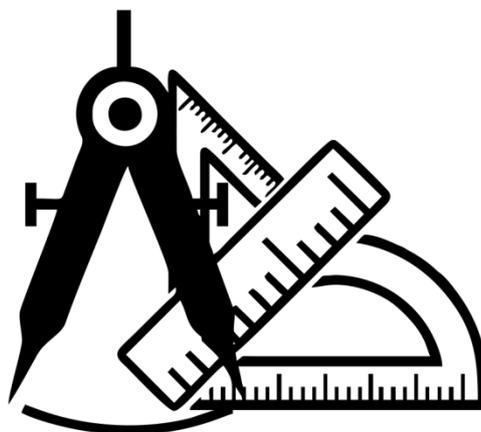


# СТАНДАРТИЗАЦИЯ И МЕТРОЛОГИЯ

учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2018

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Е.Л. Богданова, С.К. Лисин, К.А. Соловейчик,  
А.И. Федотов**

## **СТАНДАРТИЗАЦИЯ И МЕТРОЛОГИЯ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки (специальности)  
27.03.05 «Инноватика» в качестве учебно-методического пособия для ре-  
ализации основных профессиональных образовательных программ высшего  
образования бакалавриата

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2018**

Е.Л. Богданова, С.К. Лисин, К.А. Соловейчик, А.И. Федотов. Стандартизация и метрология : учебно-методическое пособие / Е.Л. Богданова, С.К. Лисин, К.А. Соловейчик, А.И. Федотов– СПб: Университет ИТМО, 2018. – 175 с.

Рецензенты: Тисенко В.Н, д.т.н., профессор, академик Санкт-Петербургской инженерной академии, профессор ФГАОУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Бунина Н.А. д.т.н., профессор Петербургской инженерной академии, профессор ФГБОУВО «Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д.Ф. Устинова»

Учебно-методическое пособие соответствует содержанию второго модуля структуры программы образовательного стандарта высшего образования Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по направлению подготовки 27.03.05 – Инноватика (уровень бакалавриата). В пособии рассмотрены основные аспекты инновационного менеджмента как целенаправленного процесса превращения идей в инновационный продукт, рассматриваются актуальные тенденции в сфере управления инновациями. Каждая глава сопровождается заданиями для самостоятельной подготовки.

Рекомендовано к печати УМС ИМБИП, протокол №. 6 от 19 января 2018 г.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

© Богданова Е.Л., Лисин С.К., Соловейчик К.А., Федотов А.И., 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
1. МЕТРОЛОГИЯ .....	6
1.1. Физические величины, методы и средства их измерений.....	6
1.1.1. Физические величины, размерности и измерительные шкалы.....	6
1.1.2. Определения и теоретические основы измерений .....	9
1.1.3. Международная система единиц физических величин.....	13
1.1.4. Виды и методы измерений, общие сведения о средствах измерений.....	15
1.2. Теоретические основы метрологии.....	19
1.2.1. Основы теории измерений, виды условий измерений.....	19
1.2.2. Основы теории средств измерений.....	42
1.2.3. Элементы допустимой погрешности измерительных механизмов.....	45
1.2.4. Теоретическая погрешность и элементы синтеза комбинированных рычажно-зубчатых механизмов.....	51
1.2.5. Оптимальное сочетание типовых рычажных передач в измерительных механизмах.....	55
1.2.6. Приведенные, относительные и абсолютные погрешностей.....	57
1.2.7. Классификация серийно выпускаемых и экспериментальных средств измерений.....	61
1.2.8. Однократное измерение.....	62
1.2.9. Многократное измерение.....	72
1.2.9.1. Модели выполнения измерительных процедур .....	72
1.2.9.2. Измерение с равноточным отсчетом.....	73
1.3. Обеспечение единства измерений.....	87
1.3.1. Единство измерений.....	87
1.3.2. Техническая основа обеспечения единства измерений.....	87
1.3.3. Нормативно-правовая основа обеспечения единства измерений.....	91
1.3.4. Организационная основа обеспечения единства измерений.....	92
2. МОДЕЛИ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ.....	95
2.1. Назначение и области применения.....	95
2.2. Преобразователи вибрационных перемещений.....	99
2.3. Основные элементы и узлы виброизмерительных приборов.....	104
2.4. Виды преобразователей измерения вибрационных перемещений.....	107
2.5. Выбор вибрационных измерительных преобразователей.....	116
2.6. Погрешности преобразователей.....	117
2.7. Приборы для регистрации и измерения параметров вибрации.....	119
2.8. Приборы и методы тарирования, записи и анализа колебаний.....	127
2.9. Приборы для искусственного создания колебаний (вибростенды).....	128
2.10. Приборы для анализа и записи колебательных процессов.....	133
2.11. Определение характеристик, представление и обработка экспериментальных данных.....	134
3. СТАНДАРТИЗАЦИЯ.....	137
3.1. Положения и принципы стандартизации.....	137
3.2. Направления стандартизации.....	140
3.2.1. Параметрическая стандартизация .....	140
3.2.2. Система предпочтительных чисел .....	141
3.2.3. Комплексная стандартизация .....	146
3.2.4. Опережающая стандартизация.....	147

3.3. Основные методы стандартизации.....	147
3.4. Стандартизация в Российской Федерации.....	151
3.5. Международная стандартизация.....	160
3.5.1. Международные организации по стандартизации .....	160
3.5.2. Международная организация по стандартизации (ИСО) .....	160
3.5.3. Международная организация по стандартизации в области электротехники и радиоэлектроники.....	161
3.6. Межгосударственная стандартизация.....	162
Заключение.....	164
Библиографический список.....	165
Глоссарий.....	166
Предметный указатель.....	169
Приложения .....	171

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с ужесточением требований к качеству и конкурентоспособности продукции на внешних и внутренних рынках существенным образом изменился формат требований и норм профессиональной подготовки инженеров.

Цель преподавания и усвоения дисциплины «Стандартизация и метрология» - подготовка будущих специалистов к решению технических, научных, организационных и правовых задач метрологии и стандартизации при проведении работ в области инженерных изысканий с использованием различных видов универсальных с цифровым отсчетом, электромеханических приборов и устройств, вычислительных комплексов и измерительных систем.

Задачей изучения дисциплины является получение студентами теоретических знаний и практических навыков по основным направлениям метрологии и стандартизации, которые позволят им в будущем обеспечить квалифицированное участие в многогранной деятельности инженера по обеспечению и улучшению качества методов и средств измерений.

Учебно-методическое пособие адресовано студентам, обучающимся по направлению подготовки бакалавриата 27.03.05 – «Инноватика». Материалы, представлены в пособии с учетом предъявляемых условий и требований нормативных положений к актуальности и новизне подготавливаемого научного труда.

Результаты исследований, приведенные в пособии, характеризуют правила и аналитические зависимости образования погрешностей измерений, которые устанавливаются с помощью расчетных значений стандартных неопределенностей, значений теоретической и систематической погрешностей средств измерений и их случайных составляющих. Используя расчетные значения теоретической и систематической погрешностей, а также используя априорную информацию проверок и приемочных испытаний данного класса приборов, представитель метрологической службы устанавливает предел допускаемой погрешности, фиксируемый в нормативно-технической документации. Особенность авторской концепции заключается в подготовке материалов для чтения лекций и проведения практических занятий с использованием результатов ранее выполненных исследований и научных работ, направленных на повышение точности измерений и эффективности применения методов общей теории измерений, средств измерений, методов и положений стандартизации. Научная и практическая полезность пособия заключается в образовании системы знаний о эффективных направлениях и методах метрологии и стандартизации, предназначенных для всеобщего экономического и технического развития.

# 1 МЕТРОЛОГИЯ

## 1.1 ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИХ ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1.1 Физические величины, размерности и измерительные шкалы

Базисное положение науки об измерениях определил основоположник отечественной метрологии Д.И. Менделеев. Теоремы, идеи и установленные теоретические закономерности Г. Галилея, Т. Кельвина, К. Гаусса, К. Пирсона, Б. Якоби, Г. Герца и др. составляют основу современной науки об измерениях физических величин. Окружающая нас действительность представлена объектами, свойствами и явлениями материального мира. Объектом материального мира, например, является пространство, а его свойством - протяжённость. Протяжённость может характеризоваться различными способами. Общепринятая или установленная законодательным путем характеристика (мера) различных свойств, общих в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении строго индивидуальная для них, называется физической величиной.

Исторически сложилось так, что меры физических величин уточняются по видам и способам их определения при безусловном повышении точности воспроизведения. Например, для определения меры длины Гюйгенс предложил аналитическую зависимость периода малых колебаний математического маятника

$$l = \frac{T^2 g}{4\pi^2}, \quad (1)$$

где  $l$  - длина маятника (расстояние от точки подвеса нерастяжимой невесомой нити до материальной точки),  $T$  - период колебаний маятника,  $g$  – ускорение свободного падения. Установленная Гюйгенсом зависимость является воплощением идеи представления длины, а также ускорения свободного падения через меру естественного времени.

