км с пропускной способностью 5000 МВт. В то же время ведутся работы по созданию, впервые в мире, линии электропередач постоянного тока Экибастуз - Центр напряжением 1500 кВ протяженностью 2400 км с пропускной способностью 6000 МВт.

Таким образом, включение в стандарт опережающих параметров предопределяет направление развития соответствующей отрасли, т. е. стандартизация является направляющей, организующей силой в научно-техническом прогрессе.

Динамичность отечественной стандартизации обеспечивается периодической проверкой стандартов, внесением в них изменений, а также своевременным пересмотром или отменой стандартов. Действующие стандарты подлежат проверке в соответствии со сроками в информационных данных. При проверке определяется их научно-технический уровень, при необходимости разрабатываются предложения по обновлению устаревших-

показателей, норм, характеристик, требований, терминов, определений, обозначений, единиц физических величин. Результаты проверки могут служить основанием для пересмотра стандарта.

Изменения в стандарты вносятся согласно ГОСТ 1.15-85 „ГСС. Порядок проверки, пересмотра, изменения и отмены стандартов". При переиздании стандартов все изменения в них должны быть учтены.

Комплексность стандартизации обеспечивается разработкой программ, охватывающих стандартизацией не только готовые изделия, но и сырье, материалы, комплектующие изделия, элементы технологии, средства измерений, методы подготовки и организации производства. В условиях все усложняющихся связей по координации, интеграции и специализации производства, взаимодействию предприятий, министерств и ведомств программы комплексной стандартизации зарекомендовали себя как действенное средство межотраслевой, кооперации, преодоления ведомственных барьеров.

Комплексная стандартизация начала применяться у нас в стране в начале 30-х гг. Однако широкая разработка теоретических и методических основ и внедрение комплексной стандартизации начались после принятия в 1965 г. постановления Совета Министров СССР № 16 „Об улучшении работы по стандартизации в стране". В постановлении указывалось, что „основными задачами комплексной стандартизации являются: стандартизация показателей качества продукции и, в первую очередь, решение проблемы межотраслевой комплексной стандартизации сырья, материалов и полуфабрикатов, от которых зависят качество, надежность и долговечность готовых изделий". Обращалось внимание на необходимость при составлении текущих и перспективных планов стандартизации анализировать и учитывать возможные связи во всех действующих и разрабатываемых стандартах с увязкой сроков выполнения

работ.

Одним из первых мероприятий по реализации этого постановления было совершенствование силовых трансформаторов. План комплексной стандартизации по этому изделию вошел в пятилетний план по стандартизации на 1966—1970 гг. Были разработаны стандарты на основные параметры и технические требования к трансформаторам, на комплектующие изделия и материалы, кабельную бумагу, провода, фарфоровые изоляторы, масло, электротехническую сталь и т. п.

В этой же пятилетке проводились работы по комплексной стандартизации основных элементов энергетических блоков с целью улучшения основных параметров и эксплуатационных показателей котлов, турбин и турбогенераторов, сварочного оборудования, накопителей на магнитных лентах и др. Был разработан комплекс организационно-методических стандартов, к которым в первую очередь следует отнести Государственную систему стандартизации (ГСС), первые стандарты которой были утверждены в 1967—1968 гг. Одновременно создавался основной комплекс стандартов Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

В постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 10 ноября 1970 г. № 937 „О повышении роли стандартов в улучшении качества выпускаемой продукции" рассмотрены вопросы комплексной и опережающей стандартизации сырья и материалов, комплектующих изделий и инструмента. Это послужило предпосылкой для более широкого и глубокого решения проблем комплексной стандартизации и применения ее принципов в практике работы различных отраслей народного хозяйства.

В основу пятилетнего плана государственной стандартизации на 1971—1975 гг. были включены 25 проблем по комплексной стандартизации важнейших видов продукции. При реализации этого плана было разработано более 8000 государственных и 19000 отраслевых стандартов. План предусматривал создание таких межотраслевых систем, как ЕСТД, ЕСТПП, дальнейшее развитие ЕСКД и ряда других систем.

Комплексная стандартизация является методической основой комплексной системы управления качеством. В современном сложном и разнообразном производстве нельзя добиться значительного повышения качества отдельными разрозненными мероприятиями. Должна быть система, предусматривающая взаимосвязанные требования ко всем составным частям конечного изделия и к организационно-техническим мероприятиям, охватывающим все стадии жизненного цикла изделия, начиная с научных разработок, опытно-конструкторских работ и кончая эксплуатацией, включая ремонтные работы.

В ноябре 1975 г. ЦК КПСС принял постановление „О ходе выполнения" постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 10 ноября 1970 г. „О повышении роли стандартов в улучшении качества выпускаемой продукции". В постановлении был отмечен ряд положительных моментов по развитию работ в области комплексной опережающей стандартизации и указано на необходимость сосредоточить усилия государственной комплексной стандартизации прежде всего на важнейшей народнохозяйственной продукции, лучше использовать стандарты для повышения качества изделий, уровня отраслевой и межотраслевой унификации машин, приборов и оборудования. Работа, проведенная Госстандартом СССР и министерствами по выполнению этого решения, привела к более широкому использованию методов комплексной стандартизации.

В десятой пятилетке было разработано 160 программ комплексной стандартизации. Реализация этих программ внесла существенный вклад в

повышение научно-технического уровня ряда изделий. Впервые в целях более строгого контроля за реализацией программ по стандартизации в государственный план 1979 г. была заключена не только разработка государственных стандартов, но и задания по разработке отраслевых стандартов и технических условий.

Комплексные программы по стандартизации предусматривают развитие международной специализации и кооперирования производства, совместное строительство объектов, стандартизацию и унификацию продукции, являющейся предметом взаимных поставок стран — членов СЭВ. В период 1981-1985 гг. была продолжена разработка комплексов стандартов СЭВ и, в первую очередь, на методы испытаний, технические требования к топливу, сырью, продукции черной и цветной металлургии. В области горного дела принято пять программ по комплексным темам с разработкой 162 стандартов СЭВ, в области черной металлургии — 15 программ и 169 стандартов СЭВ; в области цветной металлургии — 4 программы и 262 стандарта СЭВ; в области химической и целлюлозно-бумажной промышленности разработаны 10 программ.

*Программа комплексной стандартизации* продукции представляет собой директивный плановый документ, устанавливающий состав и организацию работ по ее осуществлению. Комплекс нормативно-технических документов, включенных в программу, должен содержать перечень государственных, отраслевых, республиканских стандартов и других документов, внедрение которых обеспечивает достижение цели, поставленной в программе. Схема взаимосвязей объектов стандартизации и комплекс нормативно-технических документов разрабатываются с учетом сбалансированности значений показателей технического уровня и качества продукции, а также параметров технологических процессов. Учитываются также последовательность или параллельность разработки и внедрения отдельных нормативно-технических документов.

Программы комплексной стандартизации разрабатываются на основе следующих принципов:

опережающее развитие стандартизации сырья, материалов, комплектующих изделий;

выбор прогрессивных требований, норм и показателей, включаемых в стандарты и технические условия;

оптимизация показателей и объема работ по комплексной стандартизации и выбор наиболее эффективных направлений стандартизации.

Работы при составлении программ координируются, как правило, на межотраслевом уровне. Для реализации каждого комплексного плана по стандартизации назначается одна головная организация, на которую возлагаются руководство и координация работ по выполнению программ. Наличие согласованных и утвержденных программ комплексной стандартизации позволяет головным организациям обеспечить разработку комплекса взаимосвязанных стандартов и технических условий, координировать деятельность большого числа организаций-исполнителей и повышать действенность планов государственной, отраслевой и республиканской стандартизации.

Цели программ комплексной стандартизации, состав входящих в нее элементов и значения стандартизуемых показателей определяются с учетом результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В свою очередь в планы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ должны включаться мероприятия, предусмотренные

программами комплексной стандартизации.

Разработка программ комплексной стандартизации является важным звеном в планировании стандартизации, так как эти программы используются для подготовки предложений к проектам пятилетних и годовых планов государственной и республиканской стандартизации и определения заданий, включаемых в пятилетние и годовые планы отраслевой стандартизации. Программы разрабатываются министерствами и ведомствами в соответствии с основными направлениями стандартизации и метрологического обеспечения народного хозяйства и основными направлениями развития отраслей народного хозяйства на основе анализа перспективности, применимости, масштабов производства, достигнутого и планируемого уровня стандартизации и унификации выпускаемой продукции. Сроки разработки и реализации программ комплексной стандартизации определяются исходя из потребностей народного хозяйства, сложности и степени подготовленности решения проблемы.

Основные задания программ, включаемые в пятилетние планы государственной стандартизации, утверждаются в составе Государственного пятилетнего плана экономического и социального развития СССР.

Реализация этих заданий предусматривается годовыми планами государственной, отраслевой и республиканской стандартизации, составляемыми на основе „Перечня программ комплексной стандартизации, подлежащих реализации в планируемом пятилетии“.

Развитие комплексной стандартизации привело к образованию крупных общегосударственных межотраслевых систем стандартов, направленных на решение основных проблем в области управления народным хозяйством. Первыми из них были Государственная система стандартизации (ГСС), введенная в 1970 г., Единая система конструкторской документации (ЕСКД) — 1971 г. и Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) — 1973 г.

Комплекс стандартов „Государственная система стандартизации“ на основании постановления Совета Министров СССР от 7 января 1985 г. № 13 „Об организации работы по стандартизации в СССР“ устанавливает правила и положения, определяющие: 1) главную задачу и основные направления работы в области стандартизации; 2) объекты государственной, отраслевой и республиканской стандартизации; 3) категории и виды нормативно-технических документов, устанавливающих требования к объектам стандартизации; 4) порядок планирования стандартизации; 5) порядок разработки, внедрения, обращения нормативно-технических документов, а также государственного надзора за их внедрением и соблюдением; 6) построение, изложение, оформление и содержание нормативно-технических документов.

ЕСКД по структуре представляет собой комплекс взаимосвязанных стандартов, устанавливающих правила и положения по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации.

ГСИ — это комплекс регламентированных стандартами взаимосвязанных правил и положений, требований и норм, определяющих организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности I измерений. Являясь нормативной базой метрологического обеспечения, ГСИ включает в себя, кроме государственных стандартов, методические указания, инструкции и т. п.

ГСС, ЕСКД и ГСИ обладают системностью - одним из основных качеств

комплексной стандартизации.

В настоящее время существуют следующие системы (номер системы обозначается цифрой после аббревиатуры ГОСТ);

ГОСТ 1 — Государственная система стандартизации (ГСС); ■

ГОСТ 2 — Единая система конструкторской документации (ЕСКД);

247

ГОСТ 3 — Единая система технологической документации (ЕСТД)" ГОСТ 4 — Система показателей качества продукции (СПКП); ГОСТ 6 - унифицированные системы документации (УСД); ГОСТ 7 — Система информационно-библиографической документации;

ГОСТ 8 - Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ);

ГОСТ 9 - Единая система защиты от коррозии и старения материалов и изделий (ЕСЗКС) ;

ГОСТ 12 - Система стандартов безопасности труда (ССБТ) ;

ГОСТ 13 — микрофильмирование;

ГОСТ 15 - разработка и постановка продукции на производство;

ГОСТ 17 - система стандартов в области охраны природы и улучшения природных ресурсов;

ГОСТ 19 - Единая система программной документации (НСПД) ;

ГОСТ 21 - Система проектной -документации для строительства (СПДС);

ГОСТ 23 - обеспечение износостойкости изделий,

ГОСТ 24 - Система технической документации на АСУ;

ГОСТ 25 - расчеты и испытания на прочность 3 машиностроении.

Примерами комплексной стандартизации могут также служить система программ „Сталь", программа „Медь и медные сплавы. Плоский прокат", программы комплексной стандартизации в легкой промышленности, в рамках СЭВ и др.

Система программ комплексной стандартизации „Стал\*." охватывает всю продукцию черной металлургии и состоит из пяти самостоятельных программ: металлопродукция из углеродистой стали; металлопродукция из низколегированной стали; металлопродукция из легированных и высоколегированных сталей; металлопродукция из прецизионных метал; метрологическое обеспечение предприятий черной металлургия.

Программа определила конкретные требования к некоторым группам сталей, используемым в народном хозяйстве. Для выполнения них требований пришлось значительно снизить содержание серы в предельном чугуна и решить ряд других проблем, например, разработать методы снижения химической и структурной неоднородности слитков, расширить сортамент углеродистой кипящей стали и т. п. Повышение качества и расширение сортамента металлопродукции по первым двум программам комплексной стандартизации проблемы „Сталь" позволило сэкономить в народном хозяйстве свыше 2 млн. т металла.

Программа „Медь и медные сплавы. Плоский прокат" распространяется на полосы, листы и ленты из меди и ее сплавов. Плоский прокат из меди, латуней, бронз и других промышленных медных сплавов используется в электротехнической, радиотехнической, приборостроительной, химической, станкоинструментальной и других отраслях промышленности как полуфабрикат, для изготовления деталей и узлов- различного назначения,

Разработке программы предшествовали составление перечня основных

направлений улучшения качества прокатно-тянутых изделий (лист, полоса, лента), анализ предложений отраслей-потребителей к годовым и пятилетним планам стандартизации, анализ претензий по качеству и сортаменту выпускаемой продукции.

В легкой промышленности и десятой пятилетке разработано 8 программ комплексной стандартизации, таких, как „Ткани хлопчатобумажные бытовые“, „Ткани шерстяные и полушерстяные“, „Ткани шелковые и полшелковые из комплексных тканей“, „Ткани льняные“, „Обувь“, „Швейные изделия“, „Трикотажные изделия“, „Посуда фарфоровая, фаянсовая и майоликовая“. Реализация этих программ позволила повысить требования к качеству и предъявить оптимальные требования к продукции смежных отраслей — машиностроения, приборостроения, химии, сельского хозяйства и др.

В одиннадцатой пятилетке разработаны такие программы, как „Спец-одежда“, „Кожевенные и прикладные материалы“, „Фурнитура“, „Кожа искусственная.. мягкая“, „Одежда детская“, „Мех искусственный» трикотажный“ к др.

Программа „Ткани хлопчатобумажные бытовые“ занимает ведущее место среди программ комплексной стандартизации продукции легкой промышленности. Эти ткани имеют наибольший удельный вес в общем выпуске продукции текстильной отрасли и постоянно пользуются повышенным спросом на внутреннем и международном рынках, так как обладают высокими гигиеническими показателями (они воздухопроницаемы, гигроскопичны, не электризуются и т. п.), что делает их незаменимыми для изготовления летней одежды и белья. Ассортимент этих тканей очень разнообразен по фактуре и колористике. Целью разработки программы было обеспечение соответствия качества исходных материалов, технологического оборудования и вспомогательных материалов/ровню, необходимому \*для выпуска качественных хлопчатобумажных тканей.

Сроки разработки, пересмотра и внедрения НТД по программе включали два этапа: первый — 1971—1980 гг., второй — 1981—1985 гг.

Одним из самых существенных факторов, влияющих на реализацию программ комплексной стандартизации, является установление взаимосвязи министерств (ведомств), участвующих в их выполнении. Для обеспечения программы „Ткани хлопчатобумажные бытовые“ были подготовлены предложения-заявки к смежным отраслям для включения в стандарты и технические условия, разрабатываемые этими отраслями, повышенных требований к прядильному, ткацкому, отделочному оборудованию, а также хлопковому волокну.

Программа комплексной стандартизации „Швейные изделия“ направлена на повышение качества швейных изделий, обновление и расширение их ассортимента за счет производства изделий из новых материалов на основе технического перевооружения и модернизации оборудования, внедрения новых высокопроизводительных технологических потоков и средств малой механизации. В десятой пятилетке была проведена большая работа по стандартизации продукции в швейной и смежных отраслях.

Программа „Швейные изделия“ включила в себя также разработку типовой документации по комплексной системе управления качеством: типовой проект КС УКП для швейных предприятий и типовой проект

КС УКП для Дома моделей, в которых определяются принципы построения системы и дается рекомендуемый комплекс нормативно-технических документов для обеспечения функционирования КС УКП.

Комплексная стандартизация в рамках СЭВ осуществляется с учетом специализации, кооперирования и возможностей каждой страны и в рамках международного сотрудничества представляет собой сложную проблему. Для ее решения в 1972 г. в Москве был проведен Международный симпозиум стран — членов СЭВ по комплексной стандартизации, на котором были рассмотрены теоретические, методические, практические вопросы, а также опыт выполнения работ по комплексной стандартизации отдельными странами.

Комплексная стандартизация является во многом новой для международной практики. Она предусматривает одновременную разработку и внедрение стандартов СЭВ, регламентирующих качество готовой продукции, исходного сырья, материалов, комплектующих элементов, требования к методам и средствам испытаний и измерений, к упаковке, транспортированию и хранению продукции.'

Работы по комплексной стандартизации, проведенные в отраслях промышленности в девятой и десятой пятилетках в нашей стране, подготовили базу для разработки долгосрочных целевых программ сотрудничества стран — членов СЭВ (ДЦПС), которые развивают Комплексную программу социалистической экономической интеграции, определяют согласованную стратегию сотрудничества этих стран на период до 1990 г., а по некоторым вопросам и на последующие годы. Цель разработки ДЦПС — обеспечение стран — членов СЭВ энергией, топливом, сырьем, продуктами питания, товарами народного потребления, создание единой системы обеспечения транспортными средствами. Реализация программ будет осуществляться через систему конкретных соглашений в производственной и научно-технической областях. Было утверждено пять долгосрочных целевых программ по сотрудничеству: энергетика, топливо, сырье; сельское хозяйство и пищевая промышленность; машиностроение; промышленные товары народного потребления; транспорт. Эти программы определяют конкретные мероприятия, направленные на удовлетворение экономически обоснованных потребностей стран—членов СЭВ в основных видах энергии, топлива и сырья, в машинах и оборудовании на основе глубокой специализации и кооперирования производства, а также *и* удовлетворение рациональных потребностей в основных видах продовольствия и промышленных товаров народного потребления, на модернизацию и развитие транспортных связей. Они способствуют подтягиванию менее развитых в промышленном отношении социалистических государств к уровню передовых.

## ***9.2. МЕТОДЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ***

Методами стандартизации являются унификация, агрегатирование и типизация, обеспечивающие взаимозаменяемость и специализацию на разных уровнях.

Под *унификацией* понимается один из важнейших методов стандартизации, заключающийся в рациональном сокращении видов, типов и размеров изделий одинакового функционального назначения, а также узлов и деталей, входящих в изделие с целью создания ограниченного

числа взаимозаменяемых узлов и деталей, позволяющих собирать новые изделия с добавлением определенного количества оригинальных элементов. Чем больше унифицированных узлов и деталей в машине, тем короче сроки проектирования и изготовления, так как сокращается количество чертежей, вновь разрабатываемых технологических процессов, проектируемой оснастки. Унификация позволяет снизить стоимость производства новых изделий, повысить серийность и, следовательно, уровень автоматизации производственных процессов, снизить трудоемкость изготовления, обеспечить большую мобильность промышленности при выпуске новых изделий, организовать специализированные производства.

Унификация изделий осуществляется на основе определенного их подобия в выполнении аналогичных функций. Унификация, целесообразность которой экономически обоснована, должна завершаться стандартизацией унифицированных изделий. При этом необходимо помнить, что унификация должна производиться с учетом перспектив совершенствования узлов и деталей. Понятие „унификация машин и оборудования“ распространяется на типы, основные размеры и параметры машин и их составных частей — узлов и деталей.

Наиболее элементарным видом унификации является „*симплификация*“ - простое сокращение наименее употребительных элементов до целесообразного минимума. Симплификация используется для рационального ограничения номенклатуры объектов при разработке ограничительных стандартов. Различаются следующие виды унификации: типоразмерная, внутритиповая и межтиповая.

*Типоразмерная унификация* осуществляется в изделиях одинакового функционального назначения, отличающихся друг от друга числовым значением главного параметра.

*Внутритиповая унификация* осуществляется в изделиях одного и того же функционального назначения, имеющих одинаковое числовое значение главного параметра, но отличающихся конструктивным исполнением составных частей.

*Межтиповая унификация* осуществляется в изделиях различного типа и различного конструктивного исполнения (например, унификация продольно-фрезерных, строгальных, шлифовальных станков между собой).

Работы по унификации могут проводиться на трех уровнях: заводском, отраслевом, межотраслевом. Кроме того, в последнее время успешно

развивается международная унификация. Работа по унификации проводится в определенной последовательности. В первую очередь необходимо определить направление, вид и уровень унификации, затем произвести сбор и анализ чертежей унифицируемых изделий, классифицировать чертежи в соответствии с поставленной задачей. Далее либо разрабатывается новая конструкция, либо выбирается одна из существующих в качестве унифицированной конструкции, которая сможет заменить все ранее применявшиеся. Затем устанавливается оптимальное количество типоразмеров и разрабатывается стандарт на конструктивно-унифицированный ряд деталей. Завершающим этапом работы по унификации является организация специализированного производства стандартных деталей.

Уровень унификации изделий или их составных частей определяется

с помощью системы показателей, из которых обязательным является коэффициент применяемости на уровне типоразмеров.

Под коэффициентом применяемости понимается выраженное в процентах отношение количества заимствованных, купленных и стандартизованных типоразмеров к общему количеству типоразмеров изделия.

Коэффициент применяемости по типоразмерам  $K_{np}^T$ , %, вычисляют по формуле

$$K_{np}^T = \frac{n - n_0}{n} \cdot 100,$$

где  $n$  — общее количество типоразмеров изделий;  $n_0$  — количество оригинальных типоразмеров. К оригинальным относятся составные части, разработанные для данного изделия.

В соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 10 ноября 1970 г. № 937 „О повышении роли стандартов в улучшении качества выпускаемой продукции" планирование уровня унификации изделий является составной частью государственного планирования и должно увязываться с планом развития всего народного хозяйства СССР. Существуют перспективные и годовые планы работ по унификации, в которых задаются показатели уровня унификации отдельных изделий и показатели уровня унификации для групп изделий. Постановление обязывает министерства и ведомства устанавливать в технических заданиях на разработку новых изделий уровень унификации с учетом современных достижений науки и техники и возлагает на генеральных и главных конструкторов и руководителей конструкторских бюро персональную ответственность за обеспечение высокого уровня унификации вновь разрабатываемых, — **изделий**. Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986- 1990 гг. и на период до 2000 г. предусмотрено „углублять отраслевую и межотраслевую унификацию машин, узлов и деталей". . . Обеспечить максимальную унификацию узлов и деталей. Осуществить меры по созданию машин, оборудования и приборов на основе унифицированных блочно-модульных. и базовых конструкций". Последняя задача относится к агрегатированию и типизации, которые можно рассматривать как более высокие уровни унификации.

*Агрегатирование* — это метод создания и эксплуатации машин, приборов и оборудования из отдельных стандартных, унифицированных узлов, многократно используемых при создании различных изделий на основе геометрической и функциональной взаимозаменяемости.

Агрегатирование обеспечивает расширение области применения машин путем замены их отдельных узлов и блоков, возможность компоновки машин, приборов, оборудования разного функционального назначения из отдельных узлов, изготавливаемых на специализированных предприятиях, создания универсальных приспособлений при разработке технологической оснастки и т. д.

Агрегатирование позволяет также увеличить номенклатуру выпускаемых машин и оборудования за счет модификации их основных типов и создания различных исполнений. Кроме того, агрегатирование дает возможность применения приспособлений и сложной технологической механизированной и автоматизированной оснастки за счет использования общих агрегатов и узлов, организации высокопроизводительного ремонта машин и других изделий за счет использования взаимозаменяемых

агрегатов и узлов.