С учетом опыта выполнения измерений общепринятой мерой протяженности является длина. Однако протяжённость реального физического пространства является сложным свойством, которое не может характеризоваться только длиной. Протяжённость пространства естественно рассматривать по нескольким направлениям (координатам): мера площади, объема, угла (плоского и телесного). Следовательно, пространство является многомерным. В соответствии со вторым законом Ньютона мерой инерции является масса. События и изменение свойств объектов в пространстве происходят не мгновенно, а имеют определенную длительность. Мерой длительности является время. Степень нагревания тел характеризуется термодинамической температурой. Мерой термодинамической температуры является средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул. Заметим, что термодинамическая температура относится к положительным величинам.

Наряду с перечисленными основными физическими величинами определены: мера силы электрического тока, мера количества вещества и мера силы света. К дополнительным физическим величинам относятся плоский и телесный углы. С помощью основных и дополнительных физических величин образуются производные физические величины. К производным физическим величинам можно отнести скорость, ускорение, силу, давление, работу, мощность и др.

К линейным измеряемым величинам относят размеры элементов деталей и сборочных единиц, перемещения или совокупность рассматриваемых величин. Аналоговые и дискретные сред-

ства измерений и контроля реализуют различные принципы и способы воспроизведения и преобразования электрических, электромеханических, механических измеряемых величин. Величина представляется как характерный признак явления, тела или вещества, который может выделяться качественно и определяться количественно.

В недавнем прошлом времени показателями качества измерений являлись точность, сходимость, правильность, воспроизведение искомых значений, которые не всегда достаточно объективно отражали количественные соотношения величин. Учитывая тот факт, что повторяемые и однократные опыты содержат случайную и систематическую погрешности появилась необходимость рассмотрения их статистических эквивалентов – вероятного или равновероятного. В 1981 году Международный комитет мер и весов (МКМВ) рекомендовал использовать повсеместно такой показатель качества, как неопределённость измерения (в различных его модификациях). В 1993 году Международная организация по стандартизации (ИСО) выпустила «Руководство по выражению неопределённости измерений», фактически придавшее рекомендации МКМВ силу международного стандарта.

Неопределённость измерения может быть следствием двух причин:

- 1 - рассеяния результата измерения при многократном повторении измерительной процедуры, что является объективным законом природы;
- 2 - отсутствия необходимой информации для определения интервала значений величины, что характерно не только для области измерений.

Соответственно существуют два способа количественной оценки неопределённости:

А - использование апостериорной (от латинского *a posteriori* - после опыта, в данном случае - после измерения) информации, полученной при многократном повторении измерительной процедуры;

В - математическое моделирование ситуации, состоящей в том, что отсутствует необходимая информация для записи результата измерения.

Таким образом, неопределённость является свойством, общим в качественном отношении для результатов измерений и различных ситуаций, но в количественном отношении индивидуальным в каждом конкретном случае. Поэтому она должна иметь общепринятую или установленную законодательным путём характеристику (меру). Рассмотрим оба способа количественной оценки неопределённости.

### Неопределенность А

Аналитическая форма представления неопределенности типа А обусловлена правилами анализа случайных величин, в данном случае правилами анализа результатов многократных измерений. Апостериорная информация в виде массива экспериментальных данных  $n$ , полученного при повторении процедуры измерения, представляется в виде гистограммы в координатах  $Q, p(Q)$ . По виду гистограммы можно установить закон распределения вероятности результата измерения.

Результаты многократных измерений используют не только для определения закона распределения вероятности, но и для определения неопределенности. В качестве меры неопределенности типа А принято использовать оценку среднего квадратичного отклонения – стандартное отклонение  $s_Q$  величины  $Q$ , определяемое из выражения

$$s_Q = \sqrt{\hat{Q}_n^2 - \hat{Q}_n^2} \quad (2)$$

Здесь  $\hat{Q}_n$  - среднее арифметическое значение результата измерения;

$\hat{Q}_n^2$  - среднее арифметическое значение квадратов результатов измерения величины  $Q$ .

Стандартное отклонение является мерой неопределенности, обусловленной рассеянием результата измерения, а способ «А» заключается в использовании математической статистики для количественной оценки этой неопределенности.

### Неопределенность В

В широком классе метрологических задач существует необходимость представления результата измерений величины в виде интервала её значений. Подобная ситуация возникает при дефиците информации о конкретных значениях величины в некотором интервале. Предположим, что значения измеряемой величины  $Q$  в интервале от  $Q_1$  до  $Q_2$  равновероятны и среди них нет доминантного значения. Такую ситуацию принято представлять моделью равномерного закона распределения вероятности величины  $Q$ . Данная математическая модель является аксиоматической идеализацией описания (представления) измеряемой случайной величины  $Q$  в интервале равновозможных значений. Однако такая идеализация позволяет получить количественную оценку неопределенности равномерно распределенной случайной величины в интервале. Мерой неопределенности принятой ситуационной модели считают аналог среднего квадратичного отклонения (не центрированного равномерного закона распределения), которое обозначают буквой  $u$  с индексом  $Q$

$$u_Q = \frac{Q_2 - Q_1}{2\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Вывод формулы меры неопределенности (2) для равномерного закона распределения будет приведен ниже. Аналог среднего квадратичного отклонения случайной величины, моделируемый «законом распределения её вероятности», является мерой неопределенности этой величины, а способ «В» позволяет использовать ситуационную модель для количественной оценки этой неопределенности.

Таким образом, мерой неопределенности служит среднее квадратичное отклонение, вместо которого на практике вычисляются либо его оценка - способом "А", либо его аналог - способом "В". В Руководстве ИСО используются термины "стандартная неопределенность типа "А" и стандартная неопределенность типа "В", или оценивание стандартной неопределенности по типу "А" и оценивание стандартной неопределенности по типу "В".

### Пример 1

Массив  $n$  измерений одной и той же величины постоянного размера двумя приборами характеризуется соответственно  $\hat{Q}_1, \hat{Q}_1^2$  и  $\hat{Q}_2, \hat{Q}_2^2$  расчетными значениями измеряемой величины  $Q$ .

Качество измерений первым и вторым прибором определяется при сопоставлении величин стандартной неопределенности типа А

$$S_Q = \sqrt{\hat{Q}_1^2 - \hat{Q}_2^2}. \quad (4)$$

### Пример 2

Пусть интервалы значений результатов однократного измерения величины  $Q$  равны  $Q_1 \leq Q_i \leq Q_2$  и  $Q_3 \leq Q_i \leq Q_4$ . Качество измерений в первом и во втором случае определяется

при сопоставлении величин стандартной неопределённости типа В (3).

### 1.1.2 Определения и теоретические основы измерений

В метрологии свойства (качество и количество) объектов являются предметами изучения и анализа с привлечением результатов опытов. Непосредственная оценка размеров и контроль отклонений сравнением с мерой связаны с необходимостью установления показателей качества и эффективности использования различных средств измерений. Методами таких исследований и оценки свойств объектов служат теоретические модели и экспериментальные наблюдения.

Количественная информация, характеризующая свойства объектов, фиксируется в измерительных системах или в других устройствах обработки и отображения информации о измеряемых величинах. При этом величина определяется как характерный признак явления, тела или вещества, который может выделяться качественно и определяться количественно. **Получение количественной информации о мерах свойств объектов и явлений окружающего мира опытным путём (экспериментально) называется измерением.**

В РМГ-29-99 определены нормируемые метрологические характеристики. Номинальный размер и допускаемые отклонения меры определяются в процессе проведения соответствующих видов измерений и контроля. Мерой считают средство измерений, используемое для воспроизведения установленного номинального размера с предписанными (расчетными) допускаемыми отклонениями.

В условиях проведения измерения, сопровождающегося влиянием множества случайных и неслучайных факторов, возможно лишь виртуальное приближение действительного размера к размеру меры, а степень этого приближения зависит от уровня точности (классов точности) методов и средств измерений и контроля. **Контроль – это определение с помощью средств измерений количественного соответствия объекта установленной норме (мере) в её единицах.**

В качестве **средств измерений и контроля** используются технические средства, базирующиеся на линейных и угловых единицах измерения и обладающие нормированными метрологическими характеристиками. Под **точностью средства измерений** понимают характеристику качества средства измерений, содержащую информацию о близости к нулю его погрешности. Считается, что понятие метрологической характеристики присуще главным образом средствам измерений. Метрологической характеристикой называется характеристика одного из свойств средств измерений, влияющая на результат измерений и его погрешность.

Универсальные средства линейных измерений и контроля имеют наиболее широкое применение в отраслях машиностроения, приборостроения, в сфере инновационных технологий, автоматизации измерений и метрологического обеспечения. Указанные средства измерений ориентированы, главным образом, на применение в условиях промышленных производств и характеризуются постоянно предъявляемыми к ним требованиями повышения точности и ресурса.

В имеющейся методической и в научно-исследовательской литературе ощущается необходимость рассмотрения ряда вопросов, касающихся исследования структурных моделей элементов измерительных механизмов и их влияния на показания приборов. При этом проблема создания новых или развития имеющихся технологических процессов и производств, обеспечивающих внедрение новой техники, увеличение производительности сборочных операций, достижение высокого качества и конкурентоспособности изделий вылилась в необходимость повышения уровня метрологических характеристик, быстродействия и производительности средств измерений и контроля линейных и других вели-

чин в технике.

Эффективное с точки зрения качества измерений применение приборов, механизмов и вспомогательных устройств определяется качеством отдельных их элементов, характеризующихся в большинстве случаев отклонениями размеров и отклонениями формы.

При контроле отклонений размеров неизбежно возникает необходимость установления допускаемой (основной допускаемой) погрешности различных средств измерений, в том числе, их теоретической и систематической составляющих, а также погрешностей, обусловленных учетом классов точности. При этом необходимо отметить, что погрешность показаний измерений будет уточняться с помощью априорных и вероятных характеристик (доверительная вероятность, уровень доверия).

Абсолютным называется прямое измерение размера величины в её единицах. Относительным называется измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за единицу.

При косвенных измерениях неизвестную величину находят из известной зависимости от величин, получаемых прямыми измерениями (например, определение плотности тела с использованием его массы и объёма). Косвенными измерениями считают измерения, при которых размер неизвестной величины определяют с помощью измерений и вычислений других величин, связанных с неизвестной величиной определенной аналитической зависимостью.

Совокупность методов измерений и контроля в известной мере обусловлена измеряемой величиной, видом относительного взаимодействия и свойствами системы изделие – оператор. Под свойствами системы изделие – оператор понимают геометрические и физико-механические параметры, характеризующие методы и средства измерений.

На основе анализа перечисленных параметров и условий получения количественной информации выбираются контактные, бесконтактные, вибрационные и другие методы измерений.

От обоснованной организации измерений, обеспечивающих достижение требуемых значений отклонений, зависит достоверность результатов оценки свойств объектов. Исследования метрологии, касающиеся изучения, создания и совершенствования различных методов и средств измерения физических величин, представляют собой теоретическую основу измерений и контроля.

Измерения и контроль величин – область метрологии, в которую входят теория и практика измерений размеров машин и приборов, предусматривающих использование линейных и угловых единиц измерения. Измерения имеют большое значение для прогресса естественных и технических наук, так как повышение точности измерений – условие совершенствования способов познания и практического применения знаний. Измерения применяются для управления научными экспериментами, для управления движением различных видов транспорта, для диагностики заболеваний, для контроля загрязнённости окружающей среды и др.

Если количественная информация, получается аналитическим путём, т. е. посредством вычислений и расчётов, то такая информация называется измерительной. При получении измерительной информации должны соблюдаться определённые правила и нормы, устанавливаемые законодательным путём. Всё это составляет предмет науки об измерениях, которая называется метрологией (перевод с древнегреческого *μετρον* - мера и *λογος* - речь, слово, учение или наука). Роль и положение этой науки определил основоположник отечественной метрологии Д.И. Менделеев в словах: "... наука начинается ... с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры". Ему принадлежит и другое важное замечание: "В природе мера и вес суть главные орудия познания".

## Качественная характеристика измеряемых величин

Формализованным (установленным) отражением качественного различия между измеряемыми физическими величинами служит их размерность. Размерность обозначается символом  $\dim$  как сокращение слова *dimension*, которое в зависимости от контекста переводится – как размер или как размерность.

Размерности основных физических величин обозначаются соответствующими заглавными буквами:

- $\dim l = L$  – размерность длины;
- $\dim m = M$  – размерность массы;
- $\dim t = T$  – размерность времени;
- $\dim i = I$  – размерность силы электрического тока;
- $\dim \theta = \Theta$  – размерность термодинамической температуры;
- $\dim n = N$  – размерность количества вещества;
- $\dim j = J$  – размерность силы света.

При определении размерности производных физических величин руководствуются следующими правилами:

1 - размерности уравнений и систем уравнений должны быть одинаковыми.

2 - алгебра размерностей мультипликативная, т. е. состоит из одного единственного действия – умножения.

2.1. - размерность произведения  $Q = AB$  равна произведению размерностей  $\dim Q = \dim A \dim B$ .

2.2. - размерность частного  $Q = A / B$  равна отношению размерностей  $\dim Q = \dim A / \dim B$ .

2.3. - размерность величины в степени  $Q = A^n$  равна размерности этой величины в той же степени  $\dim Q = (\dim A)^n$ .

Таким образом, размерности производных физических величин определяются через размерности основных физических величин из соотношения

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

где  $L, M, T, \dots$  – размерности основных физических величин;

$\alpha, \beta, \gamma, \dots$  – показатели размерности (положительные, отрицательные, дробные, целые, нуль).

Примеры размерностей:

- размерность скорости равномерного и прямолинейного движения

$$V = \frac{S}{t}, \dim V = LT^{-1}; \quad (5)$$

- размерность силы по второму закону Ньютона

$$F = ma, \dim F = MLT^{-2}; \quad (6)$$

- размерность уравнения вынужденных колебаний материальной точки относительно положения статического равновесия без учета демпфирования

$$\ddot{x} + k^2 x = h \cos \omega t, \quad (7)$$

иначе

$$\frac{m}{c^2} + \frac{m}{c^2} = \frac{kz \cdot m}{kz \cdot c^2} \cos \omega t. \quad (8)$$

С учетом принятых обозначений данными примерами подтверждаются свойства размерностей уравнений

$$L \cdot T^{-2} + L \cdot T^{-2} = L \cdot T^{-2} \cos \omega t. \quad (9)$$

Здесь размерность функции фазового угла соответствует радианной мере.

Величина называется безразмерной, если показатели многочлена размерностей равны нулю. Размерность может быть относительной (в относительных единицах), определяемой как отношение одноимённых величин с равными показателями размерностей (например, логарифм отношения шумов, напряжений, мощностей и др.).

Итак, размерность является качественной характеристикой измеряемой величины. Она отражает её связь с основными физическими величинами и зависит от их выбора.

### Количественная характеристика измеряемых величин

В количественном отношении физическая величина характеризуется её размером. Размер является объективной количественной характеристикой, не зависящей от выбора единиц измерений - 1 мкм,  $10^{-3}$ мм,  $10^{-6}$ м. Даны три варианта обозначения одного размера, являющегося значением основной физической величины – длины в различных единицах измерений.

В идеальном варианте значение физической величины  $Q$  можно представить в виде произведения

$$Q = q[Q], \quad (10)$$

где  $q$  – числовое значение отсчетного устройства;  $[Q]$  – размер единицы измерения средства измерений. Таким образом, мы удостоверились, что значение, как и сам размер величины, не зависят от выбора единиц измерений. Для одного размера числовое значение тем меньше, чем больше единица измерения и наоборот.

### Измерительные шкалы

В метрологии и в практике измерений понятие о измерительных шкалах является достаточно распространенным относительно видов и целей их применения. Приборы механического и электромеханического типа, главным образом, оснащаются равномерными, неравномерными аналоговыми шкалами и цифровыми индикаторами. В данном параграфе мы будем рассматривать измерительные и оценочные шкалы в плане способов представления информации о размере величин. Для представления информации о свойствах объектов и процессов по типу ранжирования или в количественной форме используются шкала порядка, шкала интервалов и шкала отношений. Известно, что количественную информацию о свойствах физических величин  $Q_i$  и  $Q_j$  получают сравнением. Приведенные измерительные шкалы реализуют три способа:

$$Q_i \text{ меньше...или...больше } Q_j; \quad (11)$$

$$Q_i - Q_j = \Delta Q_{ij}; \quad (12)$$

$$\frac{Q_i}{Q_j} = x_{ij}. \quad (13)$$

Способ представления размеров (4) не позволяет получить количественные соотношения между величинами. Экспериментальное решение неравенства позволяет ответить на вопрос, какой из двух размеров ( $Q_i$ -й или  $Q_j$ -й) больше или меньше другого (либо они

равны). Результат такого сравнения можно представить на шкале порядка, где размеры расположены в порядке их возрастания. Ответить на вопросы на сколько, или во сколько раз один размер больше другого по шкале порядка нельзя. Это наименее информативная шкала, однако, на практике она находит достаточно широкое применение. По шкале порядка измеряются, например, сила морского волнения, сила ветра, сила землетрясений, твердость минералов, знания учащихся.

В результате сравнения двух размеров способом (5) можно определить размер, который больше или меньше другого (в частном случае они могут оказаться равными). Результат такого сравнения может быть представлен на более информативной шкале интервалов. По ней измеряются, например, время, температура, глубины, высоты, расстояния. Нуль шкалы интервалов устанавливается исследователем, что обеспечивает выполнение действий сложения и вычитания (разность или сумма интервалов времени, температур, расстояний и др.).

Самой совершенной измерительной шкалой является шкала отношений. На ней откладываются результаты сравнения размеров способом (6). Это самая распространенная измерительная шкала. По ней можно сказать, во сколько раз  $Q_i$ -й размер больше или меньше  $Q_j$ -го. Естественно, что при измерениях по шкале отношений в качестве  $Q_j$ -го размера, используемого для сравнения, целесообразно выбрать  $[Q]$  - размер единицы измерения.