Агрегатированное оборудование обладает конструктивной обратимостью, что дает возможность многократного применения стандартных агрегатов и узлов в новых компоновках при изменении конструкций объекта производства и при необходимости быстрой переналадки производства на выпуск новых видов продукции в гибких производственных системах. Поэтому у агрегатного оборудования в наибольшей степени развита конструктивная преемственность, упрощен ремонт, снижена номенклатура западных частей. При разработке научных основ агрегатирования используются основные положения теории машин и механизмов. Для определения рациональной разбивки конструкций на элементы необходимо использовать классификатор деталей. Агрегатирование дает возможность уменьшить объем\* проектно-конструкторских работ, сократить сроки подготовки и освоения производства, снизить трудоемкость изготовления изделий и снизить расходы на ремонтные операции. Дальнейшее развитие принципов агрегатирования требует разработки вопросов теории. Так, широкое внедрение агрегатирования должно сопровождаться разработкой параметрических стандартов и стандартов на показатели качества, надежности и долговечности различных типов машин и оборудования. При этом необходимо обеспечивать опережающее развитие работ по унификации деталей, узлов и агрегатов. Примером агрегатированного оборудования в машиностроении является агрегатный станок; в котором на круглой станине устанавливаются несколько головок, позволяющих присоединять различные насадки и выполнять сверлильно-расточные, резьбовые, фрезерные и другие операции. Принцип агрегатирования широко используется при создании стандартной переналаживаемой оснастки, изготавливаемой из стандартных узлов, деталей и заготовок. Примером в данном случае является система универсально-сборных приспособлений (УСП), которые komponуют из взаимозаменяемых элементов: плит, угольников, стоек, опор, прихватов, зажимов и т. п. и используют для сверлильных, фрезерных, токарных, сварочных, сборочных и других операций.

В машиностроении используется метод базового агрегата, при котором, присоединяя к базовой модели машины специальное оборудование, получают ряд производных машин различного назначения. Примером служит создание конструктивно-унифицированного ряда колесных транспортных и дорожно-транспортных машин. Используется также метод секционирования — разделение машин на одинаковые унифицированные секции, из которых собирается ряд производных машин: ковшовые экскаваторы, транспортеры, воздуходувки, насосы и т. п.

Принцип агрегатирования используется при создании контрольно-измерительных приборов, которые могут компоноваться из унифицированных электронных блоков, датчиков, самописцев, измерительных головок, элементов пневматических приборов и т. д.

Агрегатирование нашло широкое применение также в радиоэлектронике при проектировании радиоэлектронной аппаратуры на основе прогрессивного функционально-узлового метода. В радиоэлектронике разрабатываются унифицированные функциональные узлы, которые играют ту же роль, что и агрегаты в машиностроении, и позволяют

создавать большое количество радиоэлектронных устройств.

В перспективе развитие агрегатирования в масштабе всей страны позволит:

перейти от конструирования специального оборудования к выбору стандартных узлов и агрегатов и компоновки их в таких сочетаниях, которые наиболее полно будут удовлетворять требованию получения от новой машины оптимальных потребительских свойств;

сократить сроки проектирования и освоения новых машин с четырех—шести до полутора—двух лет за счет использования освоенных ранее узлов. При этом изменится процесс проектирования, так как создание машины превратится в процесс подбора и компоновки ее из готовых узлов, что значительно сократит объем документации;

увеличить объем производства машин на тех же площадях и снизить стоимость их изготовления на 25—30 %\

уменьшить требующийся парк машин на 20-25 % за счет лучшего их использования, сократив соответственно количество обслуживающего персонала}

оснастить народное хозяйство новым парком универсальных машин, состоящих на 70-75 % из унифицированных узлов и агрегатов.

*Типизация* - метод стандартизации, заключающийся в установлении типовых объектов для данной совокупности, принимаемых за основу (базу) при создании других объектов, близких по функциональному назначению. Этот метод иногда называют методом „базовых конструкций“, так как в процессе типизации выбирается объект, наиболее характерный для данной совокупности, с оптимальными свойствами, а при получении конкретного объекта — изделия или технологического процесса выбранный объект (типовой) может претерпевать лишь некоторые частичные изменения или доработки. Таким образом, типизация является распространением большого количества функций на малое число объектов, так как обеспечивает сохраняемость только типовых объектов из данной совокупности. Эффективность типизации обусловлена использованием проверенного решения при разработке нового изделия, ускорением и снижением стоимости подготовки производства изделий, создаваемых на одной базе, облегчением условий эксплуатации типовых (базовых) изделий и их модификаций. Типизация завершается стандартизацией разработанных типовых объектов.

Типизация как эффективный метод стандартизации развивается в трех основных направлениях: стандартизация типовых технологических процессов, стандартизация типовых изделий общего назначения, создание нормативно-технических документов, устанавливающих порядок проведения каких-либо работ, расчетов, испытаний и т. п.

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 гг. и на период до 2000 г. предусмотрено „развивать на основе перспективных научно-технических достижений типизацию технологий“. Типизация технологических процессов обусловлена неоправданно большим разнообразием существующих вариантов технологических процессов при изготовлении аналогичных деталей, что приводит к повышению себестоимости их изготовления. Очень часто новый технологический процесс изготовления (обработки или сборки) изделия разрабатывается заново без учета существующего опыта. Кроме того, на различных заводах на одну и ту же деталь (узел) могут быть созданы различные технологические процессы. При смене объекту производства весь

объем технологических разработок повторяется заново и значительная часть технологических процессов дублирует ранее разработанные процессы. в то время как установлено, что для отдельных элементов конструкций изделий до 70-80 % всей их номенклатуры переходит из изделия в изделие с незначительными изменениями, охраняя основные конструктивно унифицированные параметры, характерные для данного типа.

В гибких производственных системах при быстрой смене конструкций изделий необходимо создавать технологические процессы не применительно к одному, конкретному изделию, а в расчете на использование их при изготовлении большинства типовых деталей и узлов данного вида, т. е. на основе типизации. Типизация технологических процессов базируется на классификации деталей и узлов и установлении типовых представителей, обладающих наибольшим количеством признаков, характерных для деталей или узлов данного типа.

Первым этапом типизации и последующей стандартизации технологических процессов является классификация объектов основного и вспомогательного производства, технологических операций и средств технологического оснащения (оборудования, приспособлений, режущего и мерительного инструмента). Она ведется на базе „Технологического классификатора деталей машиностроения и приборостроения“, в соответствии с которым детали группируют по признакам, определяющим общность технологического процесса их изготовления. Технологическое подобие деталей определяется совокупностью конструктивных признаков, главным из которых является геометрическая форма, а также технологическими характеристиками деталей. Технологический код деталей, сформулированный в соответствии с „Технологическим классификатором“, служит для подбора деталей по технологическому подобию в группы, оптимальные по числу подобных деталей. Такое группирование является обязательным условием типизации технологических процессов и способствует внедрению группового метода обработки.

Использование „Технологического классификатора“ дает возможность механизировать процесс анализа технологических документов, позволяет применять ЭВМ для обработки информации и создает поэтому базу для внедрения АСУТП.

Типизация технологических процессов включает анализ возможных технологических решений при изготовлении деталей классификационной группы и проектирование оптимального типового процесса для каждой группы.

Типовой технологический процесс, являющийся общим для группы . деталей, имеет единый план обработки по основным операциям, однотипное оборудование и оснастку. При разработке типового технологического процесса за основу может быть взят наиболее совершенный действующий технологический процесс или спроектирован новый.

Основным методом типизации технологических процессов следует считать метод технологической последовательности, основанный на общности технологических процессов (операций переходов). Документацию на типовой технологический процесс необходимо оформлять в соответствии с требованиями стандартов ЕСТД. Типовой технологический процесс оформляется в виде карт технологического маршрута и набора стандартных карт (технологических стандартов).

*Взаимозаменяемость* — это свойство независимо изготовленных деталей,

узлов и агрегатов обеспечивать беспрепятственную сборку машин или приборов и выполнять свое служебное назначение без нарушения технических требований, предъявляемых к данному изделию в целом. Взаимозаменяемыми детали и узлы являются в то,;, случае, если характеризующие их параметры находятся в заданных пределах. Требования взаимозаменяемости предъявляются к таким параметрам, как точность сопрягаемых размеров, отклонения формы к расположения поверхностей, волнистость и шероховатость, физико-химические свойства материалов. Беспрепятственная сборка (монтажные требования). обеспечивается за счет точности геометрических параметром. а для обеспечения функциональных требований необходимо обеспечить заданную точность функциональных параметров, т. е. таких параметров, которые влияют на эксплуатационные показатели изделий и на служебные функции деталей и узлов. Так, от размера зазора между поршнем и цилиндром (функционального параметра) зависит мощность двигателей (эксплуатационный показатель) . Зазор в- подвижном соединении должен обеспечивать не только сборку и точность взаимного расположения, но и минимальное трение, компенсацию температурных изменений и износа и других факторов, влияющих на выходные эксплуатационные характеристики — долговечность, точность перемещения, расход масла и т. п.

Функциональные требования наиболее полно учитываются на основе метода функциональной взаимозаменяемости. Под методом функциональной взаимозаменяемости понимают определение точности геометрических и физико-химических параметров деталей и узлов на основе достаточно строго установленных связей между этими параметрами и эксплуатационными показателями. При этом исходят из экономически оптимальных пределов изменения эксплуатационных показателей.

Различают взаимозаменяемость полную и неполную, внешнюю и внутреннюю.

*Полная взаимозаменяемость* обеспечивается соблюдением параметров с такой точностью, которая допускает сборку и замену любых сопрягаемых деталей узлов и агрегатов без каких-либо дополнительных мероприятий — обработки, подбора, регулировки. При полной взаимозаменяемости упрощается процесс сборки, и создаются условия для ее автоматизации, специализации и кооперирования, упрощается ремонт. В тех случаях, когда возникает необходимость изготовлять детали с малыми и трудновыполнимыми допусками, нецелесообразными с экономической точки зрения, от полной взаимозаменяемости переходят к неполной.

*Неполная (ограниченная) взаимозаменяемость* характеризуется возможностью проведения таких дополнительных мероприятий при сборке, как групповой подбор деталей (селективная сборка), применение компенсаторов, регулировка положения, пригонка.

*Внешняя взаимозаменяемость* — это взаимозаменяемость покупных и кооперируемых изделий и узлов по эксплуатационным показателям, а также по размерам и форме присоединительных поверхностей, по которым взаимосвязанные узлы основного изделия соединяются между собой, а также с покупными и кооперируемыми изделиями.

*Внутренняя взаимозаменяемость* — это взаимозаменяемость деталей, составляющих отдельные узлы, или составных частей и механизмов, входящих в изделие. Например, в подшипниках качения внешняя взаимо-

заменяемость осуществляется по наружному диаметру наружного кольца и по внутреннему диаметру внутреннего кольца, а внутренней взаимозаменяемостью обладают тела качения и кольца.

Уровень взаимозаменяемости производства характеризуется коэффициентом взаимозаменяемости, который равен отношению трудоемкости изготовления взаимозаменяемых деталей и частей к общей трудоемкости изготовления изделия. Он является показателем технического уровня производства. Взаимозаменяемость позволяет расчленить производственный процесс, повысить производительность труда на сборочных операциях, организовать серийное и массовое производства, выделить специализированное производство отдельных деталей, узлов и агрегатов, осуществить кооперирование производства, агрегатирование, внедрить механизацию и автоматизацию производственных процессов, в том числе сборки. В эксплуатации взаимозаменяемость обеспечивает помимо требуемой надежности и долговечности изделий бесподгоночную замену старых узлов и деталей, облегчает ремонт. Нормативной базой взаимозаменяемости является стандартизация.

Существуют стандарты, которые регламентируют общие нормы взаимозаменяемости, и стандарты, содержащие требования взаимозаменяемости конкретных изделий. К стандартам первой группы в основном относятся государственные стандарты, распространяющиеся на все машиностроение и приборостроение или на несколько отраслей (стандарты на ряды предпочтительных чисел, ряды нормальных линейных размеров, стандарты на допуски и посадки, резьбы, зубчатые передачи и т. п.). В стандартах второй группы устанавливаются, как правило, требования, определяющие внешнюю взаимозаменяемость (основные присоединительные размеры, допуски этих размеров, выходные эксплуатационные характеристики и их допустимые отклонения). Показатели взаимозаменяемости в таких стандартах должны соответствовать общим нормам.

С развитием экономических связей между странами и ростом международной торговли большое значение приобретает обеспечение взаимозаменяемости в международном масштабе, в связи с чем большое внимание вопросам взаимозаменяемости уделяется в деятельности международных организаций по стандартизации. В нашей стране, как уже отмечалось, осуществлен переход на системы допусков СЭВ.

Унификация, агрегатирование, типизация и взаимозаменяемость являются базой для развития работ по специализации. Возможны два пути увеличения выпуска продукции: первый - расширение производственных площадей и увеличение численности рабочих (экстенсивный); второй — развитие специализации производства (интенсивный). Стоимость изделий при специализированном производстве снижается. Специализация может быть предметной, поддетальной, технологической и функциональной.

*Предметная специализация* заключается в том, что на отдельном предприятии сосредоточивается выпуск определенной продукции, соответствующей профилю предприятия, например, специализация завода по выпуску тракторов, станков и т. д. При предметной специализации используется принцип преемственности конструкции, что означает установление ограниченного перечня типов машин (подлежащих выпуску), построенного на основе параметрических рядов. В результате увеличивается объем выпуска и снижается себестоимость продукции. Предметная специализация — это начальная форма специализации производства.

*Подетальная специализация* заключается в том, что в процессе изготовления выделяется производство отдельных деталей, узлов и сборочных единиц. Этот вид специализации экономически наиболее выгоден. При подетальной специализации предприятия-смежники поставляют сборочным предприятиям необходимые детали, узлы, агрегаты (например, крепежные детали, шарикоподшипники, зубчатые колеса и др.).

*Технологическая специализация* — это выделение отдельных стадий технологического процесса в специализированные заводы, цехи, участки (например, производство отливок, поковок, штамповок, изготовление сварных металлоконструкций; механическая обработка и сборка в машиностроении: организация прядильных, ткацких, отделочных фабрик в текстильной промышленности и т. д.). При технологической специализации увеличиваются масштабы производства, повышается производительность труда, снижается себестоимость, рациональнее используются средства производства.

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 гг. и на период до 2000 г. предусмотрено „расширить предметную, подетальную и технологическую специализацию и кооперирование производства, эффективно сочетая со специализированными заводами механосборочные предприятия“.

*Функциональная специализация* возникла в результате разделения и кооперирования труда в области вспомогательного обслуживания производства. Наиболее важной разновидностью функциональной специализации является организация централизованного ремонтного обслуживания группы предприятий, объединенных по тем или иным признакам: территориальному, отраслевому или эксплуатационному (например, специализированный ремонт станков, автомобилей, тракторов). Функциональная специализация обеспечивает высокую производительность и снижение себестоимости вспомогательного обслуживания производства.

В последнее время получают широкое распространение агрегатная, предметно-агрегатная и подетально-технологическая специализации, развивается межотраслевая и территориальная специализации промышленности на основе создания районных комплексов специализированных производств. Такие комплексы включают предприятия всех видов специализации на основе расчета экономически выгодных радиусов кооперирования.

Специализация может осуществляться на заводском, отраслевом и межотраслевом уровнях. Успешно развивается международная специализация, особенно в рамках СЭВ.

### **9.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ БАЗА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ**

Многообразие типов, параметров и размеров изделий регламентируется *параметрическими стандартами*. Тем самым предотвращается возможность производства неоправданно большой номенклатуры изделий в той или иной отрасли промышленности, создаются благоприятные условия для широкой унификации деталей и узлов, для развития предметной и подетальной специализации и для облегчения эксплуатации и ремонта изделий, в частности, проще решается проблема запасных частей. Согласование параметров и размеров методом параметрической стандартизации позволяет увязать между собой различные отрасли промышленности, проще решается проблема запасных частей. Это дает большой экономический эффект в масштабе

всего народного хозяйства страны.

Сущность параметрической стандартизации состоит в том, что параметры и "размеры серийно выпускаемых изделий устанавливаются не произвольно, а в соответствии с *рядами предпочтительных чисел*, т. е. таких чисел, которым предписывается отдавать предпочтение по сравнению со всеми другими. Примеры использования предпочтительных чисел встречаются повсюду: размеры одежды и обуви, длина гвоздей, диаметры болтов и внутренних отверстий гаек, номинальные значения массы гирь, мощности электрических машин и т. д. Результатом использования именно предпочтительных чисел как раз и является такое согласование параметров и размеров, в том числе и в межотраслевом отношении, которое обеспечивает взаимозаменяемость деталей, создание гибких производственных систем, автоматизацию и механизацию производственных процессов, увеличение количества и повышение качества выпускаемой продукции, рост производительности труда и эффективности общественного производства.

Предпочтительным числам свойственны определенные математические закономерности. Так, наипростейшие ряды предпочтительных чисел строятся на основе арифметической прогрессии, т. е. такой последовательности чисел, в которой разность между последующим и предыдущим членами (она называется разностью прогрессии) остается постоянной. Примерами арифметической прогрессии являются последовательности:

а) возрастающая с разностью 1:

1-2-3-4-5-6-7-

б) возрастающая с разностью 2:

1-3-5-7-9-11-13- ...,

в) убывающая с разностью 0,1:

1-0,9-0,8-0,7-0,6-0,5- .... Любой член арифметической

прогрессии можно вычислить формуле

$$a_n = a_1 + d(n - 1),$$

где  $a_1$  — первый член прогрессии,  $d$  — разность прогрессии,  $n$  — номер взятого члена.

Ряды предпочтительных чисел, основанные на арифметической прогрессии, используются в параметрических стандартах сравнительно редко, однако такие стандарты есть. Это, например, стандарты на диаметры подшипников качения, стандарты на размеры обуви (как по штихмассовой, так и по метрической системе) и др. Достоинством рядов предпочтительных чисел, базирующихся на арифметической прогрессии, является их простота, недостатком — относительная неравномерность. Так, в примере возрастающей арифметической прогрессии с разностью 1 второй член превышает первый на 100 %, десятый больше девятого на 11 %, а сотый больше девятого всего на 1 %. В результате большие значения следуют сравнительно чаще друг за другом, их оказывается больше, чем маленьких, что отнюдь не всегда рационально и соответствует потребностям народного хозяйства.

Для преодоления этого недостатка используют отрезки рядов, построенных на основе арифметической прогрессии, с большими номерами, где неравномерность выражена менее, или используют ступенчато - арифметические прогрессии. Такую прогрессию образуют, например,

достоинства

монет:

1-2-3-5-10-15-20 коп.,

где разность прогрессии принимает значения 1 и 5. Ступенчатая арифметическая прогрессия у нас « стране была использована для параметрической стандартизации еще в 1717 г., когда по указу Петра I установили калибры ядер: 4, 6, 8, 12, 18, 24, 36. В настоящее время она находит применение в стандартах на диаметры резьба, размеры болтов, винтов, шпилек и других деталей машин.

С древнейших времен для построения рядов предпочтительных чисел использовалась геометрическая прогрессия, т. е. такая последовательность чисел, в которой отношение последующего к предыдущему члену (оно называется знаменателем прогрессии) остается постоянным. Примерами геометрической прогрессии являются последовательности:

а) возрастающая со знаменателем 1,1:

1-1,1-1,21-1,33-

б) убывающая со знаменателем 0,1:

1-0,1-0,01-0,001- ....

Любой член геометрической прогрессии можно вычислить по формуле

$$a_n = a_1 q^{n-1}$$

где  $a_1$  — первый член;  $q$  - знаменатель прогрессии;  $n$  — номер взятого члена.

Геометрическая прогрессия имеет ряд полезных свойств, используемых в стандартизации.

1. Относительная разность между любыми соседними членами ряда постоянна. Это свойство вытекает из самой природы геометрической прогрессии. Возьмем в качестве примера простейшую прогрессию со знаменателем, равным двум:

1\_2\_4-8-16-32-64-здесь любой член прогрессии больше предыдущего на 100 %.

2. Произведение или частное любых членов прогрессии является членом той же прогрессии. Это свойство используется при увязке между собой стандартизуемых параметров в пределах одного ряда предпочтительных чисел. Согласованность параметров является важным критерием качественной разработки стандартов. Геометрические прогрессии позволяют согласовывать между собой параметры, связанные не только линейной, но также квадратичной, кубичной и другими зависимостями.

Еще в Древней Римской империи диаметры колес в водопроводах были выбраны в соответствии с геометрической прогрессией. В конце XVII - начале XVIII вв. в Германии для расчета темперированного музыкального строя была применена геометрическая прогрессия со знаменателем  $^x u T$ . Во Франции в 1805 г. размеры типографского шрифта были установлены в соответствии с геометрической прогрессией. В конце прошлого века русский ученый академик А.В. Гадолин разработал теорию рационального построения кинематических соотношений в металлообрабатывающих станках, основанную на использовании закономерных рядов чисел, и научно обосновал рациональную теорию выбора чисел оборотов станков по геометрической прогрессии. История создания современных рядов предпочтительных чисел, основанных на геометрической прогрессии, связана с именем офицера французского инженерного корпуса Шарля Ренара, заложившего в 1877-1879 гг. научные основы применения элементов и деталей, необходимых для конструирования воздухоплавательных аппаратов

(воздушных шаров). Ренар разработал спецификацию на диаметры хлопчатобумажных канатов для аэростатов с таким расчетом, чтобы их могли изготовлять заранее, независимо от места использования. Используя преимущества геометрической прогрессии, Ренар взял за основу канат, имеющий массу  $a$  в граммах на 1 метр Длины, и построил ряд, приняв знаменатель прогрессии, обеспечивающий десятикратное увеличение каждого пятого члена ряда, т. е.  $aq^5 = 10a$ , откуда  $q = \sqrt[5]{10}$ . Получился следующий числовой ряд:

$a - 1,5849a - 2,519a - 3,9811a - 6,3096a - 10a$ ,

вычисления в котором проведены с точностью до пятой значащей цифры. Значения этого ряда были заменены округленными величинами, практически более удобными. При этом масса  $a$  определена числом  $10^k$ , где  $k$  — любое целое положительное или отрицательное число, а также нуль. В последнем случае при  $k = 0$  получается ряд Ренара R5:

1-1,6-2,5-4-6,3-10,

который может быть продлен в обоих направлениях.

Труд Ренара, опубликованный в 1886 г., долгое время не привлекал к себе внимания. Только в 1920 г. в Германии и в 1921 г. во Франции были утверждены первые стандарты, реализующие идею французского инженера. В 1932 г. Международная Федерация Национальных ассоциаций по стандартизации (ИСА) организовала ТК ИСА-32 „Предпочтительные числа“, работа которого была прервана второй мировой войной. После окончания войны работа возобновилась; был организован ИСО/ТК 10 „Предпочтительные числа“, который принял в 1953 г. Международную рекомендацию по предпочтительным числам ИСО/Р3, ставшую основой для разработки параметрических стандартов во многих странах мира. Кроме ряда R5, в нее вошли ряды R10, R20 и R40 со знаменателями соответственно получившие также название рядов Ренара. В 1955 г. была принята рекомендация ИСО/Р17 „Руководство по применению предпочтительных чисел и рядов предпочтительных чисел“. У нас в стране с 1 июля 1985 г. действует ГОСТ 8032—84 „Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел“, который полностью соответствует СТ СЭВ 3961-83.

Ряды предпочтительных чисел должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) представлять рациональную систему градаций, отвечающую потребностям производства и эксплуатации;
- 2) быть бесконечными как в сторону малых, так и в сторону больших значений, т. е. допускать неограниченное развитие параметров или размеров в направлении их увеличения или уменьшения;
- 3) включать все десятикратные значения любого члена и единицу;
- 4) быть простыми и легко запоминающимися.

Специальные исследования показали, что всем этим требованиям наилучшим образом удовлетворяют геометрические прогрессии с десятикратным увеличением каждого  $n$ -го члена. Из условия

$$a_n = 10a$$

получаем и откуда  $aq^n = 10a$

$$q = \sqrt[n]{10}$$

ГОСТ 8032-84 устанавливает четыре основных ряда предпочтительных

чисел и два дополнительных (R80 и R160), применение которых допускается только в отдельных, технически обоснованных случаях. Краткие сведения об этих рядах приведены в табл. 33.

Таблица 33

Условные обозначения ряда	Знаменатель прогрессии	Количество членов ряда в десятичном интервале	Относительная размерность между смежными членами ряда, №
R5	$\sqrt[5]{10} \approx 1,5849 \approx 1,6$	5	60
R10		10	25
R20	$\sqrt[10]{10} \approx 1,2589 \approx 1,25$	20	12
R40	$\sqrt[20]{10} \approx 1,12$	40	6
R80	$\sqrt[40]{10} \approx 1,0593 \approx 1,06$	80	3
R160	$\sqrt[80]{10} \approx 1,0292 \approx 1,03$	160	1.5
	$\sqrt[160]{10} \approx 1,015 \approx 1,02$		

В табл. 34 приведены округленные значения предпочтительных чисел ряда R40 в десятичном интервале от 1 до 10.