Однако если допустить произвол в выборе единиц, то результаты различных измерений одного и того же размера (числовые значения) окажутся несопоставимы между собой, что может привести к нарушению единства измерений. Чтобы этого не произошло, единицы измерений устанавливаются по определенным правилам и закрепляются законодательным путём. Это относится и к случаям взаимодействия единиц величин системы СИ и единиц величин, разрешенных к применению при измерениях.

### 1.1.3 Международная система единиц физических величин

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ) приняла Международную систему единиц физических величин, получившую у нас в стране сокращенное обозначение СИ (от Systeme International, полное название Le Systeme International d'Unites). Последующими Генеральными конференциями по мерам и весам в первоначальный вариант СИ внесены некоторые изменения, В СНГ и странах Восточной Европы Международная система единиц является обязательной с 1 января 1980 г.

Основные единицы СИ приведены в табл.1.

Таблица 1

Наименование	Размерность	Наименование ед. изм.	Обозначение	
			Международное	Русское
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила эл. тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К

Наименование	Размерность	Наименование ед. изм.	Обозначение	
			Международное	Русское
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд

Дополнительные единицы физических величин:

- радиан (rad, рад) - единица плоского угла, равная внутреннему углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу;
- стерadian (sr, ср) - единица телесного угла, равная телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности этой сферы площадь, равную площади квадрата со стороной радиуса сферы.

Последующими постановлениями Генеральных конференций по мерам и весам в первоначальный вариант СИ внесены некоторые изменения. В странах СНГ и странах Восточной Европы Международная система единиц СИ также является обязательной для применения с 1 января 1980 г.

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

$$[Q] = \text{м}^{\alpha} \cdot \text{кг}^{\beta} \cdot \text{с}^{\gamma} \dots \quad (14)$$

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

Приставки системы единиц СИ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Приставки СИ	Наименование		Обозначение	
	Русское	Межд.	Русское	Межд.
$10^{15}$ .....	пета	peta	П	P
$10^{12}$ .....	тера	tera	Т	T
$10^9$ .....	гига	giga	Г	G
$10^6$ .....	мега	mega	М	M
$10^3$ .....	кило	kilo	к	k
$10^2$ .....	гекто	hecto	г	h
$10^1$ .....	дека	deca	да	da
$10^{-1}$ .....	деци	deci	д	d
$10^{-2}$ .....	санти	centi	с	c
$10^{-3}$ .....	милли	milli	м	m

Приставки СИ	Наименование		Обозначение	
	Русское	Межд.	Русское	Межд.
$10^{-6}$ .....	микро	micro	мк	μ
$10^{-9}$ .....	нано	nano	н	n
$10^{-12}$ .....	пико	pico	п	p
$10^{-15}$ .....	фемто	femto	ф	f

Десятичные кратные и дольные единицы образуются с помощью множителей и приставок. К наименованию единицы допускается присоединять только одну приставку (например, пикофарада, а не микропикофарада). 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  $L = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 75 \text{ мкм} = 0,075 \text{ мм} = 75000 \text{ нм}$  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).

#### 1.1.4 Виды и методы измерений, общие сведения о средствах измерений

Экспериментальное сравнение размеров одноименных физических величин является единственным методом измерений. На практике встречается множество его разновидностей, среди которых можно выделить:

**Метод непосредственной оценки**, при котором измеряемый размер сравнивается с информацией о размере единицы, хранящейся в измерительном приборе прямого действия, и результат сравнения определяется непосредственно по отсчетному устройству прибора (по циферблату часов, по шкалам термометра или барометра и т. п.).

**Метод сравнения с мерой**, при котором измеряемый размер (например, массу груза) сравнивают с размером, воспроизводимым вещественной мерой (гирей).

**Метод замещения** - разновидность метода сравнения с мерой, при котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой (взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы груза и гирь на одну и ту же чашу весов).

**Нулевой метод** - метод сравнения с мерой, при котором измеряемый размер сравнивается с известным, причем измеряемый размер подбирается таким образом, чтобы он равнялся известному, соответствующему нулю. Иначе говоря, разность между размерами, фиксируемая нулевым указателем, равнялась бы нулю.

**Метод совпадений** - метод сравнения с мерой, при котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой вещественной мерой, измеряется по совпадению отметок шкал или периодических сигналов. Метод совпадений используется

при измерениях с помощью штангенциркуля; в приборах, основанных на измерении частоты биений; в стробоскопах; интерферометрах и других приборах.

Важно подчеркнуть, что любая из разновидностей метода измерений предполагает экспериментальное сравнение неизвестного размера с известным размером и выражение первого через второй в кратном или в дольном отношении. Но получение количественной информации о свойствах объектов и явлений окружающего мира может осуществляться не только опытным путем (т. е. посредством измерений), но и с помощью теоретических расчётов. Последние не являются измерениями, и, следовательно, вычисление значения  $Q$  по формуле

$$Q = f(A, B), \quad (15)$$

где  $A$  и  $B$  – некоторые результаты измерений, к измерениям не относятся. Между тем за этим математическим действием закрепилось название косвенного измерения в отличие от прямых измерений, при которых значения  $A$  и  $B$  получают непосредственно от средств измерений. Определение отклонений и погрешностей косвенных измерений является более сложной задачей. Считается, что подобные задачи решаются с помощью теории переноса ошибок. При этом погрешности отдельных параметров интегрированы в общую погрешность косвенных измерений. Размерности косвенных погрешностей существенным образом отличаются от исходных размерностей прямых измерений.

По условию эксперимента измеряемую величину  $u$  представим функциональной зависимостью от переменных величин  $v, y, z$ , определяемых прямыми измерениями

$$u = f(v, y, \dots, z, \dots) \quad (16)$$

Оценки косвенных измерений связаны с окончательными результатами прямых измерений

$$\bar{V} \pm s_v, \bar{Y} \pm s_y, \dots, \bar{Z} \pm s_z, \dots \quad (17)$$

Если рассматриваются измерения статистически независимых величин, что соответствует выполнению условий:

- погрешности измерения величин  $v, y, \dots, z, \dots$  носят только случайный характер и соответствуют нормальному закону распределения;
- погрешность каждого отдельно взятого прямого измерения не подвержена воздействию случайных факторов, вызывающих погрешности других прямых измерений, выполненных в эксперименте.

При выполнении указанных условий оценку среднего значения величины  $u$  определяют, принимая во внимание оценки средних значений величин  $v, y, \dots, z, \dots$

Если точность прямых измерений достаточно высока, т.е. в интервалах, определяемых (8) функцию (7) можно считать линейной по своим аргументам, то погрешности результатов прямых измерений переносятся на результат косвенного измерения как независимые нормальные распределения  $u$  вокруг  $\bar{u}$  по каждому из аргументов функции (7). Например, погрешность измерения  $u$ , обусловленная только погрешностью измерения величины  $v$  равна

$$s_{u_v} = \left. \frac{\partial f}{\partial v} \right|_{v=\bar{v}} s_v. \quad (18)$$

Поскольку измерения величин  $v, y, z, \dots$  статистически независимы, дисперсия их совместного распределения равна сумме их дисперсий, что строго доказано в математиче-

ской статистике. Тогда среднее квадратичное отклонение совместного распределения, вычисляемое как корень из дисперсии, определяется из выражения

$$su = \sqrt{su_v^2 + su_y^2 + su_z^2 + \dots} \quad (19)$$

Выражение (10) является универсальным и может быть использовано для определения среднего квадратичного отклонения косвенного измерения величины  $u$  относительно  $\bar{u}$  при произвольной структуре аргументов функции  $f(v, y, z, \dots)$ .

Для статистически независимых измерений правила переноса отклонений прямых измерений на совместный результат формулируются в виде:

- при определении погрешности суммы или разности случайных величин складываются квадратично абсолютные отклонения;
- при определении погрешности произведения или частного случайных величин складываются квадратично относительные отклонения.

В ряде случаев неизвестные значения размеров величин связаны с известными размерами системой линейных или нелинейных алгебраических уравнений. Неизвестные значения размеров определяют аналитическим путем. На практике укоренилось представление еще о таких видах измерений как совокупные и совместные. Совокупные «измерения» характерны тем, что неизвестные значения размеров определяют из системы уравнений одноименных величин.

### Пример 3

Набор песочных часов для отсчета промежутка времени состоит из приборов №1, №2, и №3. Путем прямого измерения установлено время измерения прибора №3 равное 15 мин. Неизвестные времена измерения (показания) приборов обозначим через  $X$  и  $Y$ , которые подчиняются системе уравнений:

$$2X = Y; \quad (20)$$

$$X + Y = 15. \quad (21)$$

Из решений системы уравнений следует, что времена измерения приборов №1 и №2 соответственно равны 5 мин и 10 мин. Совместные измерения характеризуются тем, что неизвестные размеры определяются из решений систем уравнений, содержащих не одноименные величины.

Технические средства, используемые при измерениях и обладающие нормированными метрологическими характеристиками, называются средствами измерений. К таким средствам измерений относятся вещественные меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и измерительные системы.