Но мер числа	Предпочтительное число								
0	1,00								
1	1,06	9	1,70	17	2,65	25	4,25	33	6,70
2	1,12	10	1,80	18	2,80	26	4,50	34	7,10
3	1,18	11	1,90	19	3,00	27	4,75	35	7,50
4	1,25	12	2,00	20	3,15	28	5,00	36	8,00
5	1,32	13	2,12	21	3,35	29	5,30	37	8,50
6	1,40	14	2,24	22	3,55	30	5,60	38	9,00
7	1,50	15	2,36	23	3,75	31	6,00	39	9,50
8	1,60	16	2,50	24	4,00	32	6,30	40	10,00

На примере этой таблицы рассмотрим некоторые свойства основных рядов предпочтительных чисел.

1. ГОСТ 8032—84 устанавливает стандартные значения предпочтительных чисел в диапазоне  $0 < a < \infty$  на основе фиксированных значений предпочтительных чисел, включенных в десятичный интервал  $1 < p < 10$ . Все эти числа, включенные в ряд R40, приведены в табл. 34.

Для перехода от предпочтительных чисел, приведенных в табл. 34, в любой другой десятичный интервал нужно умножать эти числа на  $10^k$ , где  $k$  — целое положительное (или отрицательное) число, определяющее отдаление десятичного интервала в ту или другую сторону от заданного, принятого за нулевой ( $k = 0$ ).

Так, при  $k = 1$  числа переходят в интервал  $10 < a < 100$ , при  $k = -1$  — в интервал  $0,1 < a < 1$  и т. п.

Практически умножение предпочтительных чисел на  $10^k$  сводится к переносу запятой, входящей в каждое число табл. 34, на  $k$  знаков вправо (при  $+k$ ) или влево (при  $-k$ ).

Приведем примеры образования стандартных предпочтительных чисел в разных десятичных интервалах:

$$5,00 \cdot 10^3 = 5000; 1,18 \cdot 10^{-2} = 0,0118; 3,75 \cdot 10 = 37,5.$$

2. Номер ряда предпочтительных чисел (R40, R20, R10, R5) указывает

на количество чисел в десятичном интервале. Так, ряд R40 содержит в десятичном интервале 40 чисел,

Число 1,00, имеющееся в табл. 34, не входит в десятичный интервал  $1 < a < 10$ . Его можно рассматривать как завершающее число предыдущего десятичного интервала  $0,1 < a < 1$ ,

3. Таблица включает все основные ряды предпочтительных чисел. В ней нетрудно найти числа, образующие R5, R10, R20.

Для примера построим ряд R5. Здесь полезно напомнить одно из требований к рядам предпочтительных чисел: они должны включать единицу. С единицы и начнем, включив ее в отрезок ряда R5 (в табл. 34 единица имеет нулевой номер). Чтобы получить следующее число ряда, нужно умножить единицу на знаменатель прогрессии  $q = 1,60$ . Найдем искомое число под номером 8.

Дальнейшее последовательное умножение найденных чисел на  $q$  и округление полученных значений (округления во всех рядах R приняты одинаковыми) приведут к ряду R5:

$$1-1,6-2,5-4,0-6,3-10,0-16,0- \dots$$

Таблица построена так, что все числа ряда R5 оказались в нижней ее строке (будем называть ее восьмой строкой — по номеру числа в первом столбце). Нетрудно видеть, что в десятичном интервале  $1 < a < 10$  ряд R5 содержит пять чисел.

Аналогично находим в таблице числа рядов R10 и R20. Начинаем в обоих случаях с единицы и умножаем числа на соответствующие знаменатели прогрессии.

Ряд R10 имеет вид: 1-1,25-1,60-2,00-3,15-4,00-5,00-6,30-8,00-10,00-12,50- ...

Легко обнаружить, что все эти числа входят в четвертую восьмую строки таблицы. Десятичный интервал  $1 < a < 10$  содержит 10 чисел.

Числа ряда R20 входят во все четные строки таблицы: VI, четвертую, шестую и восьмую. В десятичном интервале  $1 < a < 10$  ряда R20 будет, как и

следовало ожидать, двадцать чисел.

4. В табл. 34 есть число 3,15, которое стандартизаторы используют в своей практике в качестве числа  $n = 3,1416$ , Неточность, вносимая при этом, не превышает 0,03 %, что находится внутри принятого диапазона округлений для ряда R40.

Использование при расчетах числа позволяет выражать предпочтительными числами длины окружностей, площади кругов, угловые скорости, скорости резания, цилиндрические и сферические поверхности и объемы, При этом используется свойство геометрических прогрессий: произведение членов прогрессии является членом той же прогрессии. Так, если выразить диаметр окружности  $D$  предпочтительным числом, например, ряда R40, и умножить это число на другое предпочтительное число 3,15, то длина окружности будет представлена предпочтительным числом того же ряда.

Число 7г в стандартизации применяется для согласования параметров и размеров, связанных между собой не только линейными или степенными зависимостями.

5. В табл. 34 все предпочтительные числа ряда R40 имеют номера от 0 до 40. Эти номера облегчают стандартизаторам расчеты взаимосвязанных показателей стандартов, ускоряют вычисление.

Обратим внимание на то, что номера чисел  $N$  представляют собой логарифмы предпочтительных чисел  $a$  при основании логарифмов, равном знаменателю прогрессии  $q$ :

$$N = \log_q a$$

В самом деле, знаменатель прогрессии ряда R40 равен  $q = 1,06$ . Очевидна логарифмическая связь между номерами предпочтительных чисел и соответствующими предпочтительными числами:

$$q^0 = 1; q^1 = 1,06; q^2 = 1,12; \dots; q^{40} = 10$$

В практике вычислений для упрощения расчетов используется известное свойство логарифмов, позволяющее вместо умножения или деления самих предпочтительных чисел складывать или соответственно вычитать номера этих чисел, а по результирующему номеру определять искомое число. Это дает кроме ускорения вычислений возможность оперировать с округленными числами и позволяет определять стандартный результат расчетов, без дополнительных округлений.

Например, если непосредственно перемножать предпочтительные числа 2,24 и 3,55, то получим 7,952; результат требуется округлить, привести его к стандартному значению 8,00. При использовании же номеров предпочтительных чисел (см, табл, 34) достаточно выполнить сложение:

$$N = N_{2,24} + N_{3,55} = 14 + 22 = 36.$$

Под номером 36 значится стандартное число 8,00. При переходе от таблицы в другие десятичные интервалы, т. е. при умножении чисел на  $10^k$ , номера чисел последовательно нарастают при  $+k$  (от 41 и выше), а при  $-k$  по мере удаления от предпочтительного числа 1 номера чисел  $f$  растут по абсолютному значению, но имеют отрицательные знаки (0, -1, -2, -3, и ... т. д.).

Если учесть, что при умножении предпочтительного числа табл. 34 на  $10^k$  в новом числе запятая оказывается перенесенной на  $k$  знаков (вправо — при  $+k$  или влево — при  $-k$ ), то номер нового числа можно определить по

формуле ■

$$N = N_T + k 40,$$

где  $N_T$  - номер числа в табл. 34.

Приведенные в табл. 33 ряды не ограничены никакими пределами. Ряды с ограниченными пределами обозначаются следующим образом:

R40 (15 . . . 190) - основной ряд R40, ограниченный членом 15 в качестве нижнего предела и членом 190 в качестве верхнего предела:

R20 (22,4 . . .) — основной ряд R20, ограниченный членом 22,4 в качестве нижнего предела;

R10 (. . . 50) — основной ряд R10, ограниченный членом 50 в качестве верхнего предела:

R'20(100 . . . 250) - основной ряд R20 с округленными членами, ограниченный снизу и сверху числами 100 и 250 и содержащий замену членов, входящих в этот диапазон ряда, величинами первой степени округления.

Запишем в развернутом виде последний ряд чисел: 100—110-125-140-160-180-200-220-250. Вместо чисел 112 и 224 ряда R20 в приведенный отрезок ряда R'20 вошли числа 110 и 220.

Приведем пример обозначения ряда, в который нужно обязательно включить какое-либо число:

R5 (. . . 40 . . .) - основной ряд R5 с обязательным включением в него члена 40, но не ограниченный верхним и нижним пределами.

В стандартизации используют также *производные* ряды. Они применяются в тех случаях, когда ни одна из градаций основных рядов не удовлетворяет поставленным требованиям. Обычно по производным рядам строят ряды параметров и размеров, являющихся функциями других параметров и размеров, для которых градации приняты по основным рядам. Производные ряды образуются из основных (или дополнительного) путем отбора каждого второго, третьего или, в общем случае,  $n$ -го члена ряда. В обозначении производного ряда после наклонной черты указывается порядковый номер систематически отбираемого из ряда члена:

R40/5 (. . . 60) - производный ряд, полученный путем отбора каждого пятого члена основного ряда R40 и ограниченный членом 60 в качестве верхнего предела; R10/3 (. . . 80 . . .) — производный ряд, образованный отбором каждого третьего члена ряда R10 с обязательным включением члена 80, пределами не ограничен; R20/3 (14 . . . 40) - производный ряд, полученный путем отбора каждого третьего члена основного Ряда R20 и ограниченный сверху и снизу соответственно членами 40 и 14. Нетрудно убедиться, пользуясь табл. 34, что последний производный ряд содержит 4 члена: 14-20-28-40.

Частным случаем производных рядов являются *сдвинутые* ряды. Примером такого ряда может служить R10/2 (1,25 . . .) - производный ряд, который начинается членом 1,25 и включает члены ряда R10, идущие через один. При отборе членов для этого ряда пропущены из ряда R10 все члены, входящие в ряд R5. Знаменатель прогрессии ряда R10/2 равен знаменателю прогрессии ряда R5, т. е.  $q = 1,60$ . Члены ряда R10/2 сдвинуты по отношению к членам ряда R5. Это можно проиллюстрировать следующим размещением членов:

R5 (1,00...):	1,00	1,60	2,50	4,00;
R 10/2(1,25 ...):	1,25	2,00	3,15	5,00.

Отметим, что в стандартах при необходимости допускается использовать *ступенчатые* ряды, построенные по разным геометрическим прогрессиям (из числа входящих в ГОСТ 8032—84).

Приведем пример ступенчатого ряда:

1,0-1,6-2,5-4,0-6,3-8,0-10,0.

Этот ступенчатый ряд составлен из двух рядов: R5 (1,0 ... 6,3) со знаменателем прогрессии  $q = 1,6$  и R10 (6,3 ... 10,0), имеющим  $q = 1,25$ .

Практическое применение ступенчатых рядов указывает на недостатки геометрических прогрессий. Удобнее иметь каждый параметрический ряд, построенный по единой математической закономерности. В этом направлении ведутся научные разработки\*.

Предпочтительные числа, включенные в ГОСТ 8032-84, как уже отмечалось, являются округленными по сравнению с расчетными числами геометрических прогрессий. Однако, как показывает практика, в отдельных случаях требуются дополнительные округления стандартизованных чисел. Например, при установлении числа зубьев шестерен нельзя использовать число 31,5 (типичным может быть 32), или нецелесообразно требовать времени экспозиции для фотоаппаратов  $1/31,5$  с вместо более простого значения  $1/30$  с (число 3,00 отсутствует в рядах R5, R10, R20). Иногда необходимость в дополнительных округлениях вызывается неготовностью производства к применению предпочтительных чисел. В подобных случаях лучше иметь стандартизованные округленные числа, чем допускать применение всевозможных неpreferируемых чисел. В дальнейшем это позволит облегчить переход к применению предпочтительных чисел.

В соответствии с ГОСТ 8032—84 допускается в технически обоснованных случаях производить округление предпочтительных чисел путем применения вместо основных рядов R рядов R' и R". В ряду R' отдельные предпочтительные числа заменены величинами первой степени округления, в ряду R" - второй степени округления. При этом указано, что ряды R" применять не рекомендуется. Перечислим все округления предпочтительных чисел, введенные изменением № 1 в ГОСТ 8032—56.

Числам 1,6 и 6,3 ряда R5 соответствуют в ряду R"5 числа 1,5 и 6,0. • В ряд R10 входит число 3,2, соответствующее числу 3,15 ряда R10.

Ряд R" 10 содержит числа 1,2; 1,5; 3,0; 6,0 (в ряду R" 10 они заменяют ближайшие числа ряда R10; далее аналогичные замены).

В ряд R20 входят числа 1,1; 2,2; 3,2; 3,6, а в ряд R"20 - 1,2; 3,0; 3,5; 5,5; 6,0; 7,0.

\* Сухов В.И. Показательная система предпочтительных рядов и чисел. - Стандарты и качество, 1978, № 3.

267

В ряд R'40- 1,05; 1,1; 1,2; 1,3; 2,1; 2,2; 2,4; 2,6; 3,2; 3,4; 3,6; 3,8; 4,2; 4,8.

В исключительных случаях для ряда R'40 допускается выбрать 1,15 вместо 1,18 (R40) и 1,20 вместо 1,25 (R40) \ в результате эта часть ряда R'40 принимает вид: ... 1,10-1,15-1,20-1,30. ...

Отметим, что введение округлений сопровождается существенными отклонениями чисел от расчетных величин. Особенно это касается рядов R"5 и R"10, а по числам 1,2 и 3,0 также для ряда R"20, где отклонения составляют около 5 %. Нужно иметь в виду, что отступление в 5 % на линейном размере приводит к неточности более 10 % — во второй степени (это, например, сечение болта и связанная с ним прочность), в соответствие с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК). Этими рекомендациями

более 15 % — в третьей степени (масса изделия, прогиб вала), более 20 % — в четвертой степени (жесткость пружины), более 25 % — в пятой степени (момент инерции). Это нужно учитывать при параметрических стандартах приведены установлены предпочтительные числа по рядам E3, E6, E12, E24, E48, E96 и E192. Наиболее широкое применение имеют первые четыре. Они построены на базе геометрических прогрессий со следующими знаменателями: для ряда E3 *q* конструирувании и по возможности не пользоваться числами рядов R".

В табл. 35 приведены числа ряда E24 в десятичном интервале  $1 < a < 10$ .

Таблица 35

Предпочтительные числа						
1,0						
1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5	
1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	
1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1	
1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	10,0	

Табл. 35 построена аналогично табл. 34. В последнюю строку таблицы входят все числа ряда E6 (в десятичном интервале  $1 < a < 10$ ). Строка, начинающаяся с члена 1,2 (знаменатель прогрессии ряда E12), и последняя строка включают в себя двенадцать чисел ряда E12.

В отличие от рядов R в рядах E24, E12, E6 дается только один знак после запятой (только десятые доли чисел). Из этого следует, что округленные значения членов прогрессии, принятые в качестве стандартных предпочтительных чисел, в большей степени отличаются от расчетных значений, чем в рядах R.

Стандартные числа любых других десятичных интервалов получаются путем умножения на  $10^*$  чисел табл. 35.

## ГЛАВА 10

### ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА СТАНДАРТИЗАЦИИ (ГСС)

#### 10.1. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ

Государственная система стандартизации представляет собой комплекс взаимосвязанных правил и положений, определяющих все основные вопросы практической деятельности по стандартизации в масштабе страны.

Основными документами Государственной системы стандартизации являются:

ГОСТ 1.0-85. ГСС. Основные положения; "

ГОСТ 1.2-85. ГСС. Порядок разработки стандартов;

ГОСТ 1.3—85. ГСС. Порядок: согласования, утверждения и государственной регистрации технических условий;

ГОСТ 1.4-85. ГСС. Порядок разработки и оформления стандартов предприятия;

ГОСТ 1.5—85. ГСС. Построение, изложение, оформление и содержание

стандарта;

ГОСТ 1.7-85. ГСС. Порядок обеспечения стандартами и техническими условиями;

ГОСТ 1.13-85. ГСС. Порядок учета и восстановления подлинников, дубликатов отраслевых и республиканских стандартов;

ГОСТ 1.15—85. ГСС. Порядок проверки, пересмотра, изменения и отмены стандартов;

ГОСТ 1.18—85. ГСС. Содержание и оформление дел отраслевых и республиканских стандартов;

ГОСТ 1.19—85. ГСС. Порядок государственной регистрации отраслевых и республиканских стандартов;

ГОСТ 1.20-85. ГСС. Порядок внедрения стандартов;

ГОСТ 1.22—85. ГСС. Порядок разработки стандартов и технических условий на продукцию для экспорта;

ГОСТ 1.25-76. ГСС. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

Согласно ГОСТ 1.0-85, нормативно-технические документы делятся на следующие категории:

государственные стандарты (ГОСТ);

отраслевые стандарты (ОСТ);

республиканские стандарты (РСТ);

технические условия (ТУ).

Объектами стандартизации являются: продукция, правила, обеспечивающие ее разработку, производство и применение, а также объекты стандартизации, устанавливаемые Советом Министров СССР.

В стандартах на продукцию устанавливают требования к группам однородной продукции и в необходимых случаях требования к конкретной продукции.

*П р и м е ч а н и е .* Под группой однородной продукции понимается максимально возможная совокупность продукции, характеризующаяся общностью функционального назначения, области применения, конструктивно-технологического решения и номенклатуры основных показателей качества. Группы однородной продукции формируют в порядке, установленном Госстандартом СССР.

Конкретной продукцией являются модели, марки и т. п. продукции, характеризующиеся определенными конструктивно-технологическими значениями показателей ее целевого (функционального) назначения. Конкретная продукция определяется на основе отраслевых частей общесоюзного классификатора продукции (ОКП) и других классификаторов, утвержденных в установленном порядке.

Стандарты на правила, обеспечивающие разработку, производство и применение продукции, устанавливают требования, направленные на обеспечение технического, организационного единства и взаимосвязи в процессах разработки, производства и применения продукции. Эти требования устанавливаются в общетехнических и организационно-методических стандартах.

Общетехнические и организационно-методические стандарты должны, как правило, формироваться в комплексы стандартов для нормативно-технического обеспечения решения технических и социально-экономических задач в определенной области деятельности.

*Государственные стандарты* разрабатываются на: 1) группы однородной продукции межотраслевого производства и (или) применения:

2) конкретную продукцию, имеющую важнейшее народнохозяйственное значение, межотраслевого производства и (или) применения.

*Отраслевые стандарты* разрабатывают на: 1) группы однородной продукции отраслевого производства и (или) применения; 2) конкретную продукцию, закрепленную за данным министерством (ведомством) СССР.

*Республиканские стандарты* разрабатывают на продукцию республиканского и местного значения, если на эту продукцию отсутствуют государственные и отраслевые стандарты или технические условия министерств (ведомств) СССР, являющихся головными (ведущими) по видам.

Стандарты каждой категории являются обязательными в пределах установленной сферы их действия и области применения.

Государственные стандарты обязательны к применению всеми предприятиями, организациями и учреждениями союзного, республиканского и местного подчинения во всех отраслях народного хозяйства СССР и союзных республиках.

Отраслевые стандарты обязательны для всех предприятий и организаций данной отрасли, а также для предприятий других отраслей, применяющих продукцию этой отрасли.

Республиканские стандарты обязательны для всех предприятий и организаций данной республики, независимо от их ведомственной подчиненности.

Государственные стандарты утверждаются Госстандартом СССР и Госстроем СССР (по закрепленной за ними номенклатуре).

Отраслевые стандарты утверждаются министерством, являющимся ведущим в производстве данного вида продукции.

Республиканские стандарты утверждаются в порядке, установленном советами министров союзных республик по согласованию с Госстандартом СССР.

Согласно ГОСТ 1.0-85, вид стандарта определяется его содержанием в зависимости от объекта стандартизации.

Стандарты на продукцию устанавливают: параметры и (или) размеры; типы; сортамент; марки; конструкцию; методы контроля (испытаний, анализа, измерений, определений); приемку; маркировку; упаковку; транспортирование; хранение; эксплуатацию и ремонт; общие технические требования; общие технические условия; технические условия.

Общетехнические стандарты устанавливают: термины и определения; обозначения; номенклатуру; общие требования и (или) нормы; методы.

Организационно-методические стандарты устанавливают: основные (общие) положения; порядок; построение (изложение, оформление, содержание).

Допускается в стандартах предусматривать данные, свойственные стандартам нескольких видов. Не допускается сочетать в одном стандарте одновременно виды организационно-методических, общетехнических стандартов и стандартов на продукцию.

В целях достижения организационно-методического единства при разработке стандартов, а также для контроля выполнения работ по разработке стандартов установлено четыре стадии разработки стандарта (ГОСТ 1.2-85):

- 1 — разработка и утверждение технического задания на разработку стандарта;
- 2 - разработка проекта стандарта (первой редакции) и рассылка его на отзыв;

3 — обработка отзывов, разработка проекта стандарта (окончательной редакции) и представление его на утверждение;

4 - утверждение и государственная регистрация стандарта. Построение, изложение, оформление и содержание стандарта должны соответствовать ГОСТ 1.5—85.

На первой стадии (п. 2.2 ГОСТ 1.2-85) назначаются руководители и ответственные исполнители по темам, определяются сроки разработки проекта технического задания и сроки выполнения работ. Далее производится сбор, изучение и анализ материалов по данной теме, имеющихся стандартов, патентов и другой технической документации с учетом высших достижений отечественной и зарубежной техники и передового опыта. Затем составляется проект технического задания, в котором указываются цели и задачи разработки стандарта, перечень требований, устанавливаемых стандартом, объем работ, этапы работ и сроки их выполнения. Составляется перечень заинтересованных министерств (ведомств) и организаций, которым направляется на отзыв проект стандарта. На второй стадии в соответствии с техническим заданием разрабатывается проект стандарта-(п. 2.3 ГОСТ 1.2-85). Он подписывается по ГОСТ 1.5-85. Одновременно с разработкой проекта составляется пояснительная записка (п. 4 ГОСТ 1.2-85) и разрабатывается проект плана мероприятий по внедрению стандарта (ГОСТ 1.20-85). В пояснительной записке указываются цели и задачи разработки стандарта, область применения, основные технико-экономические обоснования и качественные показатели, их анализ и сравнение с современным достигнутым техническим уровнем, технико-экономическая эффективность от внедрения стандарта.

На стадии разработки стандарта выполняется его проверка на патентную чистоту. Смысл такой проверки заключается в том, чтобы предупредить нарушение исключительных прав, вытекающих из положения о действующих патентах, товарных знаках и др. Патентно-чистыми называются такие стандарты, машины и способы производства, которые не подпадают под действие патентов, действующих в стране-импортере. При поставках изделий за границу следует помнить, что изделие, подпадающее под действие патентов в одной стране, может быть одновременно патентно-чистым в отношении другой страны. Понятие патентной чистоты не следует смешивать с понятием патентоспособности. Когда речь идет о патентной чистоте, то имеется в виду, что данное изделие не подпадает под действие патентов в стране-импортере. Если же на содержащееся в изделии техническое решение можно получить патент, то тогда изделие считается патентоспособным.

Проверка на патентную чистоту связана не только с поставкой изделий за границу, но должна осуществляться и в отношении СССР. Подобная проверка вызвана тем обстоятельством, что использование запатентованного технического решения внутри страны, где сделано изобретение (в данном случае в СССР), без соответствующего на то разрешения является нарушением патентного права со всеми вытекающими из этого последствиями. Нарушение исключительных прав патентообладателя на изобретение влечет за собой арест поставленных товаров и наложение штрафа на поставщика продукции.

Работа по соблюдению патентной чистоты объекта осуществляется с момента начала его разработки. Прежде всего определяются страны, в отношении которых целесообразна проверка на патентную чистоту,

подбирается фонд патентов этих стран применительно к профилю предприятия-изготовителя, определяется круг узлов, блоков, технических решений, способов производства, требующих проверки и так далее, после чего осуществляется проверка. Некоторые объекты не требуют проверки на патентную чистоту, например, научно-технические термины, системы технической документации, ископаемое сырье, ювелирные изделия и т. п. Однако методы контроля за качеством сырья, методы его обогащения и другие нуждаются в проверке на патентную чистоту.

Уровень качества изделий оценивается с учетом показателей их патентной чистоты и патентной защиты.

Показатель патентной чистоты  $\Pi_{n,ч}$  характеризует возможность беспрепятственной реализации изделий как в СССР, так и за рубежом.