Вещественные меры предназначены для воспроизведения физической величины заданного размера, который характеризуется его номинальным значением. При условии, что указывается точность, с которой воспроизводится номинальное значение измеряемой величины. Например, резистор является мерой электрического сопротивления, конденсатор — мерой емкости, гиря является мерой массы, кварцевый генератор — мерой частоты электрических колебаний. Вещественные меры по количеству воспроизводимых номинальных размеров делятся на однозначные и многозначные. Гиря и измерительный резистор постоянного сопротивления — это однозначные меры, измерительная линейка и конденсатор переменной емкости — многозначные меры. Измерения методом сравнения с мерой выполняют с помощью специальных измерительных приборов, которые также на-

зываются приборами для относительных измерений (контроля). Измерения методом непосредственной оценки часто называют абсолютными измерениями.

**Измерительные преобразователи** — это средства измерений, перерабатывающие измерительную информацию в форму ЦАП или АЦП, удобную для дальнейшего преобразования, передачи, хранения, обработки, но недоступную для непосредственного наблюдения показаний оператором. Измерительные преобразователи получили широкое распространение в цепях измерения и управления. К ним относятся измерительные усилители, преобразователи давления, термопары, вибрационно-контактные преобразователи, индуктивные и другие виды измерительных устройств. По месту, занимаемому в измерительной цепи, они делятся на первичные, промежуточные и комбинированные. Конструктивно преобразователи являются либо отдельными блоками, либо составной частью средства измерений, например, являются элементом отсчетного устройства. Если преобразовательные устройства не входят в измерительную цепь и их метрологические характеристики не нормированы, то они не относятся к измерительным преобразователям. К таким устройствам можно отнести силовой трансформатор, операционный усилитель, делитель напряжения в цепи электропитания и др.

**Измерительный прибор** предназначен для определения значения измеряемой величины и представляет собой совокупность преобразовательных элементов, образующих измерительную цепь, и аналоговое или цифровое отсчетное устройство. В отличие от вещественной меры, прибор воспроизводит известное значение физической величины в форму удобную для наблюдения и регистрации.

**Измерительные установки** состоят из функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, собранных в одном месте. **В измерительных системах** эти средства, ЭВМ-комплексы и вспомогательные устройства территориально разбросаны и соединены каналами связи. И в установках, и в системах измерительная информация может быть представлена в форме, удобной для непосредственного восприятия и для автоматической обработки, передачи и управления оборудованием, машинами и энергоблоками.

## 1.2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

### 1.2.1 Основы теории измерений, виды условий измерений

Влияние климатических (температуры окружающей среды, относительной влажности воздуха, атмосферного давления), электрических и магнитных колебаний, колебаний частоты переменного электрического тока, постоянных и переменных магнитных полей, механических и акустических (вибраций, ударных нагрузок, сотрясений) факторов, а также ионизирующих излучений, газового состава атмосферы принято относить к условиям измерений. Если их влиянием на результат измерения можно пренебречь, то такие условия измерений называются нормальными. Им соответствуют номинальные значения влияющих физических величин, главные из которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Влияющая величина	Номинальное значение
Температура для всех видов измерений	20°C (293 К)
Атмосферное давление при измерениях ионизирующих излучений; теплофизических, температурных, магнитных, электрических измерениях; измерениях давления и параметров движения	100 кПа (750 мм рт. ст.)
То же при линейных, угловых измерениях; измерениях массы, силы света; измерениях в спектроскопии и других областях, кроме перечисленных в предыдущем пункте	101,3 кПа (760 мм рт. ст.)
Относительная влажность воздуха при линейных, угловых измерениях; измерениях массы, измерениях в спектроскопии	58%
То же при измерении электрического сопротивления	55%
То же при измерениях температуры, силы, твёрдости, переменного электрического тока, ионизирующих излучений, параметров движения	65%
То же при остальных видах измерений	60%
Плотность воздуха	1,2 кг/м <sup>3</sup>
Ускорение при свободном падении	9,8 м/с <sup>2</sup>
Магнитная индукция (напряжённость магнитного поля) и напряжённость электрического поля при измерениях параметров движения, магнитных и электрических величин	0

На практике обеспечить номинальные значения влияющих величин бывает довольно трудно. Поэтому обычно устанавливают пределы нормальной области значений влияющих величин, в границах которой влиянием их на результат измерения можно пренебречь. Так, например, во многих случаях нормальными условиями измерений считаются:

Температура	$(293 \pm 5) \text{ K};$
атмосферное давление	$(100 \pm 4) \text{ кПа};$
относительная влажность	$(65 + 15)\%;$
напряжение в электрической сети	$(220 \pm 22) \text{ В}$

Если измерения выполняются за пределами этих значений влияющих величин, то считается, что они выполняются в рабочих условиях. В этом случае заранее должны быть известны поправки, с помощью которых будет учитываться влияние на результаты измерений условий, в которых они будут проводиться.

#### Пример 4

Измерения линейкой из тугоплавкого сплава будут проводиться при температуре, превышающей номинальную на 1000 К. Какой будет в этом случае температурная поправка?

*Решение.* Зависимость длины линейки от температуры имеет вид

$$L=L_n [1+a(t - t_n)], \quad (22)$$

где  $L_n$  и  $t_n$  - длина линейки и температура, соответствующие нормальным условиям, а - коэффициент линейного расширения материала, из которого изготовлена линейка. Поэтому результаты измерений всех линейных размеров окажутся заниженными в  $(1+1000a)$  раз (так называемая мультипликативная поправка, или поправочный множитель).

#### Основное уравнение измерения

Измерение состоит в сравнении неизвестного размера  $Q$  с известным размером (в качестве которого обычно выступает размер единицы измерения  $[Q]$ ) и выражение первого через второй в кратном или дольном отношении. Согласно выражению (3) это должно было бы дать числовое значение

$$q = Q/[Q],$$

показывающее во сколько раз измеряемый размер больше или меньше размера единицы измерения. Однако на практике измерение всегда выполняется в условиях влияния множества факторов, точный учет которых невозможен, а результат непредсказуем. Обозначив влияние этих факторов случайным слагаемым  $\eta$ , получим

$$Q/[Q] = q + \eta = x. \quad (23)$$

Этим реальная измерительная процедура отличается от её теоретической модели (22). Результат экспериментального сравнения неизвестного размера  $Q$  с узаконенной единицей измерения  $[Q]$  (он называется отсчётом) не только не равен неслучайному числовому значению измеряемой величины  $q$ , но имеет совершенно иную физическую природу. Это безразмерное случайное число  $x$ , подчиняющееся тому или иному закону распределения вероятности.

Выражение

$$Q/[Q] = x \quad (24)$$

называется основным уравнением измерения.

Отсчётные устройства большинства средств измерений проградуированы не в безразмерных числовых значениях  $q$ , а непосредственно в значениях измеряемой величины  $Q$ . Отклик таких средств измерений на входное воздействие называется показанием

$$X = x[Q], \quad (25)$$

которое отличается от неслучайного значения  $Q$  физической величины (3) тем, что является случайной величиной, подчиняющейся тому же закону распределения вероятности, что и отсчёт, но имеющей размерность, совпадающую с размерностью измеряемой величины.

В показаниях средств измерений могут вноситься поправки, учитывающие влияние тех или иных факторов. В таких случаях только после внесения в показание поправки можно говорить о получении результата измерения. При мультипликативной поправке, называемой поправочным множителем, результат измерения

$$Q = \theta X; \quad (26)$$

в случае внесения аддитивной поправки  $\theta$

$$Q = X + \theta. \quad (27)$$

И в том, и в другом случаях результат измерения остаётся случайным.

### **Формы представления результата измерения** **Цифровые измерительные приборы**

У цифровых измерительных приборов значения отсчета строго фиксированы и промежуточных быть не может. Поэтому отсчет у них подчиняется дискретному закону распределения вероятности.

Эмпирические законы распределения вероятности отличаются от теоретических тем, что являются случайными функциями. Роль вероятности  $P(x_i)$  в эмпирических законах играет доля значений  $x_i$  в общем объёме экспериментальных данных.

#### **Пример 5**

Массив экспериментальных данных, полученных с помощью цифрового измерительного прибора, представлен в табл. 4. Каждое  $x_i$  -е число повторяется  $m$  раз. Что представляет собой отсчёт при таком измерении?

Таблица 4

$i, j$	$x_i$	$m_i$	$P(x_i)$	$F(x_j)$
1	90,10	1	$1/100 = 0,01$	0,01

i, j	$x_i$	$m_i$	$P(x_i)$	$F(x_j)$
2	90,11	2	$2/100 = 0,02$	$0,01 + 0,02 = 0,03$
3	90,12	5	$5/100 = 0,05$	$0,03 + 0,05 = 0,08$
4	90,13	10	$10/100 = 0,10$	$0,08 + 0,10 = 0,18$
5	90,14	20	$20/100 = 0,20$	$0,18 + 0,20 = 0,38$
6	90,15	24	$24/100 = 0,24$	$0,38 + 0,24 = 0,62$
7	90,16	19	$19/100 = 0,19$	$0,62 + 0,19 = 0,81$
8	90,17	11	$11/100 = 0,11$	$0,81 + 0,11 = 0,92$
9	90,18	5	$5/100 = 0,05$	$0,92 + 0,05 = 0,97$
10	90,19	2	$2/100 = 0,02$	$0,97 + 0,02 = 0,99$
11	90,20	1	$1/100 = 0,01$	$0,99 + 0,01 = 1,00$

**Решение.** Отсчёт представлен множеством своих случайных значений, содержащихся во второй графе табл. 4. Частость (эмпирическая вероятность  $P(x_i) = m_i / n$ ) каждого значения приведена в четвёртой графе. В совокупности эти две графы дают эмпирическое распределение вероятности отсчёта, показанное на рис. 1. Функция эмпирического распределения вероятности отсчёта

$$F(x_j) = \sum_{i=0}^j P(x_i), \quad (28)$$

устанавливающая совокупную вероятность всех  $x_i \leq x_j$ , представлена данными в последнем столбце таблицы. Графически она построена на рис. 2.