Его определяют по формуле

$$\Pi_{n,ч} = \frac{N - \sum_{i=1}^n k_i N_i}{N}$$

где  $N$  — общее количество составных частей в изделии;  $N_2, \dots, N_n$  — количество составных частей изделия, подпадающих под действие патентов в данной стране, по группам значимости;  $k_1, k_2, \dots, k_n$  — коэффициенты весомости составных частей, подпадающих под действие патентов в данной стране, по группам значимости;  $n$  — число групп значимости (например, все элементы изделия могут быть разбиты на две группы значимости: основные и вспомогательные).

Таким образом, изделие считается патентночистым в отношении данной страны и может быть поставлено без нарушения исключительных прав обладателя патента только в том случае, когда  $\Pi_{n,ч} = 1$ .

Показатель патентной защиты  $\Pi_{n,з}$  характеризуется количеством и весомостью отечественных изобретений использованных при создании того или иного объекта. Его вычисляют по формуле

$$\Pi_{n,з} = \Pi'_{n,з} + \Pi''_{n,з}$$

где  $\Pi'_{n,з}$  — показатель патентной защиты изделий авторскими свидетельствами в СССР;  $\Pi''_{n,з}$  — показатель патентной защиты изделий патентами, принадлежащими советским предприятиям и организациям, за рубежом.

Показатель патентной защиты изделий авторскими свидетельствами в СССР  $\Pi'_{n,з}$  вычисляется по формуле

$$\Pi'_{n,з} = \frac{\sum_{i=1}^n k'_i N'_i}{N}$$

где  $k'_1, k'_2, \dots, k'_n$  — коэффициенты весомости составных частей, защищенных авторскими свидетельствами в СССР, по группам значимости;  $N'_1, N'_2, \dots, N'_n$  — количество составных частей, защищенных авторскими свидетельствами в СССР, по группам значимости;  $N$  — общее число составных частей в изделии;  $n$  — число групп значимости.

Показатель патентной защиты изделия патентами за рубежом, принадлежащими советским предприятиям и организациям,  $\Pi''_{n,з}$  вычисляют по формуле

$$P''_{n.з.} = \frac{m \sum_{i=1}^n k''_i N''_i}{N}$$

где  $m$  — коэффициент весомости, зависящий от числа стран, в которых получены патенты, и важности этих стран для экспорта изделий или продажи лицензий;  $k''_1, k''_2, \dots, k''_n$  — коэффициенты весомости составных частей, защищенных принадлежащими советским предприятиям и организациям патентами за рубежом, по группам значимости;  $L'$  — общее количество составных частей в изделии; и — число групп значимости.

Проект плана мероприятий по внедрению стандарта предусматривает возможность организации специализированного производства, включение в планы материально-технического снабжения новых видов сырья, полуфабрикатов, материалов, комплектующих составных частей, обеспечение предприятия новыми видами оборудования, возведение новых зданий и т. д.

После рассмотрения проекта государственного стандарта на научно-техническом совете последний направляется в Госстандарт для проверки на соответствие годовому плану стандартизации, техническому заданию и методическим требованиям и затем рассылается в установленном порядке соответствующим службам Госстандарта СССР.

Проекты отраслевых и республиканских стандартов с соответствующими документами рассылаются по установленному перечню.

На третьей стадии (п. 2.4 ГОСТ 1.2-85) организации-разработчику стандарта высылаются отзывы на него, затем составляется сводка отзывов (п. 5 ГОСТ 1.2—85) и дается обоснованное заключение по каждому замечанию. При наличии разногласий и существенных замечаний организация-разработчик проводит согласительное совещание, на основании решений которого составляется "окончательная редакция проекта стандарта.

На четвертой стадии проект стандарта рассматривается, производится его научно-техническая экспертиза и утверждение в порядке, установленном п. 2.5 ГОСТ 1.2-85, стандарт регистрируется, ему присваивается номер и год.

Затем осуществляются издание стандарта, публикация информации о нем и распространение его в соответствии с ГОСТ ] .7-85.

Утвержденные стандарты должны внедряться в сроки, указанные при их утверждении. Порядок внедрения стандартов изложен в ГОСТ 1.20-85.

В соответствии с этим документом после утверждения стандартов министерства и ведомства (по государственным и отраслевым стандартам) либо Госпланы союзных республик (по республиканским стандартам) утверждают проекты планов основных мероприятий по внедрению стандартов (п. 2 ГОСТ 1.20—85). Эти мероприятия включаются в соответствующие планы по новой технике, планы капитального строительства, материально-технического снабжения министерств, предприятий и организаций. На основе планов мероприятий по внедрению стандартов предприятия разрабатывают конкретные задания по подразделениям (цехам, службам, отделам).

Стандарт считается внедренным на предприятии, если установленные им нормы, показатели и требования применяются в соответствии с областью его распространения.

Стандарт на продукцию считается внедренным, если продукция соответствует всем требованиям этого стандарта.

Изменения в стандарты вносятся в соответствии с ГОСТ 1.15- 85.

## **.0.2. ОРГАНЫ И СЛУЖБЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ**

В систему органов и служб стандартизации входят:

общесоюзные органы стандартизации и их службы;

службы стандартизации в отраслях народного хозяйства;

службы стандартизации в союзных республиках;

службы стандартизации на предприятиях, в организациях и учреждениях.

Разработка стандартов и технических условий на продукцию является составной частью работ по созданию новой (модернизируемой) продукции.

В СССР этим занимаются практически все предприятия и организации. Поэтому возникла необходимость координации их деятельности, что дает возможность проведения единой технической политики и ускорения научно-технического прогресса. Выполнение задач координации возложено на Государственный комитет СССР по стандартам (Госстандарт СССР).

Госстандарт СССР несет ответственность за организацию, состояние и оптимальное развитие стандартизации и межотраслевой унификации, усиление роли стандартизации в ускорении научно-технического прогресса, повышении эффективности общественного производства и улучшении качества продукции, за научно-технический уровень и технико-экономическую обоснованность утверждаемых им государственных стандартов. Гласными задачами Госстандарта СССР являются:

1) определение основных направлений развития и разработки научно - методических и технико-экономических основ стандартизации, измерительного дела, межотраслевой унификации, агрегатирования машин, оборудования и приборов; разработка планов Государственной стандартизации (текущих и перспективных), рассмотрение планов по стандартизации отраслевого и республиканского значения, в процессе которого осуществляется их взаимосвязка;

2) стандартизация показателей качества продукции, общих требований к ос приемке и методам испытаний; организация работ по аттестации качества продукции, рассмотрение и утверждение стандартов, установление порядка и сроком введения их в действие;

3) организация работ по унификации и агрегатированию промышленной продукции, в том числе межотраслевой унификации и агрегатированию;

4) обеспечение единства и правильности измерений в стране, создание и совершенствование государственных эталонов единиц физических величин, а также методов и средств измерений;

5) стандартизация значений физических констант, физико-химических свойств веществ, аттестация стандартных образцов материалов и веществ;

6) государственный надзор за внедрением и соблюдением стандартов и технических условий, а также за состоянием и применением измерительной техники.

В систему органов и служб Госстандарта СССР входят организации

*центрального подчинения и территориальные органы.* К первым относятся научно-исследовательские институты, научно-исследовательские центры с государственными службами, органы научной, технико-экономической и нормативно-технической информации и учебные заведения, ко вторым — республиканские управления Госстандарта СССР, центры стандартизации и метрологии и лаборатории государственного надзора (рис. 80).

Головная организация по стандартизации в народном хозяйстве — *Всесоюзный научно-исследовательский институт стандартизации (ВНИИС).* На него возложены разработка научно-технических и экономических основ стандартизации и систем управления качеством продукции, составление проектов перспективных планов, проектов стандартов на единые методы испытаний продукции и ее аттестации, осуществление научно-технической и правовой экспертизы и подготовки к утверждению стандартов, проведение работ по стандартизации в рамках СЭВ, ИСО и других международных организаций, руководство работами по созданию и внедрению унифицированных систем документации для использования в автоматизированных системах управления.

*Всесоюзный научно-исследовательский институт по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ)* — головная организация по разработке научных основ межотраслевой унификации, агрегатирования, координирующая работы по стандартизации в машиностроении, осуществляющая разработку и научно-методическое руководство внедрением ЕСКД на базе комплексной стандартизации элементов производственных процессов и средств технического оснащения.

*Всесоюзный научно-исследовательский центр по свойствам материалов и веществ (ВНИЦ МВ Госстандарта СССР)* — головная организация Государственной службы стандартных справочных данных — устанавливает стандартные значения физических констант, физико-химических свойств веществ и материалов и обеспечивает народное хозяйство необходимыми справочными данными и эталонами, занимается разработкой абсолютно полных и достоверных данных о веществах и материалах, используемых в народном хозяйстве, создает и публикует перечни стандартных данных веществ и материалов.

*Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии стандартных образцов* — головная организация Государственной службы стандартных образцов веществ и материалов — осуществляет научно-методическое и организационное руководство разработкой и внедрением в народное хозяйство стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов.

*Всесоюзный научно-исследовательский институт технической информации, классификации и кодирования (ВНИИКИ)* осуществляет сбор информации по стандартизации и контролю качества, является головным в области разработки и дальнейшего развития единой системы классификации и кодирования технико-экономической информации, занимается разработкой стандартов на все виды носителей информации, осуществляет постоянное ведение и систематическое пополнение фонда стандартизован-

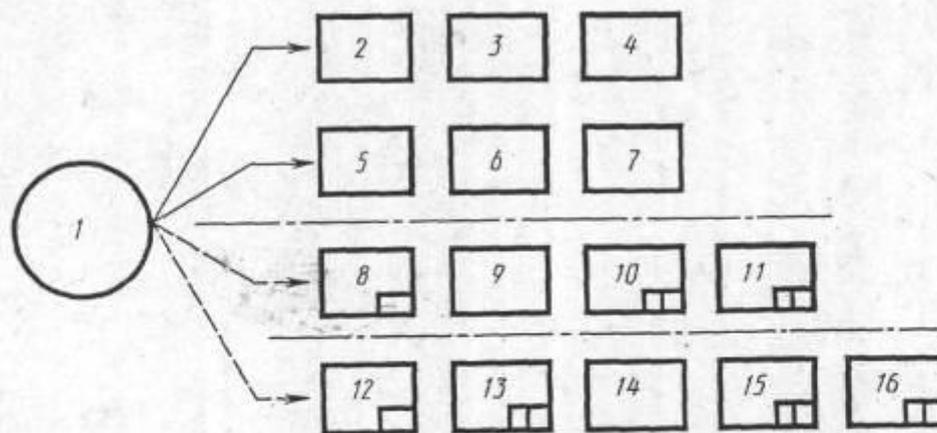


Рис. 80. Структура органов и служб стандартизации:

Государственная служба стандартизации: 1 – Госстандарт СССР; организации центрального подчинения; 2 – научно-исследовательские центры и институты; 3 – центры и органы информации; 4 – учебные заведения.

Территориальные органы Госстандарта СССР: 5 – республиканские управления; 6 – центры стандартизации и метрологии; 7 – лаборатории государственного надзора

Отраслевая служба стандартизации: 8 – общесоюзное или союзно-республиканское министерство (ведомство) с отделом стандартизации; 9 – головные организации по стандартизации; 10 – базовые организации с отделами стандартизации (КТОС и НИОС); 11 – промышленные предприятия с отделами стандартизации

Республиканская служба стандартизации: 12 – совет министров, госплан республики с отделом стандартизации; 13 – республиканские министерства (ведомства) с отделами стандартизации; 14 – головная организация в республике по стандартизации; 15 – базовые организации с отделами стандартизации; 16 – предприятия с отделами стандартизации

ных научно-технических терминов, обеспечивает народное хозяйство материалами о достижениях отечественной и зарубежной науки и техники в области стандартизации, метрологии и контроля качества продукции.

Крупным информационным центром является *Центральный государственный фонд стандартов и технических условий* (ЦГФСТУ) с отделениями в союзных республиках, в котором сосредоточены отечественные стандарты и технические условия и стандарты зарубежных стран. Он осуществляет учет и государственную регистрацию стандартов и технических условий, а также другой нормативно-технической документации союзного, отраслевого и республиканского значения, централизованно информирует организации, учреждения и предприятия о действующих стандартах, технических условиях и о другой нормативно-технической документации, о действующих стандартах, технических условиях и о другой нормативно-технической документации.

К организациям центрального подчинения относятся также *Главный информационно-вычислительный центр (ГИВЦ), Издательство стандартов и учебные заведения Госстандарта СССР: три техникума и Всесоюзный институт повышения квалификации руководящих и инженерно-технических работников в области стандартизации, качества продукции, метрологии (ВИСМ).*

Республиканские управления являются органами, реализующими на территории каждой из союзных республик задачи, функции и права Госстандарта СССР и координирующими деятельность всех организаций системы Госстандарта СССР, находящихся в республике. К последним отно-

сяты центры стандартизации и метрологии и лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой, которые являются органами Госстандарта СССР и осуществляют на закрепленной территории задачи, функции и права Госстандарта СССР, отвечают за состояние и дальнейшее развитие стандартизации и метрологии, организуют работы по аттестации качества продукции, осуществляют государственную регистрацию нормативно-технической документации, государственный надзор за внедрением и соблюдением стандартов и технических условий и за состоянием измерительной техники и в данной области, проводят государственные испытания измерительной аппаратуры и т. д.

Деятельностью по стандартизации в отраслях народного хозяйства руководят общесоюзные или союзно-республиканские министерства (ведомства) — рис. 80. В них создаются отделы стандартизации, которые осуществляют координацию, административно-техническое руководство, Санитарные работы по стандартизации в отрасли и контроль за выполнением планов.

Непосредственную, работу по стандартизации в отрасли ведут головные и базовые организации, а также отделы стандартизации на предприятиях.

Головные организации по стандартизации создаются в отраслях народного хозяйства, имеющих несколько базовых организаций, с целью координации их работы, научно-технического и организационно-методического руководства деятельностью по стандартизации в отраслях, разработки проектов перспективных стандартов и выполнения наиболее важных работ по стандартизации в своей отрасли. В частности, головные организации по стандартизации изучают научно-технический уровень развития соответствующей отрасли, обеспечивают повышение уровня работ по стандартизации и унификации в отрасли, разрабатывают основные направления их развития, определяют номенклатуру продукции, подлежащей охвату государственными и отраслевыми стандартами.

Головные организации по стандартизации являются самостоятельными научно-исследовательскими, конструкторскими и проектными организациями.

Обязанности базовых организаций возлагаются на научно-исследовательские институты и проектно-конструкторские организации, ведущие определенную группу продукции. Эти организации выполняют основную работу по разработке стандартов. В круг их задач входят:

- разработка проектов государственных стандартов и отраслевой нормативно-технической документации;

- рассмотрение планов работ предприятий по разработке отраслевой нормативно-технической документации по своей группе продукции;
- контроль за выполнением планов;

- надзор за действующими стандартами по своей группе продукции с целью их своевременного пересмотра и замены;

- научно-исследовательские и экспериментальные работы, связанные с разработкой и внедрением стандартов.

Разработка проектов стандартов в базовых организациях по стандартизации производится основными научными отделами (лабораториями), а координация работ по стандартизации и организационно-методическое руководство осуществляются самостоятельным конструкторским или

научно-исследовательским отделом стандартизации.

Деятельностью по стандартизации в союзных республиках руководят Госпланы союзных республик и республиканские управления Госстандарта СССР. Непосредственно работу по стандартизации в союзных республиках осуществляют отделы стандартизации в Госплане и Госстрое союзной республики, республиканские лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой Госстандарта СССР, отделы стандартизации в союзно-республиканских и республиканских министерствах (ведомствах) союзных республик, головная организация по стандартизации республики, республиканские базовые организации по стандартизации, научно-исследовательские и конструкторские отделы стандартизации на предприятиях.

На предприятиях научно-техническое и организационно-методическое руководство деятельностью по стандартизации и непосредственное выполнение большинства работ этого направления осуществляет конструкторский или научно-исследовательский отдел стандартизации, основными задачами которого являются:

- разработка планов работ по стандартизации и расчет технико-экономической эффективности внедрения стандартов;

- разработка совместно с другими службами предприятия проектов стандартов и другой нормативно-технической документации;

- обеспечение подразделений предприятия необходимой нормативно-технической документацией, ее хранение, учет и своевременное внесение изменений;

- организация обязательного нормоконтроля технической документации, разрабатываемой предприятием;

- организация контроля за внедрением и соблюдением стандартов;

- организация пропаганды стандартизации, обмена опытом, повышения квалификации работников предприятия по вопросам стандартизации.

## Г Л А В А II

### ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ (ГСИ)

#### 11.1. СТАНДАРТЫ ГСИ

Стандарты ГСИ являются нормативной базой *метрологического обеспечения*, под которым в целом понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности, измерений. К основным задачам стандартизации в области метрологического обеспечения относятся:

- совершенствование системы метрологического обеспечения в стране, создание и совершенствование государственных эталонов единиц физических величин, а также методов и средств измерений высшей точности;

- установление норм, требований и методов в области проектирования и производства продукции;

- установление единых систем документации, в том числе унифицированных;

- установление единых терминов и обозначений;

- определение единой системы показателей качества продукции, методов и средств ее контроля и испытаний;

- установление единых правил выполнения всех работ по обеспечению единства измерений;

- своевременное изменение и дополнение правил законодательной метрологии в соответствии, с изменениями потребностей народного хозяйства, а также в соответствии с новейшими открытиями и достижениями;

- постоянный контроль за выполнением правил законодательной метрологии во всех отраслях народного хозяйства страны;

- установление прав и обязанностей государственных и ведомственных органов метрологической службы по обеспечению единства измерений.

В состав ГСИ наряду с государственными входят отраслевые и республиканские стандарты, технические условия и другие нормативно-технические документы. Структура нормативных документов ГСИ и ее связь с другими системами стандартов показаны на рис. 81.

В нормативных документах ГСИ принято выделять базовые, на основе которых разрабатываются все остальные нормативные документы для конкретных областей измерений, измерительных процессов и средств измерений. Базовыми могут быть только государственные стандарты СССР. основополагающим базовым стандартом ГСИ является ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78) „ГСИ. Единицы физических величин". Воспроизведение единиц осуществляется эталонами. Общие положения, классификацию и назначение эталонов устанавливает базовый ГОСТ 8.057—80 „ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения". К базовым относятся также ГОСТ 8.372-80 „ГСИ. Эталоны единиц физических величин.

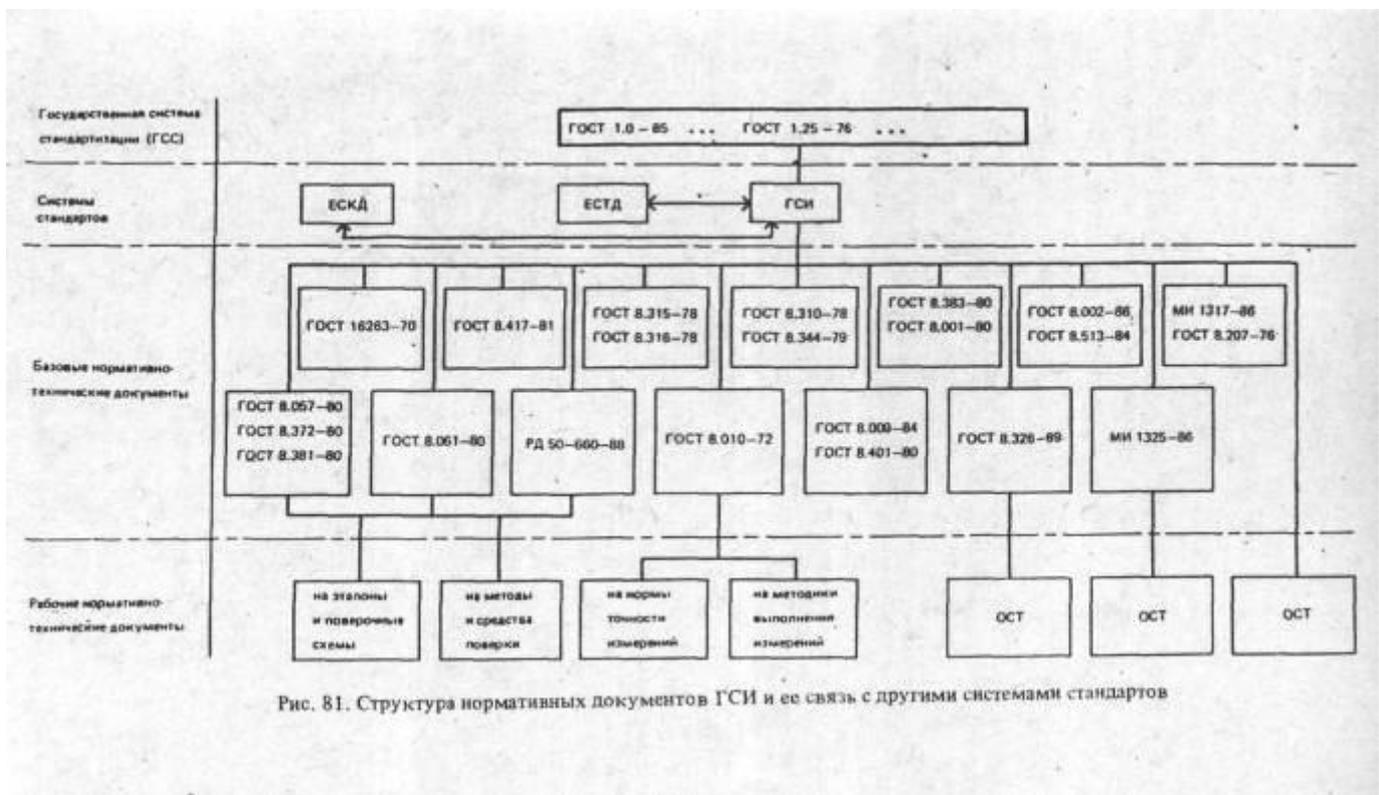


Рис. 81. Структура нормативных документов ГСИ и ее связь с другими системами стандартов

Порядок разработки, утверждения, регистрации, хранения и применения" и ГОСТ 8.381-80 (СТ СЭВ 403-76) „ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей”.

Передача информации о размере единицы от эталонов средствам измерений регламентирована шестью базовыми стандартами. ГОСТ 8.061-80 „ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение” устанавливает разделение поверочных схем на государственные — возглавляемые государственным эталоном и охватывающие все средства измерений данной физической величины, применяемые в стране, ведомственные - возглавляемые рабочим эталоном или образцовым средством высшего разряда и распространяющиеся на средства измерений, находящиеся в обращении внутри министерства (ведомства) , и локальные - возглавляемые образцовым средством и предназначенные для средств измерений, подлежащих поверке в определенном органе государственной или ведомственной метрологической службы. К самой процедуре передачи информации относятся ГОСТ 8.395—80 „ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования”, ГОСТ 8.513—84 „ГСИ. Поверка средств измерений. Организаций и порядок проведения”.

Группа базовых стандартов устанавливает порядок нормирования метрологических характеристик средств измерений. Это ГОСТ 8.009—84 „ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений”, ГОСТ 8.401—80 „ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования”, ГОСТ 8.256-77 „ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения”

Правила выполнения и оформления результатов измерений регламентированы базовыми стандартами ГОСТ 8.010—72 „ГСИ. Общие требования к стандартизации и аттестации методик выполнения измерений”, ГОСТ 8.207-76 „ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения”.

Единообразие средств измерений обеспечивается базовыми ГОСТ 8.383-80 „ГСИ. Государственные испытания средств измерений. Основные

положения" и ГОСТ 8.001-80 (СТ СЭВ 1708-79) „ГСИ. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений". К этой же группе относится базовый ГОСТ 8.326—89 „ГСИ. Метрологическое обеспечение разработки, изготовления и эксплуатации нестандартизованных средств измерений. Основные положения".