Массив экспериментальных данных, эмпирическое распределение вероятности  $P(x_i)$  и функция эмпирического распределения вероятности  $F(x_j)$  являются наиболее полными и исчерпывающими способами описания отсчёта у цифровых измерительных приборов любой конструкции.

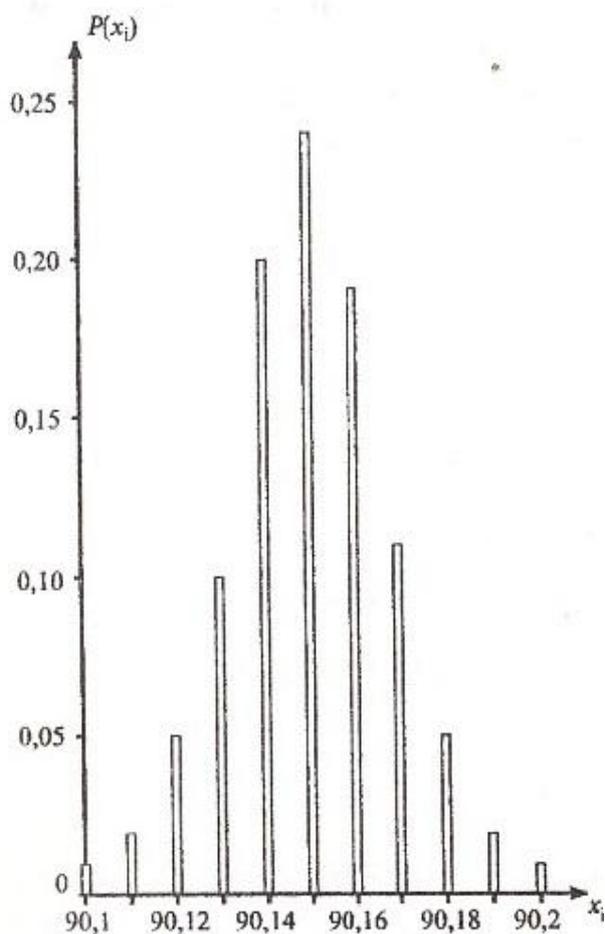


Рис. 1. Распределение вероятности отсчёта у цифрового измерительного прибора

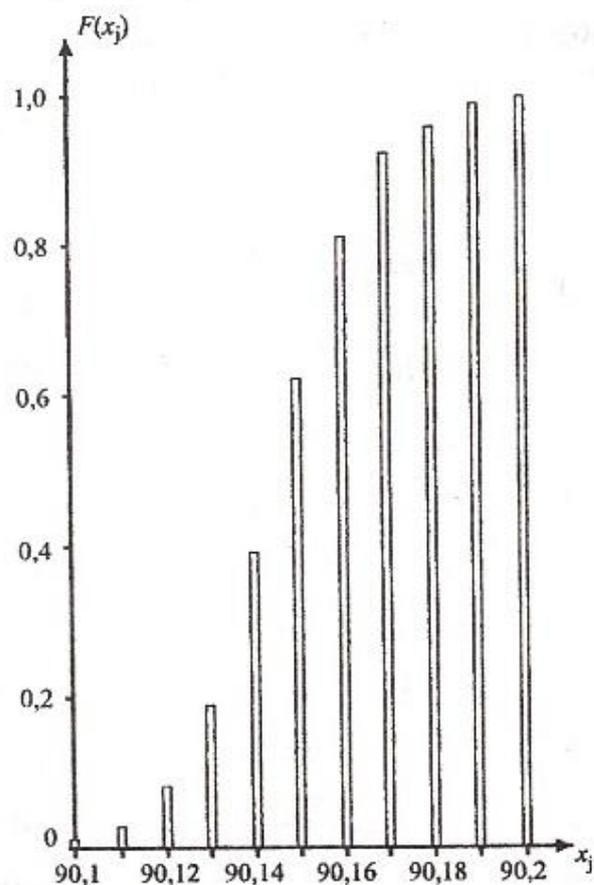


Рис. 2. Функция распределения вероятности отсчёта у цифрового измерительного прибора

### Аналоговые измерительные приборы

У аналоговых измерительных приборов отсчёт  $x$  подчиняется непрерывному закону распределения вероятности. Эмпирические законы распределения вероятности и в этом случае отличаются от теоретических тем, что являются случайными функциями. Измерительная информация содержится не в распределении вероятности дискретных значений отсчёта  $x_i$ , а в плотности вероятности текущих значений  $x$ .

#### Пример 6

Массив экспериментальных данных, полученных с помощью аналогового измерительного прибора, представлен в табл. 5. При  $n$ -кратном независимом друг от друга повторении измерительной процедуры указатель отсчётного устройства  $m_i$  раз останавливался в каждом из делений шкалы, приведённых во второй графе табл. 5. Что представляет собой отсчёт при таком измерении?

j, k	Деление шкалы	$m_j$	$p_j(x)$	$F_k(x)$
1	0,10... 0,11	1	$1/100 = 0,01$	0,01
2	0,11 ...0,12	2	$2/100 = 0,02$	$0,01+0,02 = 0,03$
3	0,12... 0,13	6	$6/100 = 0,06$	$0,03 + 0,06 = 0,09$
4	0,13 ... 0,14	11	$11/100 = 0,11$	$0,09 + 0,11 = 0,20$
5	0,14... 0,15	19	$19/100 = 0,19$	$0,20 + 0,19 = 0,39$
6	0,15 ...0,16	23	$23/100 = 0,23$	$0,39 + 0,23 = 0,62$
7	0,16 ...0,17	20	$20/100 = 0,20$	$0,62 + 0,20 = 0,82$
8	0,17... 0,18	10	$10/100 = 0,10$	$0,82 + 0,10 = 0,92$
9	0,18... 0,19	5	$5/100 = 0,05$	$0,92 + 0,05 = 0,97$
10	0,19... 0,20	3	$3/100 = 0,03$	$0,97 + 0,03 = 1,00$

**Решение.** Отсчёт представлен множеством своих случайных значений, сгруппированных в  $k = 10$  интервалах. Построив на каждом  $j$ -м интервале  $\Delta x$  прямоугольник, площадь которого равна частоте  $m_j/n$  (эмпирической вероятности) попадания случайного значения отсчёта в этот интервал, получим гистограмму (эмпирическую плотность вероятности  $p_j(x) = m_j/n\Delta x$ ), показанную на рис. 3. Функция эмпирического распределения вероятности  $F_k(x) = \sum_{j=0}^k p_j(x)$ , устанавливающая совокупную вероятность отсчёта  $x$  во всех интервалах  $j \leq k$ , показана на рис. 4.

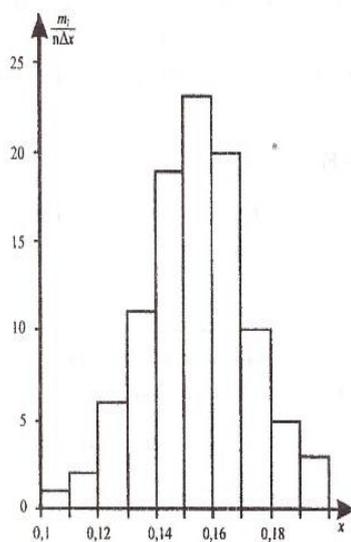


Рис. 3. Гистограмма плотности вероятности отсчёта у аналогового измерительного прибора

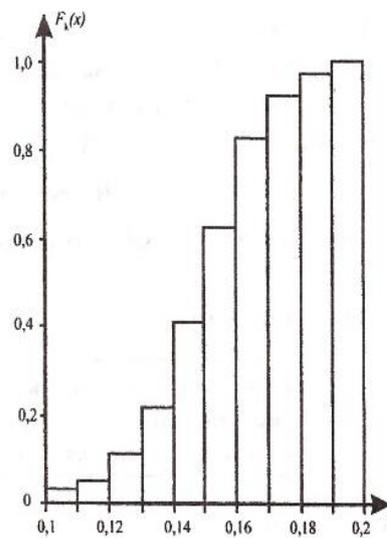


Рис. 4. Функция распределения вероятности отсчёта у аналогового измерительного прибора

Массив экспериментальных данных, плотность эмпирического распределения вероятности (гистограмма)  $p_i(x)$  и функция эмпирического распределения вероятности  $F_k(x)$  являются наиболее полными и исчерпывающими способами описания отсчёта у аналоговых измерительных приборов любой конструкции.