Метрологический надзор за разработкой, состоянием и применением средств измерений осуществляется в соответствии с базовыми ГОСТ 8.002—86 „ГСИ. Государственный надзор и ведомственный контроль за средствами измерений. Основные положения", ГОСТ 8.513—84 „ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения". Для дальнейшего развития метрологии, повышения эффективности научно-исследовательских, опытно-конструкторских и проектных работ, экономии материалов и природных ресурсов важное значение имеют достоверные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов. В этой области действуют базовые ГОСТ 8.310-78 „ГСИ. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения", ГОСТ 8.344—79 „ГСИ. Государственная служба стандартных справочных данных. Порядок аттестации данных о физических константах и свойствах веществ и материалов", ГОСТ 8.315—78 „ГСИ. Стандартные образцы. Основные положения", ГОСТ 8.316—78 „ГСИ. Аттестация и утверждение государственных стандартных образцов".

К базовым стандартам относится также ГОСТ 16263-70 „ГСИ. Метрология. Термины и определения".

Остальные государственные стандарты относятся к рабочим документам ГСИ и делятся на четыре группы:

1. Стандарты государственных эталонов и государственных поверочных схем. Все они должны соответствовать требованиям базовых стандартов ГОСТ 8.057-80 и ГОСТ 8.061-80.

2. Стандарты методов и средств поверки мер и измерительных приборов. В стандартах этой группы учитываются требования стандартов, регламентирующих технические требования к средствам измерений.

3. Стандарты норм точности измерений.

4. Стандарты типовых методик выполнения измерений. Положения государственных стандартов конкретизируются с учетом выпускаемой продукции, особенностей технологических процессов и общей специфики производства в отраслевых и республиканских стандартах, методиках, методических указаниях, инструкциях и других рабочих документах ГСИ, входящих в систему нормативно-технической документации по метрологическому обеспечению.

На начало XII пятилетки нормативная база ГСИ насчитывала более 1800 документов, в том числе-545 ГОСТ, около 1100 методических указаний метрологических институтов, 115 руководящих документов и 60 инструкций и правил. Основными направлениями ее совершенствования являются:

укрупнение ГОСТ, устанавливающих общие правила и нормы по метрологии, т. е. разработка ГОСТ, полностью охватывающих тот или иной метрологический объект стандартизации (эталон, госиспытания, стандартные образцы), таких укрупненных ГОСТ будет всего 20 ... 25,

отмена стандартов на государственные эталоны и перевод стандартов на поверочные схемы в приложения к сопроводительной документации на эталоны, имеющие информационно-справочный характер,

перевод стандартов на методики поверки в ранг методик метрологических институтов, существующий порядок разработки методик метрологических

институтов обеспечивает их внедрение в практику через 3 ... 4 квартала после начала разработки;

перевод стандартов на методики выполнения' измерений также в ранг методик метрологических институтов, причем разработка методик метрологических институтов для измерений, связанных с учетом материальных ценностей, охраной здоровья трудящихся, безопасностью труда и т. п., должна быть закреплена за Госстандартом СССР, а всех остальных - за министерствами.

## **11.2. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА**

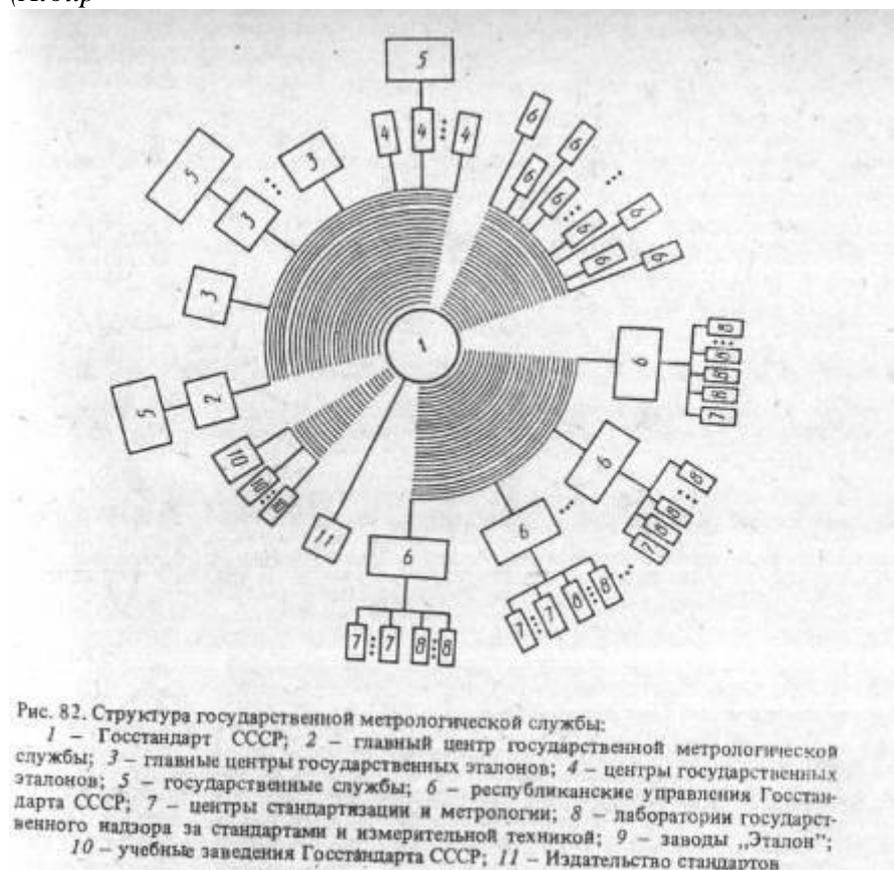
Метрологическая служба СССР состоит из *государственной и ведомственных* метрологических служб.

Сеть государственных метрологических органов и их деятельность, направленная на обеспечение единства измерений в стране, называются государственной метрологической службой. Возглавляет государственную метрологическую службу Госстандарт СССР, который проводит единую политику по метрологическому обеспечению на всей территории страны, во всех отраслях народного хозяйства. Государственная метрологическая служба занята решением, главным образом, межотраслевых проблем. (Она имеет надведомственный характер и выполняет законодательные и контрольные функции. Структура государственной метрологической службы показана на рис. 82. .

*Главным центром государственной метрологической службы является ] Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС).* Он разрабатывает научно-методические, технико-экономические, организационные и правовые основы метрологического обеспечения, а также осуществляет научно-методическое руководство метрологической службой страны, разработкой межотраслевых и комплексных J программ метрологического обеспечения, развитием эталонной базы и образцовых средств измерений, проведением государственных испытаний, государственным надзором и ведомственным контролем за состоянием и применением средств измерений и метрологическим обеспечением разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции, созданием и внедрением автоматизированной информационно-управляющей системы государственной метрологической службы, работами по международному сотрудничеству в области метрологии, подготовкой и повышением квалификации кадров метрологов. Кроме того, ВНИИМС является центром государственных эталонов в области измерений средних давлений и параметров качества обработанных поверхностей.

В состав государственной метрологической службы входят *главные центры государственных эталонов*, являющиеся головными организациями по закрепленным за ними видам измерений и отвечающие за уровень О и опережающее развитие метрологического обеспечения народного хозяйства, за создание и совершенствование комплексов государственных и рабочих эталонов и исходных образцовых средств измерений. Главные центры государственных эталонов обеспечивают воспроизведение единиц физических величин и передачу информации об их размере рабочим эталонам и исходным образцовым средствам измерений, находящимся в ведении государственной и ведомственных метрологических служб, координируют и проводят научно-исследовательские работы по теоретической метрологии,

созданию и совершенствованию методов и средств измерений высшей точности, а также по определению значений физических констант. В число главных центров входят НПО „ВНИИМ им. Д.И. Менделеева“, НПО „Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений“ (НПО „ВНИИФТРИ), НПО „Метрология“, (Атбир-



ский государственный научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ), Всесоюзный научно-исследовательский институт расходомерии (ВНИИР).

Главные центры государственных эталонов координируют работу центров государственных эталонов, к числу которых, кроме Всесоюзного научно-исследовательского института метрологической службы, относятся НПО „Пеари“, НПО „Система“, НПО „Дальстандарт“, Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии стандартных образ-, Цов (ВНИИМСО) и другие НПО и институты Госстандарта СССР. ■В государственную метрологическую службу также входят: Государственная служба времени и частоты СССР, возглавляемая Междуведомственной комиссией единой службы времени при Госстандарте СССР. В состав комиссии входят представители АН СССР, Министерства связи СССР, Министерства путей сообщения СССР и ряда других заинтересованных министерств и ведомств. Головной организацией службы является ВНИИФТРИ, в котором хранится государственный первичный эталон единиц времени и частоты и шкалы времени Советского Союза. Передача информации о размерах этих единиц осуществляется Государственной службой времени и частоты СССР по системе проводной, радиорелейной и радиосвязи, телевидения, УКВ и другим каналам, обеспечивающим прием сигналов на всей территории СССР;

Головная организация — Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии стандартных образцов (ВНИИМСО). Деятельность этой службы регламентирована базовыми ГОСТ 8.315-78, ГОСТ 8.316-78. Работы по созданию стандартных образцов с 1973 г. планируются Госстандартом СССР и составляют самостоятельный раздел плана Государственной стандартизации; дартизации:

*Государственная служба стандартных справочных данных*, созданная в 1965 г. по постановлению Совета Министров СССР от 11 января 1965 г. № 16 „Об улучшении работы по стандартизации в стране“. Головная организация этой службы — Всесоюзный научно-исследовательский центр по свойствам материалов и веществ (ВНИЦ МВ Госстандарта СССР) — призвана обеспечивать потребности народного хозяйства в достоверных сведениях о свойствах веществ и материалов. В своей деятельности она опирается на научно-исследовательские институты Академии наук СССР, на головные и базовые организации и службы в министерствах и ведомствах. Типовым положением о головных и базовых организациях службы (центрах данных), утвержденным Госстандартом СССР, определены основные функции и задачи, права и обязанности этих организаций. Положение предусматривает ответственность министерств и ведомств за обеспечение отраслей народного хозяйства необходимыми данными, достоверность публикуемых материалов и их соответствие современному уровню науки и техники. Основными нормативными документами, регламентирующими деятельность службы, являются базовые ГОСТ 8.310-78 и ГОСТ 8.344-79.

Органами государственной метрологической службы на местах являются *центры стандартизации и метрологии (ЦСМ) и лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой (ЛГН)*. Их деятельность организована по территориальному принципу и возглавляется 15 республиканскими управлениями Госстандарта СССР, которые отвечают за единство и достоверность измерений в республике и организацию взаимодействия с республиканскими министерствами (ведомствами) в вопросах метрологического обеспечения народного хозяйства республики. Активно функционируют Украинский, Белорусский, Латвийский республиканские ЦСМ. Развиваются Эстонский РЦСМ, Молдавский РЦСМ и др. Ввиду значительных размеров территории и высокого уровня развития народного хозяйства экономических районов в РСФСР и на Украине созданы межобластные и городские ЦСМ. Так, на территории РСФСР утверждено более 40 ЦСМ, включая Московский (МЦСМ) и Ленинградский (ЛЦСМ). Лаборатории государственного надзора подразделяются, на межобластные, автономных республик, краевые, областные и межрайонные

Все территориальные органы Госстандарта СССР являются самостоятельными организациями хозяйственного управления страны и организуют свою деятельность в трех направлениях: надзор за внедрением и соблюдением стандартов, метрологическое обеспечение народного хозяйства и организационно-методическая работа. Они обеспечивают передачу информации о размерах единиц физических величин по закрепленным областям и видам измерений, государственный надзор за производством и ремонтом средств измерений, метрологическим обеспечением производства продукции, соблюдением метрологических правил, требований и норм в отраслях хозяйства страны, осуществляют методическое руководство деятельностью метрологических служб

предприятий и организаций. Таким образом, на закрепленных за ними территориях эти органы реализуют функции и права Госстандарта СССР, проводят единую техническую политику в области метрологии и измерительного дела, направленную на ускорение темпов научно-технического прогресса, совершенствование производства и управления, улучшение качества продукции и укрепление обороноспособности страны.

На *конструкторской базе* государственной метрологической службы, включающей конструкторские, опытно-конструкторские и специальные конструкторские бюро, проектируют и разрабатывают эталонную аппаратуру, образцовые средства измерений, автоматизированные поверочные установки, передвижные поверочные лаборатории и специальные транспортные средства; осуществляют метрологическую экспертизу конструкторской документации.

*Производственной базой* государственной метрологической службы являются заводы „Эталон“, выпускающие и ремонтирующие средства измерений высшей точности, и опытные и экспериментальные производства метрологических институтов.

*Подготовка кадров* для государственной метрологической службы ведется учебными заведениями Госстандарта СССР: Московским и Одесским техникумами измерений, Уральским техникумом метрологии и стандартизации, Всесоюзным институтом повышения квалификации руководящих и инженерно-технических работников в области стандартизации, качества продукции и метрологии.

Выпуск и распространение нормативно-технической документации и литературы по стандартизации и метрологии организован через Издательство стандартов.

Сеть метрологических органов отдельного министерства (ведомства) и их деятельность, направленная на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений, называются ведомственной метрологической службой. Такие службы созданы практически во всех крупных министерствах и ведомствах. Это составные части единой метрологической службы страны, призванные обеспечивать единство и требуемую точность измерений на предприятиях и в организациях каждого министерства (ведомства). Их деятельность регламентирована ГОСТ 1.25-76 и типовыми положениями о ведомственных метрологических службах РД 50-54-87. Типовая структура ведомственной метрологической службы показана на рис. 83.

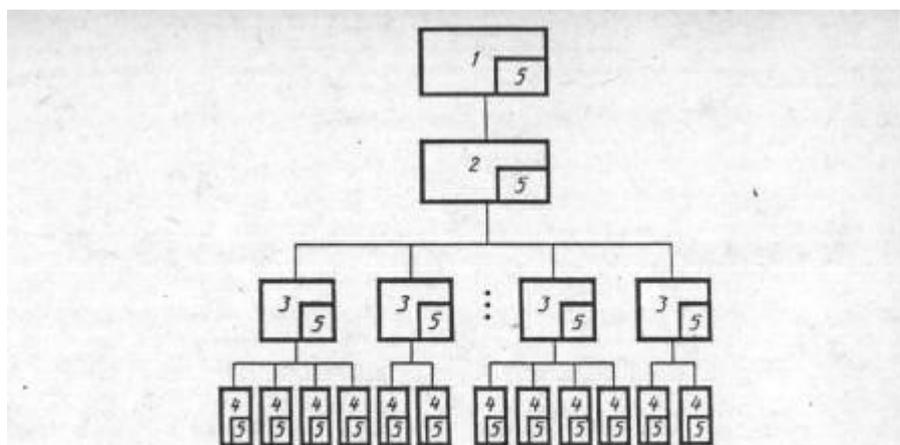


Рис. 83. Структура ведомственной метрологической службы:

1 – министерство (ведомство); 2 – головная организация; 3 – базовые организации; 4 – предприятия министерства (ведомства); 5 – подразделения ведомственной метрологической службы, возглавляемые главными метрологами

Метрологическую службу министерства (ведомства) возглавляет главный метролог министерства (ведомства), у которого в подчинении находится отдел, входящий в центральный аппарат министерства (ведомства). *Отдел главного метролога* осуществляет организационно-методическое руководство всеми работами по метрологическому обеспечению в системе министерства (ведомства), их координацию и контроль за деятельностью всех звеньев метрологической службы. Он также поддерживает взаимосвязь по вопросам метрологического обеспечения с предприятиями и организациями министерства (ведомства) и соответствующими управлениями Госстандарта СССР. Главный метролог имеет право вносить предложения о поощрении лиц за хорошую организацию метрологического обеспечения производства, за внедрение современных прогрессивных методов и средств измерений, а также о привлечении к ответственности работников, виновных в неудовлетворительном состоянии и неправильном использовании средств измерений, нарушении метрологических правил, требований и норм.

Для научно-методического руководства и координации работ по метрологическому обеспечению разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции, выпускаемой министерством (ведомством), в его составе определяется *головная организация*. Она назначается по согласованию с Госстандартом СССР из числа ведущих научно-исследовательских, проектно-конструкторских и технологических организаций и осуществляет организационно-методическое и научно-техническое руководство базовыми организациями ведомственной метрологической службы и метрологическими службами предприятий. Если в системе министерства (ведомства) решение задач метрологического обеспечения требует выполнения большого объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, сосредоточить которые в одной организации трудно, то создают несколько головных организаций по отдельным видам или группам измерений. В этом случае общую координацию работ, разработку и согласование планов возлагают на центральную головную организацию ведомственной метрологической службы.

В составе научно-технического совета головной организации ведомственной метрологической службы формируется секция метрологии, а в организационную структуру "включается самостоятельное подразделение — отдел, возглавляемый главным метрологом. Обычно он состоит из

следующих лабораторий или секторов:

научно-технического и организационно-методического руководства базовыми организациями и метрологическими службами предприятий (организаций):

разработки и метрологической экспертизы нормативно-технической документации;

государственных испытаний и метрологической аттестации средств измерений, измерительной техники.

В тех случаях, когда в центральном аппарате министерства (ведомства) отдел главного метролога не создается, по согласованию с Госстандартом СССР на головную организацию метрологической службы могут быть возложены дополнительные обязанности по координации и организационно-методическому руководству всеми звеньями метрологической службы системы министерства (ведомства).

Головная организация метрологической службы министерства (ведомства) помогает органам Госстандарта СССР при осуществлении государственного надзора за метрологическим обеспечением разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции, за состоянием, применением и ремонтом средств измерений, а также за деятельностью метрологических служб предприятий (организаций) министерства (ведомства).

Для реализации поставленных задач головная организация метрологической службы требует от предприятий (организаций) министерства (ведомства) материалы и отчетные сведения по вопросам метрологического обеспечения, получает в установленном порядке от головных и базовых организаций смежных отраслей народного хозяйства учтенные экземпляры НТД, применяемой в отрасли.

Головная организация метрологической службы вносит главному метрологу министерства (ведомства) и руководителям предприятий (организаций) системы министерства (ведомства) предложения о поощрении работников метрологических служб; добившихся высоких показателей в работе и социалистическом соревновании, а также о привлечении к ответственности лиц, виновных в нарушении метрологических правил, требований и норм.

Государственный надзор за деятельностью головной организации метрологической службы министерства (ведомства) осуществляет Госстандарт СССР.

*Базовые организации* ведомственной метрологической службы создаются для научно-технического и организационно-методического руководства работами по метрологическому обеспечению выпуска продукции на закрепленных за ними по территориальному или производственному принципу предприятиях. Они назначаются, по согласованию с Госстандартом СССР из числа научно-исследовательских, проектно-конструкторских или проектно-технологических организаций, а также из числа ведущих предприятий министерства (ведомства). Организационной структурой базовой организации предусматривается наличие отдела главного метролога, состоящего из нескольких лабораторий: научно-исследовательской;

планирования и координации работ по метрологическому обеспечению производства закрепленных групп продукции; измерительной техники;

государственных испытаний средств измерений.

На базовую организацию метрологической службы возлагается проведение анализа состояния измерений и метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации закрепленных за предприятиями (организациями) групп продукции, разработка мероприятий по совершенствованию измерений и метрологического обеспечения производства продукции, определение их технико-экономической эффективности.

Совместно с прикрепленными предприятиями базовая организация определяет основные направления развития метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции и вносит в головную организацию метрологической службы предложения по проведению этих работ. По заданиям министерства (ведомства) она решает вопросы по международному научно-техническому сотрудничеству в области метрологии и стандартизации; совместно с базовой организацией по стандартизации контролирует внедрение и соблюдение стандартов и технических условий на прикрепленных предприятиях (в организациях).

Подразделения метрологической службы базовой организации, кроме обязанностей, указанных выше, занимаются метрологическим обеспечением своей организации (предприятия) в соответствии с положением о метрологической службе промышленного предприятия, научно-исследовательской и проектно-конструкторской организации.

Базовая организация имеет право в установленном порядке предложения о поощрении работников метрологической службы предприятий (организаций), добившихся высоких показателей в труде и социалистическом соревновании, а также о привлечении к ответственности лиц, виновных в нарушении метрологических правил, требований и норм.

Научно-техническое руководство и ведомственный контроль за деятельностью базовых организаций осуществляет головная организация ведомственной метрологической службы и главный метролог Министерства (ведомства). Государственный надзор за ее деятельностью возложен на Госстандарт СССР и его территориальные органы.

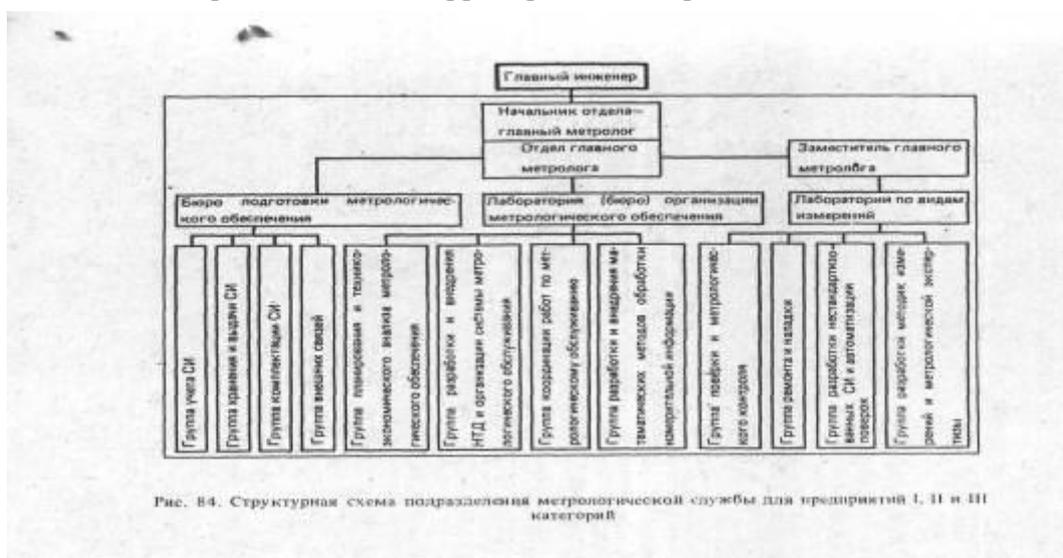


Рис. 84. Структурная схема подразделения метрологической службы для предприятий I, II и III категорий



Рис. 85. Структурная схема подразделения метрологической службы для предприятий IV, V и VI категорий

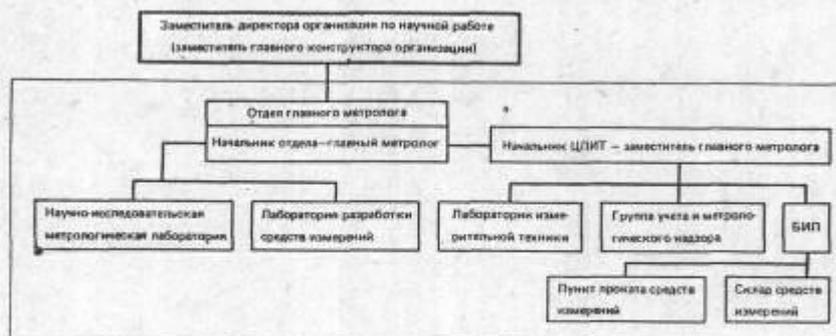


Рис. 86. Структурная схема подразделения метрологической службы научно-исследовательской, проектно-конструкторской и технологической организаций

Основными звеньями ведомственных метрологических служб являются *метрологические службы предприятий*, которые создаются для научно-технического и организационно-методического руководства работами по метрологическому обеспечению в отделах (цехах, лабораториях) предприятия (организации), а также для непосредственного метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции, выпускаемой предприятием (организацией). Это самостоятельные структурные подразделения, возглавляемые главными метрологами предприятия. Их типовые структуры, представленные на рис. 84 ... 86,

отражают функции метрологических служб предприятий и характер расширяемых ими задач.

Методическое руководство деятельностью метрологической службы предприятия (службы главного метролога) осуществляет базовая организация ведомственной метрологической службы: государственный надзор — территориальные органы Госстандарта СССР.