При  $n \rightarrow \infty, k \rightarrow \infty$  и  $\Delta x \rightarrow 0$  гистограмма  $p_j(x)$  переходит в кривую плотности теоретического закона распределения вероятности  $p(x)$ , а  $F_k(x)$  - в кривую функции теоретического закона распределения вероятности  $F(x)$ .

### Необходимые сведения из теории вероятности

1. Функция распределения вероятности  $F(x)$  определяет вероятность того, что случайная переменная  $x$  примет значение, меньшее аргумента этой функции (или равное ему).

2. Так как вероятность не может быть отрицательной, то

$$F(x) \geq 0. \quad (29)$$

Чем больше  $x$ , тем больше вероятность того, что это значение не может быть превышено. Следовательно,  $F(x)$  - неубывающая функция:

$$F(x_2) \geq F(x_1), \text{ если } x_2 \geq x_1. \quad (30)$$

В интервале значений  $-\infty \leq x \leq +\infty$  функция распределения вероятности  $F(x)$  принимает значения от 0 до 1.

3. Вероятность всех значений текущей переменной  $x$ , меньших или равных  $x_2$ , составляет  $F(x_2)$ , а меньших или равных  $x_1$  - равна  $F(x_1)$ . Поэтому вероятность значений, лежащих внутри интервала  $[x_1; x_2]$ , равна разности значений  $F(x)$  на границах этого интервала:

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = F(x_2) - F(x_1). \quad (31)$$

Значения  $x_1$  и  $x_2$  можно выбирать сколь угодно близкими друг к другу. При  $x_1 \rightarrow x_2$ ,

$$F(x_2) - F(x_1) \rightarrow 0. \quad (32)$$

Поэтому у аналоговых измерительных приборов вероятность того, что указатель отсчётного устройства остановится на какой-либо конкретной точке шкалы, равна 0.

По той же причине

$$P\{x_1 \leq X \leq x_2\} = P\{x_1 < X < x_2\} = P\{x_1 \leq X < x_2\} = P\{x_1 < X \leq x_2\}, \text{ т.е.} \quad (33)$$

крайние точки можно включать, а можно и не включать в интервал.

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

$$p(x) = F'(x). \quad (34)$$

Поэтому  $p(x)$  называют иногда дифференциальной функцией распределения вероятности. В свою очередь  $F(x)$  может быть получена интегрированием  $p(x)$  в соответствующих пре-

делах 
$$F(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} p(x) dx. \quad (35)$$

Геометрическая интерпретация этой операции показана на рис. 6, а  $F(x_0)$  называют иногда интегральной функцией распределения вероятности.

5. Так как  $F(x)$  - неубывающая функция, её производная не может быть отрицательной

$$p(x) \geq 0. \quad (36)$$

6. Вероятность значений  $x$ , лежащих внутри интервала  $[x_1; x_2]$ , равна площади, ограниченной графиком функции  $p(x)$ , осью абсцисс и перпендикулярами к ней, восстановленными на краях интервала (см. рис. 5)

$$F\{x_1 \leq x \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx. \quad (37)$$

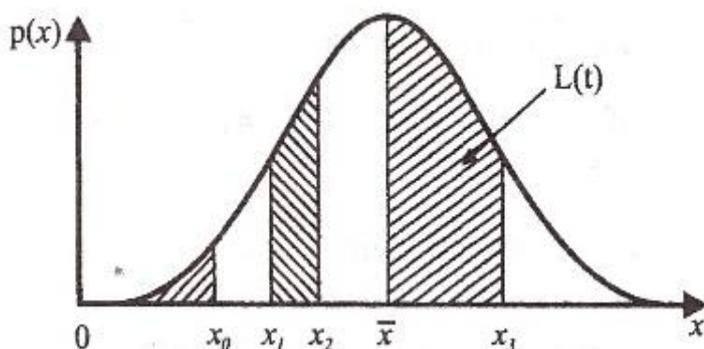


Рис. 5. Дифференциальная функция распределения вероятности

7. При расширении интервала  $[x_1; x_2]$  до бесконечности вероятность того, что любое случайное значение  $x$  окажется в этом интервале, становится равной 1

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1. \quad (38)$$

8. Вероятность значений  $x$ , лежащих в окрестности среднего значения  $[x; x_3]$ , при нормальном законе распределения вероятности равна функции Лапласа

$$L(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (39)$$

от аргумента  $t = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$  (см. рис. 5). При  $t = 0$  эта функция равна 0, а при увеличении  $t$  стремится к 0,5, становясь практически неотличимой от этого значения уже при  $t \geq 3$  (см. табл. 6).

Таблица 6

t	L(t)	t	L(t)	t	L(t)	t	L(t)	t	L(t)
0,01	0,0040	0, 12	0, 0478	0,55	0,2088	1,10	0,3643	2,10	0,4821
02	0080	14	0557	60	2257	1,20	3849	2,20	4861
03	0120	17	0675	65	2422	1,30	4032	2,30	4893
04	0160	20	0793	70	2580	1,40	4192	2,40	4918
05	0199	25	0987	75	2734	1,50	4332	2,50	4938
06	0239	30	1179	80	2881	1,60	4452	2,60	4953
07	0279	35	1368	85	3023	1,70	4554	2,70	4965
08	0319	40	1554	90	3159	1,80	4641	2,80	4974
09	0359	45	1736	95	3289	1,90	4713	2,90	4981
10	0398	50	1915	1,00	3413	2,00	4772	3,00	4987

Описание случайных чисел с помощью функций распределения вероятности является наиболее полным, но неудобным. Во многих случаях ограничиваются указанием числовых характеристик (моментов) законов распределения вероятности. Все они представляют собой некоторые средние значения, причём если усредняются числа, отсчитываемые от начала координат, то моменты называются начальными, а если от центра закона распределения - центральными.

Общее правило образования начальных моментов

$$\overline{x^r} = \int_{-\infty}^{\infty} x^r p(x) dx, \quad (40)$$

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

$$\overline{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx, \quad (41)$$

называемое также математическим ожиданием. Иногда его обозначают  $M(x)$ . Свойства математического ожидания:

1) математическое ожидание неслучайного числа равно самому этому числу:

$$M(x) = x; \quad (42)$$

2) постоянный множитель можно выносить за знак математического ожидания:

$$M(ax) = aM(x), \text{ где } a = \text{const}; \quad (43)$$

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

$$M(x + y - z) = M(x) + M(y) - M(z); \quad (44)$$

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

$$M(x \cdot y \cdot z) = M(x) \cdot M(y) \cdot M(z); \quad (45)$$

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

$$M[x - M(x)] = 0. \quad (46)$$

Математическое ожидание определяет местоположение случайного числа (т.е. всего массива его значений) на числовой оси. Оно относится к так называемым характеристикам положения, среди которых на практике находят применение ещё мода - наиболее вероятное значение случайного числа, и медиана - значение, по отношению к которому вероятность больших и меньших значений одинакова.

Мерой рассеяния случайных чисел около их среднего значения служит второй центральный момент.

Общее правило образования центральных моментов записывается следующим образом

$$\overline{(x - \bar{x})^r} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^r p(x) dx, \quad (47)$$

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

$$\overline{(x - \bar{x})} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x}) p(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx - \bar{x} \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = \bar{x} - \bar{x} = 0. \quad (48)$$

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

$$\sigma_x^2 = \overline{(x - \bar{x})^2} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx. \quad (49)$$

Иногда дисперсию удобнее обозначать символом  $D(x)$ .

Свойства дисперсии:

1) дисперсия случайного числа равна разности между математическим ожиданием его квадрата и квадратом математического ожидания

$$D(x) = M(x^2) - M^2(x); \quad (50)$$

2) дисперсия неслучайного числа равна нулю

$$D(x) = 0; \quad (51)$$

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

$$D(ax) = a^2 D(x), \text{ где } a = \text{const}; \quad (52)$$

4) дисперсия алгебраической суммы двух случайных чисел

$$D(x \pm y) = D(x) + D(y) \pm 2p\sqrt{D(x) \cdot D(y)}, \quad (53)$$

где коэффициент корреляции

$$p = \frac{M\{[x - M(x)][y - M(y)]\}}{\sqrt{D(x) \cdot D(y)}}; \quad (54)$$

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

$$D(x + y - z) = D(x) + D(y) + D(z). \quad (55)$$

Чем больше дисперсия, тем значительнее рассеяние случайного числа относительно центра рассеяния. Иллюстрацией может служить рис. 6, на котором показаны линии плотности вероятности нормального закона с математическим ожиданием  $\bar{x}$  и дисперсиями  $\sigma_{x_1}^2, \sigma_{x_2}^2, \sigma_{x_3}^2$ .