### **11.3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**Анализ состояния измерений.** Анализ состояния измерений проводится в целях установления соответствия современным требованиям средств и методов измерений, применяемых в различных отраслях народного хозяйства, и для разработки на этой основе мероприятий по совершенствованию метрологического обеспечения предприятий, оснащению их современными средствами и методами измерений, необходимыми для повышения эффективности-производства и качества продукции

Работа по анализу состояния измерений отличается от контрольно-ревизионной. Она не имеет целью применение к предприятиям мер воздействия при обнаружении недостатков. По результатам анализа должны быть разработаны мероприятия по улучшению метрологического обеспечения с указанием конкретных сроков их выполнения. Основанием для проведения анализа является план совместных работ министерства (ведомства) и Госстандарта СССР. Общее методическое руководство и координирующая роль за проведением анализа осуществляется отраслевой головной (или базовой) организацией по метрологии. Проведение анализа осуществляю в соответствии с РД 50—466—84 „Методические указания. Анализ состояния измерений в отраслях народного хозяйства в промышленности. Методика организации и порядок проведения работы" или разработанной ее основе и согласованной с Госстандартом СССР отраслевой методикой.

Анализ метрологического обеспечения на предприятиях отрасли осуществляется комиссией, назначаемой министерством (ведомством), составе представителей министерства, головных и базовых организации по метрологии и стандартизации, проектно-конструкторских организаций, обследуемых предприятий (главного инженера или главного метролога), метрологических институтов и территориальных органов государственного надзора Госстандарта СССР и, в необходимых случаях, представителей министерства (ведомства) заказчика. Председателем комиссии назначается представитель министерства (ведомства), в которое входит обследуемое предприятие, его заместителями - представители этого министерства (ведомства) и Госстандарта СССР. Отдельные предприятия обследуются бригадами этой комиссии, которые проводят анализ:

состояния нормативно-технической документации на выпускаемую продукцию и на методы ее испытаний и контроля (государственные и отраслевые стандарты, технические условия, конструкторская и технологическая документация, методики контроля);

уровня стандартизации методик выполнения массовых измерений:

состояния оснащения производственных (технологических) процессов требуемыми средствами и методиками измерений;

организационной структуры и эффективности деятельности ведомственной метрологической службы, а также состояния метрологического

обслуживания средств измерений, применяемых на предприятии.

К анализу состояния нормативно-технической документации должны быть привлечены работники конструкторского бюро, отдела главного технолога и ОТК, службы главного метролога.

По результатам анализа состояния измерений на предприятии составляется *пояснительная записка*, в которой должны быть сформулированы предложения по улучшению метрологического обеспечения производства на предприятии для включения их в общий план организационно-технических мероприятий по совершенствованию метрологического обеспечения в отрасли. Пояснительная записка составляется в пяти экземплярах и направляется головной (или базовой) организации отрасли по метрологии, на которую возложено обобщение материалов по анализу состояния измерений на отдельных предприятиях (2 экз.); метрологической организации Госстандарта СССР, ответственной за обобщение материалов совместно с головной (или базовой) организацией отрасли (1 экз.); предприятию, на котором проводилось обследование (1 экз.). Один экземпляр пояснительной записки с приложением всех исходных материалов остается у руководителя бригады.

Анализ состояния измерений в отрасли производят на основе обобщенных сведений о состоянии измерений на ряде ведущих предприятий, научно-исследовательских, опытно-конструкторских организаций, обеспечивающих выпуск продукции, являющейся определяющей для данной отрасли (министерства, ведомства). Организации министерства (ведомства) и Госстандарта СССР, которые совместным приказом определены ответственными за анализ состояния метрологического обеспечения, обобщают полученные материалы. На их основе специальной комиссией, назначенной совместным приказом министерства (ведомства) и Госстандарта СССР для подготовки предложений по улучшению метрологического обеспечения отрасли, составляется доклад о результатах анализа состояния измерений в данной отрасли народного хозяйства, и вносятся предложения по улучшению метрологического обеспечения предприятий отрасли, оформляемые в виде проекта комплексного плана организационно-технических мероприятий.

*Комплексный план организационно-технических мероприятий по улучшению состояния измерений и метрологического обеспечения отрасли* должен содержать планы разработки и производства необходимых средства измерений; предложения по улучшению метрологического обслуживании предприятий отрасли: по разработке и пересмотру НТД на выпускаема продукцию, методы ее испытаний и контроля, методы и средства поверки средств измерений, не охваченных ведомственной поверкой. План должен также включать перечень импортных рабочих и образцовых средств измерений, поверочного и испытательного оборудования, необходимых для метрологического обеспечения предприятий отрасли; перечень мероприятий, направленных на совершенствование организации и повышение эффективности деятельности ведомственной метрологической службы. Вместе с докладом о результатах анализа состояния измерений в отрасли план представляется на утверждение министерства (ведомства) и Госстандарт та СССР.

В соответствии с РД 50—466-84 министерства (ведомства) и Го Л стандарт СССР на основании результатов анализа состояния измерений *и* отраслях народного хозяйства разрабатывают также программы метрологического обеспечения этих отраслей. Разработка таких программ

планируется Госстандартом СССР, но предложениям министерств (ведомств). Задания на разработку устанавливаются в государственном пятилетнем плане развития народного хозяйства СССР. РД 50—466—84 предусматриваем формы и порядок разработки программ метрологического обеспечения отраслей, их согласования и утверждения. Реализация программ осуществляется через годовые планы государственной стандартизации и годовые планы министерств (ведомств) — исполнителей.

На основе анализа состояния измерений в отраслях народного хозяйства и утвержденных программ их метрологического обеспечения, метрологические институты Госстандарта СССР (в соответствии со специализацией по видам измерений) совместно с головными и базовыми организациями министерств (ведомств) разрабатывают *комплексные программы метрологического обеспечения по отдельным видам и областям измерений*. Они рассчитаны на пять—семь лет и представляют собой согласованный на межотраслевом уровне комплекс мероприятий, направленных на совершенствование основ метрологического обеспечения по отдельным видам I и областям измерений, установленным ГОСТ 1.25—76. Планирует разработку комплексных программ метрологического обеспечения Госстандарт СССР с учетом предложений министерств (ведомств). Порядок раз-

**Метрологическое обеспечение подготовки производства.** Метрологическое обеспечение подготовки производства - это комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на определение с требуемой точностью характеристик изделий, узлов, деталей, материалов и сырья, технологических процессов и оборудования, необходимых в производстве и позволяющих добиться высокого качества выпускаемой продукции и снижения непроизводительных затрат на ее разработку и выпуск. Нормативной базой метрологического обеспечения подготовки производства являются государственные стандарты ГСИ, отраслевые стандарты, НТД предприятий, организационно-методическая и инструктивно-производственная документация целевого назначения.

Работы по метрологическому обеспечению подготовки производства выполняются конструкторскими, технологическими и метрологическими службами предприятий (организаций) с момента получения исходных документов на изделие. Состав исходных документов, необходимых для организации и начала работ, устанавливается отраслевыми стандартами в соответствии со спецификой продукции и характером производства. Методическое руководство реализацией мероприятий, направленных на повышение уровня метрологического обеспечения подготовки производства, осуществляют органы государственной и ведомственной метрологических служб.

*План метрологического обеспечения подготовки производства* разрабатывается метрологической службой предприятия (организации) или подразделением, ответственным за планирование технологической подготовки производства, при обязательном согласовании с метрологической службой предприятия. Он может входить в состав плана технической подготовки производства. Определенную помощь при планировании могут оказать типовые планы, которые разрабатываются с учетом вида изделия и характера производства.

Выполнение отдельных мероприятий по метрологическому обеспе-

чению подготовки производства может также предусматриваться планами научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, оргтехмероприятий и др.

Предусмотренный планом и нормативными, организационно-методическими и инструктивно-производственными документами объем работ по метрологическому обеспечению подготовки производства включает следующее:

1. Установление оптимальной номенклатуры измеряемых параметров и норм точности измерений, обеспечивающих достоверность исходного и приемочного контроля изделий, узлов, деталей и материалов, а также характеристик технологических процессов и оборудования.

2. Обеспечение технологических процессов наиболее совершенными методиками выполнения измерений, гарантирующими необходимую точность измерений: аттестацию и стандартизацию этих методик по ГОСТ

8.010-72. В их число должны входить методики выполнения измерений, необходимых для обеспечения безопасности труда.

3. Разработку рекомендаций по выбору средств и методов измерений.

Обеспечение производства стандартизованными средствами измерений, средствами измерений узкоотраслевого специального назначения и, в необходимых случаях, нестандартизованными средствами измерений, предназначенными для конкретных технологических процессов, а также средства

ми обработки и представления результатов измерений.

4. Обеспечение метрологической исправности средств измерений и,

прежде всего, их поверки. Основные положения системы государственного

надзора и ведомственного контроля за средствами измерений, выпускаемыми из производства и ремонта, поставляемыми по импорту и находящимися в обращении в стране, устанавливают ГОСТ 8.002-86 и ГОСТ 8.513-84. I

5. Стандартизацию (унификацию и агрегатирование контрольно-измерительной техники, типизацию технологических процессов).

6. Обеспечение условий выполнения измерений, установленных в нормативно-технической документации, контроль за их соблюдением.

7. Подготовку производственного персонала и работников соответствующих служб и подразделений предприятия к выполнению контрольно-измерительных операций, поверки.- ремонта и юстировки средств измерений.

Разработанная в процессе подготовки производства нормативно-техническая, конструкторская и технологическая документация, регламентирующая нормы точности, методы, средства, условия и процедуры подготовки и проведения измерений, обработку и представление их результатов (с показателями точности), должна быть подвергнута метрологическому контролю или экспертизе с целью проверки соответствия требованиям стандартов ГСИ и других нормативных документов. Метрологической экспертизе в процессе подготовки производства подлежат также технические задания, проектная и

эксплуатационная документация на средства измерений специального отраслевого назначения и нестандартизованные средства измерений.

Метрологическая экспертиза нормативно-технической документации. *Метрологическая экспертиза заявок на разработку новой техники* производится для определения на основе исходных требований заказчика четких конструктивных целей. Она является частью экспертизы проектов технической документации или общего комплекса работ по метрологическому обеспечению подготовки производства. В ходе ее устанавливаются объем требований к метрологическому обеспечению разработки и дают предварительную оценку требований к метрологическому обеспечению производства изделий.

Экспертиза заявок, как и другой технической документации, проводится подразделениями метрологической службы предприятий, а также конструкторскими и технологическими подразделениями и службой стандартизации под методическим руководством и контролем ведомственной метрологической службы, головных и базовых организаций по метрологии. Результаты экспертизы оформляются в виде экспертного заключения.

При экспертизе заявки определяется обоснованность и достаточность норм точности, установленных для изделия. Под обоснованностью понимают необходимость установления норм точности, гарантирующих выполнение изделием своих функций, его надежность и долговечность и обеспечивающих требуемое качество изделия. Достаточность - это условие, при котором соблюдение установленных норм точности достаточно для того, чтобы обеспечить правильное функционирование, надежность и долговечность изделия, и нет необходимости в установлении каких-либо дополнительных норм точности.

В процессе экспертизы определяют соответствие установленных норм точности государственным и отраслевым стандартам, если их действие распространяется на изделие, выявляют контролепригодность установленных норм точности с помощью существующих или намеченных к разработке и изготовлению средств измерений. Контролепригодность — это возможность измерения нормированных параметров с допустимой погрешностью, учитывая наличие измерительных баз и доступа к контролируемым поверхностям при контактных и бесконтактных методах измерений. В случае экспертизы заявки на разработку специального средства измерений определяют контролепригодность норм точности, установленных для предполагаемого объекта измерений, учитывая при этом взаимное влияние контролируемых параметров на погрешность измерения каждого из них.

*Метрологическая экспертиза технического задания* включает проверку рекомендаций экспертизы заявки и уточнение их на основе дополнительных по сравнению с заявкой данных, содержащихся в техническом задании. Основной целью метрологической экспертизы технического задания является установление возможности измерения тех параметров предполагаемого для разработки изделия, к которым предъявляют точностные требования; определение возможности метрологического обеспечения экспериментальных исследований, связанных с разработкой изделия, а также предварительная оценка метрологического обеспечения изготовления и эксплуатации намеченного к разработке изделия.

При проведении метрологической экспертизы особое внимание обращают на следующие разделы: технические (тактико-технические) требования, порядок контроля и приемки. Проверяют наличие выходных параметров продукции, правильность формы их записи, оценивают правильность метрологической терминологии, наименований и обозначений физических величин и их единиц. Проверяют возможность обеспечения требований безопасности труда необходимыми средствами и методами контроля. Оценивают возможность контроля параметров при заданных нормах точности имеющимися средствами измерений; устанавливают возможную потребность в разработке новых специальных средств измерений и методик выполнения измерений, необходимость проведения специальных метрологических исследований, связанных с разработкой и последующей эксплуатацией изделия. При этом должна быть предусмотрена возможность метрологической аттестации и поверки нестандартизованных средств измерений, или намечена одновременная разработка необходимых технических средств для метрологического обеспечения таких средств измерений. В случае необходимости приобретения импортных средств измерений заявки министерства должны быть согласованы с Госстандартом СССР.

Метрологическую экспертизу технических заданий на разработку средств измерений проводят метрологические службы организаций-разработчиков средств измерений и головные организации по государственным испытаниям средств измерений или головные (базовые) организации метрологических служб министерств (ведомств). Технические задания на разработку образцовых средств измерений организации-разработчики направляют на метрологическую экспертизу в соответствии с планом государственной стандартизации в метрологические институты (по специализации) Госстандарта СССР. Метрологическую экспертизу технических заданий на образцовые средства измерений, разрабатываемые метрологическими институтами Госстандарта СССР, проводит ВНИИМС.

При метрологической экспертизе технических заданий на разработку средств измерений проводят оценку:

- необходимости разработки средств измерений с метрологическими характеристиками, приведенными в техническом задании;

- соответствия метрологических характеристик и способов их нормирования требованиям нормативно-технических документов;

- обеспеченности методами и средствами поверки средств измерений при их разработке, производстве и эксплуатации;

- правильности использования единиц физических величин, допущенных к применению в нашей стране; терминов и определений, установленных стандартами;

- соответствия разрабатываемого средства измерений его позиции в поверочной схеме (при экспертизе технических заданий на разработку образцовых средств измерений).

При проведении метрологической экспертизы технических заданий на разработку нестандартизованных средств измерений дополнительно проверяют технико-экономическое обоснование необходимости разработки нестандартизованных средств измерений, в том числе обоснование невозможности выполнения контрольно-измерительных операций средствами измерений, серийно выпускаемыми промышленностью; соответствие задаваемых технических параметров разрабатываемых средств измерений современному уровню измерительной техники по метрологическим

характеристикам, требованиям к точности и условиям выполнения измерений, для которых эти средства предназначены, а также требованиям стандартов ГСИ; возможность контроля метрологических характеристик средств измерений при их изготовлении и эксплуатации или наличие требований к обеспечению такого контроля; наличие требований к показателям надежности средств измерений с учетом заданных условий эксплуатации; наличие требований к метрологической аттестации и поверке средств измерений; наличие методик и средств поверки или сведений об их разработке; соответствие разрабатываемых средств поверки поверочной схеме.

Метрологическую экспертизу технических заданий проводят в срок, не превышающий 20 дней со дня поступления их на экспертизу. Ее результаты отражаются в экспертном заключении, рекомендуемая форма которого приведена в приложении к МИ 1314—86. Проект технического задания может быть возвращен на доработку в соответствии с замечаниями, содержащимися в экспертном заключении. Положительное заключение метрологической экспертизы является необходимым условием утверждения технических заданий на разработку всех без исключения средств измерений, предназначенных для производства, выпуска в обращение и применения в стране.

*Метрологическая экспертиза технического предложения* проводится с целью определения соответствия установленных для изделия норм точности требованиям, технического задания. При этом выясняется обоснованность и достаточность дополнительных норм точности, установленных для изделия сверх предусмотренных техническим заданием, а также их соответствие государственным и отраслевым стандартам, распространяющимся на данное изделие. На основании сведений об имеющихся у предполагаемого изготовителя средствах измерений выясняется контролепригодность установленных норм точности и возможность их контроля в реальных условиях измерений.

*Метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации* — это анализ и оценка технических решений по выбору параметров, подлежащих измерению, установлению норм точности и обеспечению методами и средствами измерений процессов разработки, изготовления, испытания, эксплуатации и ремонт изделий. Она является частью общего комплекса работ по метрологическому обеспечению подготовки производства и может быть частью экспертизы проектов технической документации, осуществляемой в соответствии с ГОСТ 15.001-88.

С учетом специфики конкретной отрасли следует установить стадии разработки документации, на которых будет проводиться экспертиза. Это могут быть техническое задание, техническое предложение, эскизный или технический проект, разработка рабочей документации и т. д. Проводить метрологическую экспертизу на всех перечисленных этапах, как правило, нецелесообразно, и в каждом случае следует найти оптимальный вариант. Необходимо иметь в виду, что в соответствии с МИ 1314—86 и ГОСТ 8.326-89 метрологическую экспертизу документации на разрабатываемые средства измерений следует выполнять на стадии технического задания. При разработке других изделий оптимальным является проведение метрологической экспертизы на ранних стадиях разработки документации, когда принимаются принципиальные конструктивные решения, от правильности выбора которых во многом зависит возможность и экономичность метрологического обеспечения производства и

эксплуатации изделия. Затраты на экспертизу при проектировании изделий компенсируются сокращением затрат на разработку неоптимальных вариантов, переделку конструкции, переоборудование производства и т. д.

Метрологической экспертизе в соответствии с МИ 1325—86 рекомендуется подвергать следующие виды документов:

конструкторские (по ГОСТ 2.102-68): чертежи деталей, сборочный, габаритный и монтажный чертежи, пояснительную записку, технические условия, программу и методику испытаний, расчет, эксплуатационные и ремонтные документы; технологические (по ГОСТ 3.1102—81): маршрутную и операционную карты, карту эскизов, технологические инструкции, карту технологического (типового) процесса, карту типовой операции, технологический регламент.

Экспертизе можно подвергать и другие документы, например, методики выполнения измерений, научно-технические отчеты, извещения об изменениях<sup>1</sup> документации, в которых установлены нормы точности или содержатся сведения о методах и средствах измерений, карты технического уровня и качества продукции и т. д. Конкретные виды конструкторских и технологических документов, подлежащих экспертизе или контролю, должны быть установлены и зависимости от типа изделий и характера производства в отраслевых стандартах и приказах по предприятию (организации). Как правило, метрологической экспертизе подвергаются технические условия, программы и методики испытаний, чертежи, инструкции и карты технологических процессов, а также некоторые виды эксплуатационных и ремонтных документов.

При проведении метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации на разработку нестандартизованных средств измерений дополнительно проверяют наличие перечня метрологических характеристик разработанных средств измерений, подлежащих контролю при изготовлении и эксплуатации, и указаний о методах и средствах их метрологической аттестации; указаний о методах, средствах- периодичности поверки разработанных средств измерений. Вели невозможно использовать действующие методики и существующие средства поверки, проверяют наличие вновь разработанной методики поверки и техническую задания на создание образцовых средств измерений.

Конструкторская и технологическая документация (оригиналы и подлинники), прошедшая метрологическую экспертизу, визируется в соответствии с ГОСТ 2.104-68 и ГОСТ 3.1104-81 лицами, ответственными за ее проведение. Результаты метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации, поступившей от других организаций и предприятий, а также требующие внесения изменений в конструкторскую и технологическую документацию или разработки мероприятий по повышению эффективности метрологического обеспечения, излагаются в экспертном заключении. Внесение изменений в конструкторскую и технологическую документацию должно производиться в соответствии с ГОСТ 2.503-74 и ГОСТ 3.1101-81.

*Метрологическая экспертиза проектов стандартов* это анализ и оценка технических решений по метрологическому обеспечению стандартизуемых объектов. Метрологической экспертизе подлежат проекты стандартов всех видов на продукцию по ГОСТ 1.2-85, проекты стандартов, устанавливающих нормы точности измерений, методы и средства измерений и другие метрологические требования и правила, а также проекты стандартов, содержащих данные о физических константах и свойствах веществ и мате-

риалов. Метрологическая экспертиза их выполняется в два этапа. Сначала проводится экспертиза первой редакции проекта стандарта. Ее результаты оформляются в виде отзыва на проект стандарта и плана основных мероприятий по его внедрению. Отзыв подготавливается головной или базовой организацией ведомственной метрологической службы, представляющей проект стандарта на утверждение. Он должен содержать заключение о метрологическом обеспечении стандартизуемого объекта. Если проект стандарта разрабатывается в самой головной или базовой организации, то заключение о метрологическом обеспечении включается в пояснительную записку к проекту стандарта. На дополнительные отзывы рассылаются проекты государственных стандартов:

на сырье и материалы, но Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии стандартных образцов или по его поручению в организацию, являющуюся ведущей в соответствующей области;

на нефть и нефтепродукты - во Всесоюзный научно-исследовательский институт расходометрии;

на средства измерений — в метрологические институты Госстандарта СССР по специализации;

содержащие данные о физических константах и свойствах веществ и материалов — во ВНИЦ МВ. На втором этапе метрологические научно-исследовательские институты Госстандарта СССР (в соответствии с закрепленными за ними группами продукции) проверяют полноту метрологической экспертизы и отражения ее результатов в окончательной редакции проекта государственного стандарта.

Проекты стандартов ГСИ, устанавливающих требования к государственным эталонам и государственным поверочным схемам, а также методам и средствам поверки средств измерений, разрабатываются метрологическими институтами. Метрологическую экспертизу первой и окончательной редакции этих проектов осуществляет ВНИИМС.

**Стандартизация и аттестация методик выполнения измерений.**

**Методика выполнения измерений — это совокупность правил, норм и требований к методу, средствам и условиям измерений, процедуре их выполнения и алгоритму вычислений, соблюдение которых гарантирует получение результата измерения с требуемой точностью.** Методики выполнения измерений многократного применения являются объектами стандартизации, остальные должны быть аттестованы. ГОСТ 8.010-72 и ГОСТ 8.505—84 устанавливают основные положения, которые должны быть отражены и конкретизированы в государственных и отраслевых стандартах, типовых методиках выполнения измерений и аттестатах на конкретные методики, а также в соответствующих разделах стандартов технологических процессов, методов испытаний и контроля продукции. В частности, должно быть указано следующее:

1. Назначение и область применения методики выполнения измерений.
2. Требования к средствам измерений и вспомогательным устройствам (или типы и номера экземпляров средств измерений и технические характеристики вспомогательных устройств).
3. Метод измерений.
4. Порядок подготовки и выполнения измерений.
5. Числовые значения показателей точности по МИ 1317-86 (при аттестации) или нормы на показатели точности и зависимости между этими показателями и всеми влияющими факторами.

6. Способы обработки результатов измерений и оценки показателей точности измерений (для стандарта).

7. Межповерочные интервалы и нормативно-технические документы, по которым следует проводить поверку (для аттестата).

8. Требования техники безопасности.

Необходимость аттестации методик выполнения измерений должна быть зафиксирована в техническом задании на разработку изделия или технологического процесса. Решение о проведении аттестации может быть принято также при проведении работ по метрологическому обеспечению производства (в том числе при метрологической экспертизе технической и документации). Перечень методик выполнения измерений, подлежащих аттестации, включается в планы или графики разработки, изготовления и испытания изделий или технологического процесса, а также в общий план метрологического обеспечения предприятия.

Аттестацию проводят метрологические организации Госстандарта СССР (при особо точных и ответственных измерениях, а также предназначенных для метрологических работ в организациях Госстандарта СССР) и органы ведомственных метрологических служб (при измерениях для технологических процессов, контроля и испытаний продукции). Для участия в аттестации методик выполнения измерений отдел главного метролога может привлекать непосредственных разработчиков изделия или технологического процесса.

Аттестация методик выполнения измерений включает следующие основные этапы:

разработку и утверждение руководителем организации программы проведения аттестации;

выполнение исследований в соответствии с программой;

оформление и утверждение руководителем организации технического отчета;

оформление и утверждение аттестата методики выполнения измерений.

Аттестат подписывается лицами, непосредственно проводившими метрологическую аттестацию методики, и утверждается руководителем, утвердившим отчет.

Измерения по аттестованным методикам выполняют средствами измерений, прошедшими государственные испытания, аттестованными отраслевым нормативно-техническим документам, или теми средствами, метрологические характеристики которых определены непосредственно в процессе аттестации методики. Измерения по стандартизованным методикам разрешается проводить лишь теми средствами измерений, типы которых прошли государственные испытания и занесены в Государственный реестр.

Соблюдение требований, указанных в аттестатах или регламентированных стандартами, гарантирует получение заданной точности измерений. При этом отпадает необходимость в трудоемкой и требующей высокой квалификации исследовательской работе по оценке результатов измерений, поскольку такая работа уже выполнена соответствующими специалистами заранее при аттестации или стандартизации методики проведения измерения. Естественно, что аттестованные и стандартизованные методики выполнения измерений должны иметь преимущественное распространение во всех отраслях народного хозяйства.

Государственные испытания средств измерений. Целью государственных испытаний средств измерений является обес-

печение единства измерений в стране, установление рациональной номенклатуры и эффективное использование парка средств измерений, а также постановка на производство и выпуск только таких средств измерений, которые по своему техническому уровню и качеству соответствуют лучшим отечественным и зарубежным образцам. К серийному производству, выпуску в обращение в СССР и ввозу из-за границы партиями допускаются лишь те средства измерений, типы которых прошли государственные испытания, утверждены Госстандартом СССР и внесены в Государственный реестр средств измерений.

Основными задачами государственных испытаний являются:

определение целесообразности и возможности производства средств измерений стране, а также необходимости их ввоза из-за границы партиями:

проверка обеспеченности средств измерений необходимыми методами и средствами поверки и ремонтом;

проверка соответствия выпускаемых и ввозимых из-за границы средств измерений требованиям распространяемых на них нормативно-технических документов.

Организацию и проведение государственных испытаний обеспечивает Госстандарт СССР и его республиканские управления. Проводят государственные испытания метрологические институты и территориальные органы Госстандарта СССР, головные организации по государственным испытаниям средств измерений и головные (базовые) организации метрологических служб министерств (ведомств). Головной организацией в стране по проведению государственных испытаний является ВНИИМС.

Согласно ГОСТ 8.383-80, установлены два вида государственных испытаний средств измерений: приемочные и контрольные.

*Государственным приемочным испытаниям* подвергаются опытные образцы средств измерений новых типов, предназначенных для серийного производства, и образцы средств измерений, подлежащих ввозу из-за границы партиями.

Программа государственных приемочных испытаний составляется организацией, представляющей средство измерений на испытания, и утверждается метрологическим институтом, но специализации. Для средств измерений медицинского назначения эта программа должна быть согласована с головной организацией метрологической службы Министерства здравоохранения СССР. Государственные приемочные испытания образцов средств измерений, ввозимых из-за границы партиями, проводят после предварительного согласования с Госстандартом СССР заявок на их ввоз. Порядок согласования и рассмотрения заявок установлен Госстандартом СССР совместно с Министерством внешней торговли. Для этих средств измерений проект программы и соответствующую документацию, указанную в приложении к ГОСТ 8.001—80, организация-заказчик этих средств измерений представляет в метрологический институт по специализации за 45 дней до начала испытаний. Если государственные приемочные испытания средств измерений, ввозимых из-за границы партиями, проводит метрологический институт Госстандарта СССР, то он же разрабатывает их программу, нормативно-техническую документацию на методы и средства поверки и составляет описание типа средств измерения.

На приемочные испытания организации-разработчики представляют три экземпляра средств измерений и следующую документацию: утвержденное техническое задание по ГОСТ 15.001-88; проект технических

условий по ГОСТ 2.114-70; эксплуатационную документацию по ГОС"1 2.601-68 в трех экземплярах; проект нормативного документа на методу и средства поверки по ГОСТ 8.001-80 и РД 50-660-88 в трех экземплярах; карту технического уровня и качества продукции по ГОСТ 2.116-81 в двух экземплярах; принципиальные схемы по ГОСТ 2.701-84 и сборочный чертеж средств измерений; протокол предварительных испытаний опытных образцов с приложением программы и методики испытаний ГОСТ 2.106—68; программу и методику контрольных испытаний на надежность; фотографии общего вида средств измерений размером 13X18 или 18X24 см в 15 экземплярах, а также справку о метрологическом обеспечении средств измерений в процессе производства и эксплуатации, о возможности их ремонта; технико-экономическое обоснование целесообразности производства разработанных средств измерений; обоснование значений показателей надежности и методов их подтверждения; проект описания типа вновь разработанных средств измерений с актом экспертизы и возможностью опубликования этого описания в открытой печати; эксплуатационную документацию на вновь разработанные образцовые средства из морений; копию заключения метрологической экспертизы технического задания и программу государственных приемочных испытаний вновь разработанных средств измерений или заключение метрологического института Госстандарта СССР о возможности проведения испытаний, типовой программе. По согласованию с организацией, проводящей испытания организация-разработчик представляет также необходимое испытательное оборудование, в том числе образцовые средства измерений, прошедшие поверку.

Государственные приемочные испытания по решению министерства согласованному с Госстандартом СССР, могут также проводиться на образцах из установочной серии. В этом случае испытательную аппаратуру, образцовые средства измерений и документацию предоставляет по указанию министерства организация-разработчик либо предприятие-изготовитель серийной продукции.

Место и сроки проведения государственных приемочных испытаний устанавливаются планом государственной стандартизации.

При испытании средств измерений проверяют соответствие их технического уровня и назначен >я техническому заданию на разработку, проекту технических условий или стандарту на средства измерений данного типа; правильность нормирования метрологических характеристик и возможность их контроля при производстве, после ремонта и в процессе эксплуатации; ремонтпригодность; соответствие нормированных показателей надежности и методов их контроля, указанных в проекте технических условий, требованиям нормативно-технической документации; результаты расчета и рекомендуемую периодичность поверки; возможность проведения поверки в соответствии с нормативно-техническими документами на методы и средства поверки или их проектами.

Бели приемочным испытаниям подвергаются Информационно-измерительные системы, то дополнительно проводят экспертизу методики расчета метрологических характеристик системы (при необходимости экспериментально проверяют результаты расчета, выполненного по этой методике), если образцы из установочной серии, то дополнительно проверяют состояние метрологического обеспечения

производства.

При проведении приемочных испытаний образцов средств измерений, ввозимых из-за границы партиями, проверяют их соответствие документации фирмы-изготовителя или стандартам СЭВ; возможность метрологического обслуживания при эксплуатации; ремонтпригодность; определяют метрологические характеристики, подлежащие контролю при эксплуатации, и периодичность поверки.

Продолжительность приемочных испытаний должна быть не более двух месяцев. Началом их проведения считают дату отправления в Госстандарт СССР организацией или государственной комиссией, проводящей испытания, извещения о получении документации, утвержденной программы испытаний и образцов средств измерений. Окончанием приемочных испытаний считается дата подписания акта испытаний.

Акт государственных приемочных испытаний вместе с материалами, указанными в приложении к ГОСТ 8.001-80, направляется в метрологический институт Госстандарта СССР, утвердивший программу испытаний, на метрологическую экспертизу, после чего все документы представляются в Госстандарт СССР. Результаты приемочных испытаний служат основанием для утверждения Госстандартом СССР нового типа средств измерений, внесения его в Государственный реестр средств измерений, выдачи разрешения на выпуск установочной серии, а для импортных средств измерений — на ввоз в СССР партиями. Предприятия-изготовители на утвержденные средства измерений должны наносить знак Государственного реестра, а если этого не позволяет конструкция, то ставить его на эксплуатационные документы. Форма и размеры знака Государственного реестра приведены в обязательном приложении к ГОСТ

*Государственным контрольным испытаниям* подлежат образцы из установочной серии выпускаемых серийно средств измерений или ввозимых из-за границы партиями. Контрольные испытания проводят также по истечении срока действия разрешения на серийное производство и выпуск в обращение в СССР; при внесении в конструкцию средств измерений или технологию его изготовления изменений, влияющих на нормированные метрологические характеристики; при проверке не реже одного раза в два года соответствия выпускаемых или периодически ввозимых из-за границы партиями средств измерений установленным типам и требованиям их эксплуатационной документации (в том числе при наличии сведений об ухудшении их качества).

Контрольные испытания средств измерений проводят территориальные органы Госстандарта СССР, которые могут привлекать к этому головные и базовые организации метрологических служб министерств (ведомств), головные организации по государственным испытаниям министерств (ведомств) и другие заинтересованные организации. Они могут проводиться одновременно с периодическими испытаниями на предприятии-изготовителе.

На государственных контрольных испытаниях проверяют соответствие средств измерений тину, утвержденному Госстандартом СССР, требованиям стандартов и технических условий, а для средств измерений, ввозимых из-за границы, - документации фирм: метрологическое обеспечение производства и эксплуатации средств измерений, обеспеченность их ремонтом, соответствие средств измерений требованиям народного хозяйства и современному техническому уровню.

Началом контрольных испытаний является дата подписания акта об

отборе образцов средств измерений, а окончанием дата утверждения акта о проведении контрольных испытаний. Продолжительность контрольных испытаний не должна превышать двух месяцев. После окончания испытаний образцы средств измерений возвращаются предприятию-изготовителю или организации-заказчику средств измерений, ввозимых из-за границы.

Положительные результаты государственных контрольных испытаний образцов из установочной серии служат основанием для разрешения Госстандартом СССР серийного производства и выпуска средств измерений и обращение в СССР на срок, устанавливаемый для каждого типа средств измерений (но не свыше пяти лет), а также для разрешения выпуска в обращение самой установочной серии. В остальных случаях акт о положительных итогах государственных контрольных испытаний является основанием для продолжения их серийного производства и выпуска в обращение.

При отрицательных результатах государственных контрольных испытаний территориальные органы Госстандарта СССР запрещают выпуск средств измерений в обращение в СССР. В отношении средств измерений, ввозимых из-за границы, решение о запрещении выпуска их в обращение принимает Госстандарт СССР по представлению территориального органа, проводившего испытания.

Метрологическая аттестация средств измерений. Средства измерений, не подлежащие государственным испытаниям, подвергаются метрологической аттестации в соответствии с требованиями ГОСТ 8.326—89. Это средства измерений, изготовленные в единичных экземплярах, уникальные, не предназначенные для серийного производства, закупленные за границей в количестве нескольких штук. Ни сами они, ни их технические или метрологические характеристики не могут быть объектами стандартизации. Вследствие этого такие средства измерений получили название нестандартизованных. Особенно много их изготавливают и применяют в научно-исследовательских институтах. Для обеспечения единства и достоверности измерений с помощью таких технических средств они должны быть аттестованы.

**Метрологическая аттестация — это исследование средства измерений, выполняемое метрологическим органом с целью определения его метрологических свойств и выдачи соответствующего документа с указанием полученных данных.** При метрологической аттестации нестандартизованных средств измерений проверяется соответствие их требованиям ТЗ, ТУ и стандартов ГСИ, а также пригодность к применению в соответствии с назначением. Кроме того, определяются характеристики этих средств измерений, которые необходимо контролировать в процессе эксплуатации, порядок, методы и средства поверки, межповерочные интервалы.

Метрологическая аттестация может быть государственной, если она проводится органами государственной метрологической службы, и ведомственной - если проводится метрологической службой министерства (ведомства).

*Государственной метрологической аттестации* подвергаются нестандартизованные средства измерений, подлежащие обязательной государственной поверке.

*Ведомственной метрологической аттестации* подлежат нестандартизованные средства измерений, предназначенные для

проведения научно-исследовательских, экспериментальных и опытно-конструкторских работ; используемые при контроле качества продукции, контроле и управлении технологическими процессами, контроле режимов работы машин, оборудования и др.; применяемые в ведомственных метрологических службах в качестве образцовых подчиненных средств измерений.

Представляемые на аттестацию средства измерений должны сопровождаться технической документацией и необходимым вспомогательным оборудованием, а также, по требованию органа государственной метрологической службы, необходимыми образцовыми средствами измерений. На аттестацию средств измерений представляется следующая техническая документация:

- техническое задание на разработку, прошедшее метрологическую экспертизу в соответствии с ГОСТ 8.326—89;

- технические условия, техническое описание, инструкция по эксплуатации;

- проект программы метрологической аттестации и проект нормативно-технической документации на методы и средства поверки.

На ввозимые из-за границы средства измерений представляются;

- документ, в котором приведены требования к метрологическим характеристикам и условиям применения средств измерений;

- техническое описание и инструкция по эксплуатации (или заменяющий их объединенный документ);

- проект программы метрологической аттестации и проект нормативно-технического документа на методы и средства поверки.

Программа аттестации нестандартизованных средств измерений должна включать оценку полноты, правильности и способов выражения метрологических характеристик средств измерений в технической документации; проверку соответствия метрологических характеристик средств измерений указанным в технической документации; обоснование методов экспериментального исследования метрологических характеристик средств измерений с оценкой точности их определения и влияния условий эксплуатации; установление порядка включения средств измерений в государственную поверочную схему или порядка их соотнесения с государственным эталоном, оценку проекта нормативно-технического документа на методы и средства поверки средств измерений и установление периодичности поверки.

Методы экспериментального исследования метрологических характеристик аттестуемых средств измерений должны соответствовать действующим нормативно-техническим документам. При этом устанавливаются требования к точности измерений, к числу и размерам интервалов между значениями исследуемой характеристики, к числу измерений в каждой выбранной точке и к числу серий измерений; указания о режиме измерений и их последовательности во времени; правила обработки результатов измерений. При невозможности использования методов и средств, установленных действующей нормативно-технической документацией, предприятие (организация), представляющее средства измерений на метрологическую аттестацию, должно предусмотреть специальные методы и оборудование для исследования их метрологических характеристик.

Проект нормативно-технического документа на методы и средства поверки средств измерений должен содержать перечень метрологических ха-

рактических характеристик, подлежащих определению при периодической поверке средств измерений; перечень образцовых средств измерений и вспомогательного оборудования, необходимых для проведения поверки, условия и способы определения метрологических характеристик средств измерений.

Метрологическая аттестация каждого, нестандартизованного средства измерений производится в индивидуальном порядке. По ходу ее составляется протокол. После завершения всех работ по аттестации и вынесения решения о пригодности средства измерений к применению в качестве рабочего того или иного класса точности или образцового соответствующего разряда протокол утверждается и по установленной форме выдается свидетельство. Срок проведения аттестации нестандартизованных средств измерений не должен превышать двух месяцев.

**Поверка средств измерений.** Поверкой называется определение метрологическим органом погрешностей средства измерений и установление его пригодности к применению. Постановлением Совета Министров СССР от 4 апреля 1983 г. № 273 „Об обеспечении единства измерений в стране" применение непроверенных средств измерений запрещено.

В зависимости от того, какой метрологической службой (государственной или ведомственной) выполняется поверка, она подразделяется на государственную и ведомственную.

Обязательной *государственной поверке* подлежат следующие средства измерений:

применяемые в органах государственной метрологической службы; исходные образцовые средства измерений предприятий;

выпускаемые из производства в качестве образцовых согласно их прямому назначению или по условиям заказа на изготовление;

предназначенные для измерений, результаты которых используются для учета материальных ценностей, топлива и энергии, при взаимных расчетах, в торговле, для защиты природной среды, обеспечения безопасности и труда;

предназначенные для измерений, результаты которых служат основанием для регистрации национальных и международных спортивных рекордов.

Остальные средства измерений подлежат *ведомственной поверке*. В отдельных случаях по согласованию с Госстандартом СССР допускается ведомственная поверка средств измерений, подлежащих обязательной государственной поверке. Средства измерений, ведомственная поверка которых не может быть обеспечена министерствами и ведомствами, представляются на поверку либо в органы государственной метрологической службы, либо на предприятия, в организации и учреждения других министерств и ведомств, которым предоставлено право такой поверки.

Предельный срок нахождения средств измерений, поступивших, на государственную поверку, в стационарных поверочных лабораториях при условии представления их в соответствии с графиком государственной поверки— 15 дней.

Право проведения поверки предоставлено государственным и ведомственным поверителям — лицам, прошедшим специальное обучение и сдавшим экзамены в учебных заведениях Госстандарта СССР. Допускается проведение поверочных работ не только сотрудниками

метрологических служб, но и работниками других подразделений предприятий, организаций и учреждений. Это позволяет совместить поверку с операциями по выходному техническому контролю средств измерений, выпускаемых из производства.

Процедура поверки регламентирована специальными нормативно-техническими документами: стандартами на методы и средства поверки, инструкциями по поверке, методическими указаниями и т. д. Согласно требованиям нормативных документов, в ходе поверки составляется протокол, в который вносятся наименования и характеристики применяемых образцовых средств измерений и результаты измерений. В дальнейшем все материалы, содержащиеся в протоколе, подвергаются обработке и анализу, на основании которых делается вывод о пригодности или непригодности средства измерений к применению. Вывод фиксируется в протоколе, имеющем статус основного юридического документа. На поверенные государственными органами средства измерений выдаются свидетельства, ведомственными — аттестаты. Положительный результат поверки может быть удостоверен государственным или ведомственным поверительным клеймом, которое наносится на средство измерений или эксплуатационные документы, свидетельства, аттестаты.

Согласно ГОСТ 8.513-84 „ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения“, поверка может быть первичной, периодической, внеочередной, инспекционной и экспертной.

*Первичная поверка* производится при выпуске средств измерений из производства или ремонта, а также при поставках их по импорту. Импортируемые средства измерений не подлежат первичной поверке в СССР в случаях, когда результаты поверки, проведенной в других странах, признаны Госстандартом СССР в соответствии с международными соглашениями о взаимном признании результатов испытаний и поверки, участником которых является СССР. Допускается выборочная первичная поверка средств измерений.

*Периодическая поверка* проводится при эксплуатации и хранении средств измерений через определенные промежутки времени — межповерочные интервалы. Эти интервалы устанавливаются при проведении государственных приемочных испытаний или метрологической аттестации средств измерений, исходя из показателей надежности. Они должны гарантировать метрологическую исправность средств измерений (соответствие метрологических характеристик установленным для них нормам) в период между поверками. Годовые календарные графики периодической поверки утверждаются руководителем предприятия или уполномоченным лицом. Графики составляются отдельно для средств измерений, представляемых на поверку в органы ведомственной и государственной метрологических служб. В последнем случае календарный график должен быть согласован с соответствующим территориальным органом Госстандарта СССР.

Средства измерений, находящиеся на длительном хранении, срок которого превышает межповерочный интервал; не подвергаются периодической поверке при условии соблюдения требований к их консервации и хранению. Передача средств измерений на длительное хранение должна быть оформлена актом с указанием даты последней поверки, условий хранения, вида консервации и упаковки. Поверку таких средств измерений про-

водят перед началом их эксплуатации.

Индикаторы не относятся к средствам измерений и не поверяются. На их лицевой стороне должно быть нанесено обозначение „И". Право перевода средств измерений в разряд индикаторов предоставлено метрологическим службам предприятий (организаций).

Средства измерений, применяемые для учебных (демонстрационных) целей, периодической поверке не подлежат. На них наносится обозначение „У"; использовать такие средства для измерений запрещено.

*Внеочередная поверка* проводится органами государственной и ведомственной метрологических служб при эксплуатации (хранении) средств измерений независимо от сроков периодической поверки в следующих случаях: когда возникает необходимость удостовериться в пригодности средств измерений к применению; при проведении работ по корректировке межповерочных интервалов; при контроле результатов периодической поверки; когда средства измерений устанавливают в качестве комплектующих изделий после истечения гарантийного срока на них; при повреждении доверительного клейма, пломбы и утрате документов, подтверждающих прохождение средством измерений периодической поверки: при вводе в эксплуатацию после длительного хранения, в течение которого не проводилась периодическая поверка.

Внеочередную поверку рекомендуется проводить перед началом эксплуатации новых средств измерений и средств, поступивших из ремонта, со склада, после хранения, после транспортировки и перед сдачей в ремонт.

При проведении государственного<sup>1</sup> надзора и ведомственного контроля средства измерений выборочно подвергают *инспекционной поверке*. При этом устанавливают правильность результатов последней поверки и соответствие установленных межповерочных интервалов условиям эксплуатации. Если результаты поверки показывают неудовлетворительное состояние средств измерений, то поверительные клейма погашают, свидетельства о поверке аннулируют, а в паспортах или других заменяющих их эксплуатационных документах делают запись о непригодности средств измерений к применению. Результаты инспекционной поверки отражают в акте.

При метрологической экспертизе средств измерений по требованию суда, прокуратуры, милиции, государственного арбитража, органов народного контроля, по письменному заявлению предприятий и отдельных граждан, а также при возникновении спорных вопросов органы государственной метрологической службы проводят *экспертную поверку* средств измерений в объеме, необходимом для обоснования заключения экспертизы о состоянии средств измерений, правильности их поверки и применения. По результатам поверки составляют экспертное заключение, которое утверждает руководитель органа Госстандарта СССР, проводившего поверку. Экспертное заключение направляют заявителям, а один его экземпляр оставляют на хранение в органе Госстандарта СССР.

Положительные результаты экспертной поверки средств измерений не подлежат оформлению в соответствии с требованиями нормативных документов по поверке. На средствах измерений, признанных непригодными к применению (если они не являются вещественными доказательствами), поверительные клейма погашают, а в документах, удостоверяющих поверку, делают соответствующую запись. Средства измерений, являющиеся вещественными доказательствами, оставляют в том

виде,, в каком они были предъявлены на экспертизу. Если результаты экспертной поверки средств измерений дают основание предполагать наличие злоупотреблений, наносящих ущерб народному хозяйству или отдельным гражданам, руководитель учреждения государственной метрологической службы должен сообщить об этом следственным органам.

Наряду с перечисленными видами метрологической деятельности сотрудники государственной метрологической службы в научно-исследовательских институтах Госстандарта СССР ведут поиск и изучение новых физических явлений и эффектов с целью их использования для дальнейшего развития эталонной базы страны, выполняют постоянные метрологические работы по всестороннему исследованию и непрерывному совершенствованию существующих эталонов, сличению их между собой и с международными эталонами, повышению точности и расширению диапазонов воспроизведения единиц физических величин. Большое внимание уделяется вопросам централизации и децентрализации воспроизведения единиц, созданию новых методов и средств поверки, комплектных поверочных лабораторий, оснащению ими территориальных органов Госстандарта СССР и ведомственных метрологических служб, повышению метрологической надежности средств измерений, внедрению в метрологическую практику автоматизированных систем и микропроцессорной техники. Сотрудниками государственной и ведомственных метрологических служб разрабатывается и выпускается нормативно-техническая документация. Всем этим в совокупности достигается опережающее развитие метрологического обеспечения народного хозяйства СССР.

#### ***11.4. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАДЗОР И ВЕДОМСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ЗА СТАНДАРТАМИ И СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЙ В СССР***

*Государственный надзор* за внедрением и соблюдением стандартов осуществляется органами Госстандарта СССР во всех отраслях народного хозяйства на всей территории страны. Он имеет межотраслевой надведомственный характер. *Ведомственный контроль* ограничивается рамками министерства (ведомства) и проводится на его предприятиях и в организациях силами и средствами министерства (ведомства) (например, инспекцией по качеству), а также головными и базовыми организациями по видам изделий, по стандартизации или метрологической службы.

Положение о государственном надзоре за стандартами и средствами измерений в СССР утверждено постановлением Совета Министров СССР от 28 августа 1983 г. № 936. В соответствии с этим положением **главными задачами государственного надзора за стандартами и средствами измерений в нашей стране являются обеспечение министерствами, ведомствами, предприятиями, организациями и учреждениями своевременного внедрения и строгого соблюдения стандартов, метрологических правил, единства измерений, а также анализ научно-технического уровня стандартов, технических условий и средств измерений и содействие при их разработке наиболее полному использованию достижений науки и техники с целью повышения эффективности общественного производства, ускорения темпов научно-**

**технического прогресса, роста производительности труда, повышения технического уровня и качества продукции.**

Порядок внедрения государственных стандартов в министерствах, ведомствах, на предприятиях и в организациях всех отраслей народного хозяйства установлен ГОСТ 1.20-85. Министерства (ведомства) в месячный срок обязаны утвердить планы организационно-технических мероприятий по внедрению нового стандарта, издать приказ и направить подчиненным предприятиям и организациям директивное письмо, обязывающее их приступить к внедрению стандарта. Предприятия и организации на основе плана, утвержденного министерством, разрабатывают свои планы оргтехмероприятий, обеспечивающие внедрение стандарта в срок.

*Стандарт считается внедренным* на предприятии (в организации) в том случае, если установленные им нормы, показатели и требования применяются в соответствии с областью его распространения.

*Стандарт соблюдается*, если выпускаемая продукция соответствует всем его требованиям и при этом производство обеспечивает стабильность качества этой продукции. Ответственность за нарушение сроков внедрения стандартов и выпуск недоброкачественной (не соответствующей стандартам) продукции предусмотрена законодательствами СССР и союзных республик.

В соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 10 ноября 1970 г. № 937 „О повышении роли стандартов в улучшении качества выпускаемой продукции" с 1 января 1972 г. введена статистическая отчетность о внедрении государственных стандартов по форме 13-НТ, утвержденной ЦСУ СССР. Отчеты о всех фактически внедренных за отчетный период и о всех фактически невнедренных (с любым установленным сроком внедрения) стандартах по форме 13-НТ все самостоятельные промышленные предприятия союзных, союзно-республиканских, республиканских министерств (ведомств) и местных органов представляют два раза в год (за первый квартал — не позднее 5 апреля и за год в целом — не позднее 5 января) территориальному органу Госстандарта СССР, своей вышестоящей организации, определенной приказом по министерству (ведомству), и статистическому управлению по месту нахождения предприятия. Госнадзор за отчетностью о внедрении государственных стандартов ведется в органах госнадзора Госстандарта СССР непрерывно (для этого используется каждое посещение предприятия). В случае установления умышленных приписок или других искажений отчетных данных, наличия систематических злостных нарушений порядка и сроков представления отчетности органы госнадзора Госстандарта СССР в соответствии с действующим законодательством привлекают виновных к ответственности.

Государственный надзор за соблюдением стандартов проводится в целях пресечения и предупреждения нарушений стандартов и технических условий, выпуска продукции с отступлениями от стандартов, повышения государственной дисциплины и социалистической законности в области стандартизации.

Основной формой государственного надзора являются *выборочные проверки*, проводящиеся в соответствии с планами Госстандарта СССР, его республиканских управлений или по инициативе центров стандартизации и метрологии либо лабораторий государственного надзора за стандартами и измерительной техникой. В качестве объектов проверки могут быть выбраны отдельные изделия или группы однородной продукции на

различных стадиях жизненного цикла (при разработке новой продукции и постановке ее на производство, при ее производстве, эксплуатации, транспортировке, хранении и т. д.).

Основное внимание при проведении проверок уделяется важнейшим видам изделий (на стадиях разработки и производства), изделиям, которым присвоен государственный Знак качества (на стадии производства), ряду изделий, обеспечивающих выполнение общегосударственных программ (например, Продовольственной программы СССР), товарам народного потребления, а также продукции, о низком техническом уровне и качестве которой поступают сведения из различных источников информации (печать, письма трудящихся, рекламации и т. п.).

Главным содержанием проверок соблюдения стандартов и технических условий является контроль соответствия проверяемой продукции

всем требованиям, параметрам, нормам и характеристикам, установленным в НТД.

Для оценки объекта используются виды и методы контроля, предусмотренные стандартами, техническими условиями и (или) руководящими документами, согласованными либо утвержденными Госстандартом СССР. Стандартами системы разработки и постановки продукции на производство установлены виды контроля, которым подвергается продукция. Так, вновь разрабатываемая продукция подвергается *предварительным* и *приемочным* испытаниям, на которых устанавливается соответствие разрабатываемой продукции всем требованиям, нормам, параметрам и характеристикам, установленным в техническом задании на разработку в стандартах, распространяющихся на данный вид продукции. Серийно изготавливаемые изделия подвергаются *приемосдаточным* и *периодическим* испытаниям, которые проводятся с целью установления соответствия проверяемой продукции требованиям стандартов и технических условий, а также с целью проверки стабильности качества. Кроме того, серийно выпускаемая продукция может подвергаться *типовым* испытаниям с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию, рецептуру или технологический процесс. При постановке на производство установочная серия или первая промышленная партия подвергаются *квалификационным* испытаниям с целью оценки готовности предприятия к выпуску продукции данного типа в заданном объеме.

При всех видах проверок особое внимание уделяется *метрологическому обеспечению* разработки и постановки продукции на производство, самого производства, эксплуатации и хранения. При этом проверяется обеспеченность технологического процесса и испытаний (контроля) необходимыми средствами измерений требуемой точности, состояние средств измерений, наличие свидетельств о поверке, аттестатов на нестандартизованные средства измерений и испытаний, испытательное оборудование, стенды и т. п. Кроме того, проверяется аттестация самих испытательных подразделений, принимающих участие в проведении контроля (испытаний). В ряде случаев в содержание проверок включается проверка деятельности метрологической службы предприятия (организации).

Проверки проводят главные государственные инспекторы по надзору за стандартами и средствами измерений, их заместители, государственные инспекторы. При необходимости к проверкам могут привлекаться

специалисты и технические средства сторонних организаций и предприятий. В этом случае государственный инспектор, ответственный за проведение проверки, является ее руководителем.

По результатам проверки составляется *акт* - юридический документ, являющийся основанием для применения правовых санкций.

Правила построения и изложения акта регламентированы соответствующими инструкциями по государственному надзору. Основными требованиями к акту являются его достоверность, обоснованность установленных фактов нарушений стандартов и причин, их вызвавших, краткость изложения. Ответственность за полноту, достоверность и объективность изложенных в акте результатов проверки несет руководитель проверки.

На основании акта проверки главные государственные инспекторы (их заместители) и государственные инспекторы принимают меры, направленные на пресечение, устранение и предотвращение нарушений и причин, их вызвавших. С этой целью выдаются предписания:

- о прекращении производства продукции при нарушениях стандартов и метрологических правил;

- о запрещении выпуска и реализации продукции с нарушением стандартов;

- о запрещении использования продукции с нарушением стандартов;

- о запрещении передачи заказчику (в производство) и применения конструкторской, технологической и проектной документации, не соответствующей стандартам и метрологическим правилам, если это может повлечь за собой снижение технического уровня и качества продукции;

- об устранении нарушений стандартов, метрологических правил и причин, порождающих эти нарушения;

- о введении на предприятии особого режима приемки готовой продукции в случаях систематического нарушения стандартов при ее выпуске;

- о запрещении проведения испытаний продукции (для головных организаций по государственным испытаниям важнейших видов продукции) с нарушением порядка испытаний, установленного стандартами и метрологическими правилами и отмене принятых решений по результатам этих испытаний;

- об изъятии из обращения средств измерений, не прошедших государственные испытания, метрологическую аттестацию, неповеренных или неисправных;

- о применении экономических санкций в случаях, предусмотренных Положением о порядке применения экономических санкций за нарушение стандартов и технических условий от 12 июля 1983 г. № 94\*

- о сокращении отчислений в фонд экономического стимулирования в случае нарушений требований к аттестации и качеству продукции высшей категории, исключению такой продукции из соответствующих отчетных данных и о запрещении обозначения ее государственным Знаком качества.

Кроме того, оформляются *протоколы*, которые направляются в административные комиссии при исполкомах Советов народных депутатов для привлечения к ответственности должностных лиц, виновных в нарушениях правил по стандартизации и качеству продукции, выпуска в обращение и содержания средств измерений и пользования ими.

Применяются также и другие правовые средства в установленном по-

рядке.

Государственный метрологический надзор и ведомственный метрологический контроль за средствами измерений проводят в целях обеспечения единства измерений как необходимого условия повышения эффективности общественного производства, ускорения научно-технического прогресса, роста производительности труда, повышения технического уровня и качества продукции, обеспечения достоверного учета материальных сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, повышения эффективности управления в отраслях народного хозяйства.

Основные положения по осуществлению государственного метрологического надзора и ведомственного метрологического контроля за разработкой, производством, состоянием, применением и ремонтом средств измерений, за деятельностью ведомственных метрологических служб, за внедрением и соблюдением метрологических правил, в том числе правил метрологического обеспечения работ, производимых во всех отраслях народного хозяйства, устанавливает ГОСТ 8.002—86.

Основной задачей государственного метрологического надзора и ведомственного метрологического контроля является укрепление государственной дисциплины и повышение ответственности министерств (ведомств), предприятий, объединений, организаций и учреждений за своевременное внедрение и строгое соблюдение метрологических правил, установленных действующим законодательством, стандартами, инструкциями, правилами, положениями и другими НТД, за обеспечение единства измерений и метрологическое обеспечение работ, производимых в отраслях народного хозяйства. Государственный метрологический надзор осуществляют в форме:

государственных приемочных и контрольных испытаний средств измерений по ГОСТ 8.383-80 и ГОСТ 8.001-80;

государственной метрологической аттестации по ГОСТ 8.326-89;

государственной поверки средств измерений по ГОСТ 8.513—84;

регистрации предприятий и организаций, изготавливающих, ремонтирующих и поверяющих средства измерений в соответствии с порядком, устанавливаемым Госстандартом СССР;

проверок состояния и применения средств измерений, деятельности ведомственных метрологических служб в министерствах (ведомствах) I и на предприятиях, внедрения и соблюдения метрологических правил в соответствии с порядком, устанавливаемым Госстандартом.

Ведомственный метрологический контроль проводят в форме:

ведомственной метрологической аттестации средств измерений по ГОСТ 8.326-89

ведомственной поверки средств измерений по ГОСТ 8.513—84;

проверок состояния и применения средств измерений, внедрения и соблюдения метрологических правил на предприятиях системы министерства (ведомства);

проверок деятельности головных и базовых организаций метрологической службы, структурных подразделений метрологической службы на предприятиях системы министерства (ведомства) в порядке, устанавливаемом министерством (ведомством);

аттестации испытательных и аналитических лабораторий на предприятиях системы министерства (ведомства).

В НТД министерства (ведомства) могут быть установлены иные формы ведомственного метрологического контроля.

Государственный метрологический надзор осуществляют: Госстандарт СССР, республиканские управления Госстандарта СССР в союзных республиках; центры стандартизации и метрологии, лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой Госстандарта СССР.

Ведомственный метрологический контроль осуществляют: министерство (ведомство) с возложением этих функций на отдел (службу) главного метролога министерства (ведомства); головные и базовые организации

метрологической службы министерства (ведомства) с возложением этих функций на соответствующее специализированное подразделение; отдел главного метролога или другие структурные подразделения метрологической службы предприятия.

В случаях нарушения метрологических правил, органы государственного надзора применяют в отношении предприятий и виновных должностных лиц установленные законодательством правовые меры и дают обязательные предписания об устранении выявленных нарушений.

Правовые меры, применяемые в порядке государственного метрологического надзора, устанавливает в п. 4 ГОСТ 8.002-86.

## **ГЛАВА 12**

### **УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ**

#### ***12.1. КОНТРОЛЬ И АТТЕСТАЦИЯ КАЧЕСТВА***

Повышение качества выпускаемой продукции - центральная задача современного производства. В постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 12 мая 1986 г. „О мерах по коренному повышению качества продукции" записано: „Повышение качества продукции и выполняемых работ должно стать общепартийным, общегосударственным, всенародным делом, центральным звеном в разработке и реализации долгосрочных, пятилетних и годовых планов, предметом постоянного внимания и контроля, главным фактором в оценке деятельности каждого трудового коллектива". В решении этой задачи важная роль отводится *измерению качества* (квалиметрии) и *управлению качеством* на базе стандартизации. Наряду с измерением качества на всех этапах производства с целью „проверки соответствия показателей качества продукции установленным требованиям" (ГОСТ 15467—79) применяется *контроль качества*. По месту, занимаемому в технологическом процессе, контроль может быть предупредительным, входным, текущим, операционным, выходным, приемочным и т. д.; по способу проведения — активным, пассивным, сплошным, выборочным, по качественным или количественным признакам; по степени использования средств контроля - измерительным, регистрационным, по контрольному образцу, органолептическим, техническим осмотром. Содержание этих видов контроля следует из их названия.

*Сплошной контроль* применяется при индивидуальном и мелкосерийном производствах. В остальных случаях организуется *выборочный контроль*, при котором проверяется только часть продукции - выборка из генеральной совокупности. Выборка формируется случайным образом, например, с помощью генератора или таблицы случайных чисел. Если контроль выборочных изделий дает положительные результаты, то принимается вся предъявленная партия (генеральная совокупность); в

противном случае — вся партия бракуется. При этом возможны ошибки двойного рода. В первом случае партия высокого качества бракуется из-за случайного попадания в выборку большого числа бракованных изделий. Вероятность такой ошибки называется „риском поставщика". Во втором случае партия, которая должна быть забракована, принимается, так как в выборке случайно оказались преимущественно хорошие изделия. Вероятность этой ошибки называется „риском заказчика". Чем больше объем выборки, тем меньше вероятность ошибок первого и второго рода.

При контроле изделий *по качественным признакам* они разделяются на две группы: годные и дефектные. Партия принимается, если отношение числа дефектных изделий к объему выборки не превышает установленной нормы; в противном случае - партия бракуется. При контроле продукции *по количественным признакам* оцениваются числовые характеристики законов распределения контролируемых параметров. Например, при контроле надежности определяется срок службы каждого изделия в выборке и находится среднее арифметическое. Если оно превышает заранее заданный норматив, то партия принимается, если нет - бракуется.

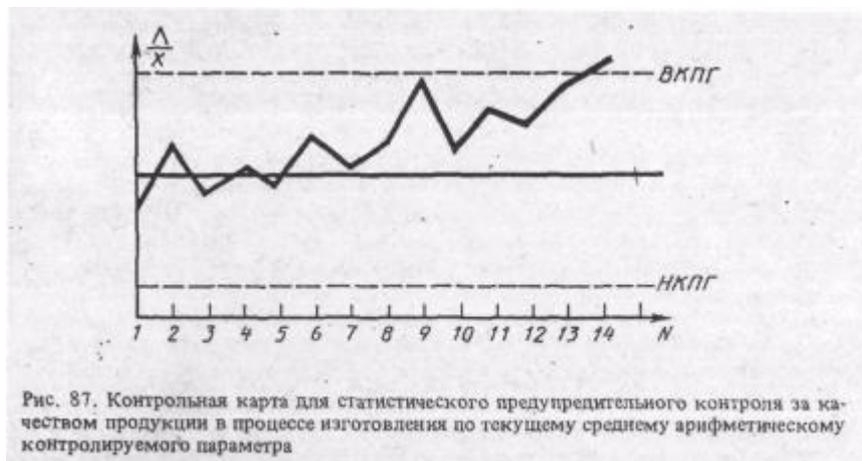


Рис. 87. Контрольная карта для статистического предупредительного контроля за качеством продукции в процессе изготовления по текущему среднему арифметическому контролируемого параметра

При *текущем предупредительном статистическом* контроле применяются контрольные карты. Образец такой карты показан на рис. 87. По оси абсцисс отложены порядковые номера выборок, а по оси ординат — текущее среднее арифметическое контролируемого параметра. Карта имеет две контрольно-предупредительные границы: верхнюю (VKПГ) и нижнюю (НКПГ). Значение контролируемого параметра должно находиться между ними, вблизи среднего значения. На рис. 88 показана карта для контроля за изменением параметра изделия по размаху. Здесь есть только одна контрольно-предупредительная граница, за которую не должно выходить значение размаха. Как видно из рисунков, контроль позволяет своевременно предсказать недопустимое понижение качества изделий и принять соответствующие меры, предотвращающие появление брака.



Принятие необходимых мер предполагает наличие соответствующего! исполнительного механизма. Действие его регламентировано комплексом™

нормативно-технических документов, основу которого составляет система!

стандартов. Таким образом, квалиметрия, контроль качества (проверка™ соответствия нормам) и принятие мер согласно действующим нормативно-техническим документам в совокупности образуют цепь управления качеством, позволяющую активно влиять на процесс производства продукции.

Особенно важным является управление качеством продукции на стадии ее разработки. Согласно ГОСТ 2.103—68, разработка изделий во всех отраслях промышленности делится на пять этапов: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект и рабочая документация. Практически на каждом из них может составляться карта технического уровня и качества продукции в соответствии с ГОСТ 2.116—84. Это создает условия для разработки изделий на высоком научно-техническом уровне.

Контроль качества готовой продукции осуществляется с целью определения соответствия качества предъявленной к сдаче продукции требованиям стандартов и технических условий. Различают следующие категории испытаний готовой продукции: приемосдаточные, периодические, типовые, аттестационные и эксплуатационные.

*Приемосдаточным испытаниям* подвергается вся изготовленная продукция. *Периодические* испытания проводятся, когда тот или иной вид испытаний невозможно или нецелесообразно проводить в рамках приемосдаточных испытаний (например, испытания на долговечность, испытания, связанные с разрушением образца, и т. п.). *Типовые* испытания проводятся после освоения нового вида продукции или после внесения конструктивных или технологических изменений в техническую документацию на изделие. *Аттестационные* испытания предназначены для присвоения продукции высшей или первой категории качества и для выдачи разрешения на право ее выпуска. *Эксплуатационные* испытания проводятся представителем предприятия-изготовителя на изделиях, находящихся в эксплуатации у заказчика (например, испытание на надежность радиоаппаратуры, которое невозможно осуществить в производственных условиях, испытания тракторов, автомобилей и т. п.).

*Аттестации* подлежит вся товарная продукция, серийно выпускаемая предприятиями. Не подлежит аттестации продукция, изготавливаемая по одноразовым договорам или наряд-заказам, поставляемая для нужд обо-

роны, прошедшая ремонт, нестандартизованная (в том числе оборудование и инструмент, изготовленные предприятием для собственных нужд), опытные образцы (партии), необогащенное сырье, ювелирные изделия и предметы народной промысла.

Целями аттестации качества продукции являются увеличение объемов производства продукции, соответствующей лучшим отечественным и мировым достижениям или превосходящей их, для полного удовлетворения потребностей народного хозяйства и населения страны, расширение производства прогрессивных, конкурентоспособных машин, оборудования и приборов, ускорение модернизации или снятие с производства устаревшей продукции.

Для аттестации продукции, выпускаемой предприятиями, назначаются постоянно действующие Государственные аттестационные комиссии. В их состав должны входить по одному специалисту от следующих организаций: министерства (ведомства)-заказчика, министерства (ведомства), являющегося ведущим в производстве аттестуемой продукции, головного НИИ (КБ) по направлению работы министерства-изготовителя, территориального органа Госстандарта СССР, Государственного комитета СССР по делам изобретений и открытий, Министерства внешней торговли СССР, Министерства торговли СССР (при аттестации товаров народного потребления). Продукция, подлежащая аттестации, включается в пятилетние и годовые планы аттестации.

Продукция высшей категории качества, но технико-экономическим показателям должна соответствовать лучшим отечественным и мировым образцам или превосходить их, быть конкурентоспособной на внешнем рынке, иметь повышенные стабильные показатели качества, соответствовать требованиям международных стандартов.

Продукция первой категории качества по технико-экономическим показателям должна соответствовать современным требованиям стандартов (технических условий) и удовлетворять потребностям народного хозяйства и населения страны.

Государственная аттестационная комиссия принимает решение об отнесении продукции к высшей или первой категории качества на следующие сроки:

для продукции производственно-технического назначения - до трех лет;  
для товаров народного потребления - до двух лет.

Работа Государственной аттестационной комиссии завершается оформлением документа, называемого „Решение Государственной аттестационной комиссии". Бланки таких решений ориентированы на машинную обработку информации об аттестации. В случае аттестации продукции по высшей категории качества ей присваивается государственный Знак качества, и министерством, в состав которого входит предприятие-изготовитель, выдается этому предприятию свидетельство о присвоении его продукции государственного Знака качества. Решение Государственной комиссии о присвоении (или лишении) продукции Знака качества регистрируется Госстандартом СССР, решение об отнесении продукции к первой категории качества — министерством.

Для стимулирования производства продукции высшей категории качества используются дополнительная прибыль, полученная в результате надбавок к оптовой цене, фонды экономической стимуляции министерства.

Государственной аттестации конечной продукции должны предшест-

зовать *аттестация комплектующих изделий*, входящих в состав этой продукции, и *заводская аттестация*. Аттестоваться должны те комплектующие изделия, качество которых влияет на качество конечной продукции. В ряде случаев отраслевыми нормативно-техническими документами специально регламентируется процент (минимальный) комплектующих изделий, которые должны иметь государственный Знак качества. Так, например, электротехнической промышленности могут представляться на аттестацию щиты и пульты, в которых имеется не менее 70 % комплектуют ) изделий со Знаком качества.

Цель заводской аттестации — аттестовать узлы, блоки, детали, изготавливаемые заводом для комплектования конечной продукции (машин приборов, оборудования и т. п.). По аналогии с государственной аттестацией, когда изделию, отнесенному к высшей категории качества, одновременно присваивается Знак качества, узлу, блоку, детали, прошедших заводскую аттестацию, присваивается Аттестат качества. Естественно, что заводскую аттестацию проходят не все узлы, блоки и детали, а только тот из них, которые больше всего влияют на качество конечной продукции.

В связи с расширением внешнеторговых и экономических отношений стран, развитием науки и техники, постоянным усложнением продукции, трудностями определения ее потребительских свойств и характеристик выявилась необходимость проведения объективных испытаний изделий независимо как от изготовителя, так и от ее потребителя. Эти вопросы и призвана решить *сертификация* — действие, проводимое с целью подтверждения соответствия изделия или услуги определенным стандарта\* \_ или техническим условиям. Сертификация — это гарантия потребителя: в том, что продукция (товар) соответствует определенным требованиям к его качеству.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маликов М.Ф. Основы метрологии. — М.: "Комитет по делам мер и измерительных приборов, 1949.
2. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии: Учеб. пособие:- 3-е изд. перераб.-и доп. - М.: Изд-во стандартов, 1984.
3. Тюрин Н.И. Введение в метрологию: Учеб. пособие:- 3-е изд. перераб. и доп. -М.: Изд-во стандартов, 1985.
4. Карасев А.И. Основы математической статистики. - М.: Росвузиздат, 1962.
5. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. - М.: Наука, 1965.
6. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерность. - М.: Наука, 1977.
7. Долинский Е.Ф. Погрешности измерений и обработка результатов измерений. - М.: Машиностроение, 1967.
8. Долинский Е.Ф. Обработка результатов измерений. - М.: Изд-во стандартов, 1973.
9. Гарбеев Ю.В. Эталоны единиц основных физических величин: Учеб. пособие. -

Л.: СЗПИ, 1983.

10. Шишкин И.Ф. Качество и единство измерений: Учеб. пособие; - Л.: СЗПИ, 1982.

11. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учеб. пособие. - Л.: СЗПИ, 1983.

12. Шишкин И.Ф. Прикладная метрология: Учеб. пособие. - Л.: СЗПИ, 1985.

13. Спортивная метрология / Под ред. В.М. Зарицкого. - М.: Физкультура и спорт, 1982.

14. Метрологическое обеспечение производства: Конспект лекций / Под ред.

А.А. Тупиченкова. - М.: Изд-во стандартов, 1982.

15. Данильченко В.П., Егшин Р.А. Метрологическое обеспечение промышленного производства: Справочник - Киев: Техника, 1982.

16. Научно-методические основы метрологической экспертизы технической документации: Учеб. пособие / Под ред. В.Г. Цейтлина. - М.: ВИСМ, 1983.

17. Винник В.И., Артемьев В.Г. Метрологический надзор. - М.: Изд-во стандартов, 1980.

18. Артемьев В.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во стандартов, 1990.

19. Основопологающие стандарты в области метрологического обеспечения. - М.: Изд-во стандартов, 1986.

20. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. - М.: Изд-во стандартов, 1973.

21. Азгальдов Г.Г. Потребительская стоимость и ее измерение. - М.: Экономика, 1971.

22. Райхман Э.П., Азгальдов Г.Г. Экспертные методы в оценке качества товаров. - М.: Экономика, 1974.

23. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). - М.: Экономика, 1982.

24. Гличев А.З., Рабинович Г.О., Примаков М.И., Сеницын М.М. Прикладные вопросы квалиметрии. - М.: Изд-во стандартов, 1983.

25. Блюмберг В.А., Глушенко В.Ф. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов. - Л.: Лениздат, 1982.

26. Алексеев Г.А., Данилов А.А., Попов Ю.С. Основы стандартизации: Учеб. пособие. - Л.: СЗПИ, 1976.

27. Алексеев Г.А., Попов Ю.С. Стандартизация в промышленности: Учеб. пособие. - Л.: СЗПИ, 1980.

28. Алексеев Г.А., Попов Ю.С. Управление качеством продукции на базе стандартизации: Учеб. пособие. - Л.: СЗПИ, 1980.