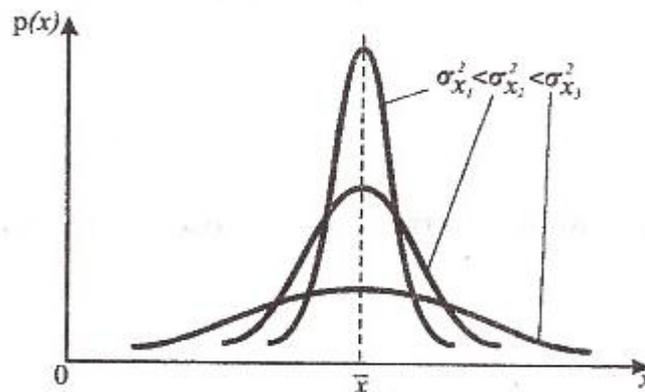


Рис.6. Графики плотности вероятности отсчета при различной дисперсии

В метрологии по рекомендациям международных организаций в качестве меры неопределённости используется среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_x = +\sqrt{\sigma_x^2}. \quad (56)$$

1. В теории информации, в теории связи, в физике и многих её приложениях в качестве меры неопределённости используется энтропия

$$H(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx \quad (57)$$

2. - среднее значение логарифма плотности вероятности, взятое со знаком минус.

Так как  $p(x) < 1$ , энтропия всегда положительна. Она равна 0 у неслучайного числа и максимальна при равномерной плотности распределения вероятности.

Все без исключения моменты, будучи числовыми характеристиками распределения вероятности случайных чисел сами случайными не являются. Использование их было бы очень удобным, но из-за ограниченного объема экспериментальных данных вычисление моментов невозможно. На практике пользуются оценками (приближенными значениями) числовых характеристик, получаемыми методами математической статистики.

Оценки, 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 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 каждое из них отличается от среднего значения на случайное отклонение  $\delta$ , которое может быть как положительным, так и отрицательным:

$$Q_1 = \bar{Q} + \delta_1; \quad (58)$$

$$Q_2 = \bar{Q} + \delta_2; \quad (59)$$

$$Q_n = \bar{Q} + \delta_n. \quad (60)$$

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

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \bar{Q} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (61)$$

В пределе при  $n \rightarrow \infty$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{Q} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (62)$$

Здесь

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{Q} = \bar{Q}; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0, \quad (63)$$

так что среднее арифметическое значение результата измерения

$$\hat{Q}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (64)$$

сходящееся по вероятности к  $\bar{Q}$ , при любом законе распределения вероятности результа-

та измерения может служить состоятельной точечной оценкой среднего значения.

Математическое ожидание среднего арифметического значения

$$M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M(Q_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [M(\bar{Q}) + M(\delta_i)] = \bar{Q}. \quad (65)$$

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. Используются различные критерии эффективности. При нормальном законе распределения вероятности наиболее популярным является такой показатель эффективности (мера рассеяния), как сумма квадратов отклонений оценки  $\hat{Q}$  от среднего значения  $\bar{Q}$ . Чем меньше этот показатель, тем эффективнее оценка. Это позволяет поставить задачу отыскания наиболее эффективной оценки среднего значения, по критерию

$$\sum_{j=1}^m (\hat{Q}_j - \bar{Q})^2 = \min. \quad (66)$$

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

Исследуем функцию в левой части последнего выражения на экстремум. Она достигает минимума при

$$\frac{d \sum_{j=1}^m (\hat{Q}_j - \bar{Q})^2}{d \hat{Q}_j} = 0. \quad (67)$$

После возведения в квадрат и почленного дифференцирования получим

$$\sum_{j=1}^m \hat{Q}_j - m \bar{Q} = 0. \quad (68)$$

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

$$\sum_{j=1}^m \left( \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} Q_i \right) - m \bar{Q} = 0 \quad (69)$$

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 по аналогии со средним арифметическим можно было бы принять

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \hat{\varrho}_n)^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \hat{\varrho}_n + \bar{\varrho} - \bar{\varrho})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\varrho_i - \bar{\varrho}) - (\hat{\varrho}_n - \bar{\varrho})]^2 = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \bar{\varrho})^2 - 2(\hat{\varrho}_n - \bar{\varrho}) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \bar{\varrho}) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\varrho}_n - \bar{\varrho})^2 = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \bar{\varrho})^2 + (\hat{\varrho}_n - \bar{\varrho})^2. \end{aligned} \quad (70)$$

При любом законе распределения вероятности результата измерения эта оценка является состоятельной, так как при  $n \rightarrow \infty$  второе слагаемое в правой части стремится к нулю, а первое - к  $\sigma_{\varrho}^2$ . Однако,

$$\begin{aligned} M \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \hat{\varrho}_n)^2 \right] &= M \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \bar{\varrho})^2 \right] - M (\hat{\varrho}_n - \bar{\varrho})^2 = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M (\varrho_i - \bar{\varrho})^2 - \sigma_{\hat{\varrho}}^2 = \sigma_{\varrho}^2 - \frac{\sigma_{\varrho}^2}{n} = \frac{n-1}{n} \sigma_{\varrho}^2, \end{aligned} \quad (71)$$

т. е. такая оценка является смещенной. Несмещенную оценку можно получить, умножив ее на коэффициент  $\frac{n}{n-1}$ . При  $n \rightarrow \infty$  коэффициент стремится к 1, а несмещенная точечная оценка дисперсии результата измерения

$$s_{\varrho}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \hat{\varrho}_n)^2 \quad (72)$$

при любом законе распределения вероятности результата измерения остается состоятельной. Квадратный корень из нее

$$s_{\varrho} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varrho_i - \hat{\varrho}_n)^2} \quad (73)$$

называется стандартным отклонением результата измерения, или его стандартной неопределенностью типа А.

Стандартное отклонение имеет размерность единицы случайной величины и используется при расчёте и построении доверительных интервалов измеряемой величины. Стандартное отклонение является характеристикой рассеяния измеряемой величины относительно среднего арифметического значения.

Измерительная процедура не заканчивается получением отсчёта. Вслед за этим по формуле (14) нужно перейти к показанию<sup>1</sup>, в которое ещё следует внести поправку (или поправки). Только после этого будет получен результат измерения.

Сказанное иллюстрируется рис. 7.

<sup>1</sup> Если шкала измерительного прибора проградуирована в значениях измеряемой величины, то переход к показанию происходит автоматически.

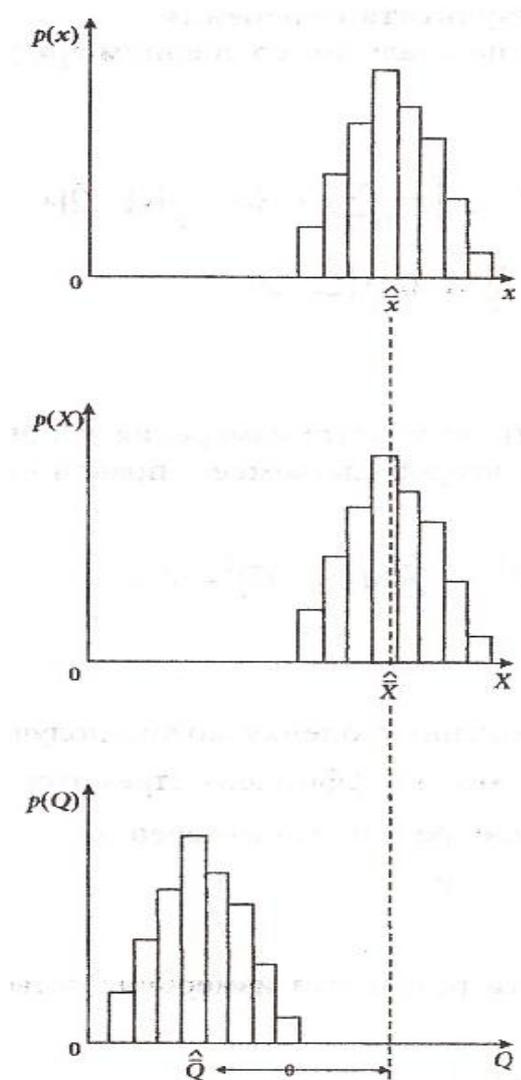


Рис. 7. Последовательность выполнения измерительной процедуры

Показание  $X$  подчиняется тому же (предположим, нормальному) эмпирическому закону распределения вероятности, что и отсчёт  $x$ . Внесение неслучайной поправки (в данном случае аддитивной) по формуле (16) приводит к смещению центра рассеяния в сторону, определяемую знаком поправки (на рис. 7 поправка  $\theta < 0$ ).

Результат измерения  $Q$ , который согласно третьей аксиоме метрологии является случайным, может быть представлен одним из следующих способов:

- массивом экспериментальных данных, в которые внесены поправки;
- гистограммой;
- выражениями для плотности вероятности

$$p(Q) = \frac{1}{s_Q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-\hat{Q})^2}{2s_Q^2}}, \quad (74)$$

или функции распределения вероятности

$$F(Q_0) = \frac{1}{s_Q \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_0} e^{-\frac{(Q-\hat{Q})^2}{2s_Q^2}} dQ, \quad (75)$$

которые хотя и остаются случайными из-за случайного характера  $\hat{Q}$  и  $s_Q^2$  - оценок числовых характеристик (среднего значения и дисперсии соответственно), но служат хорошими аппроксимациями ступенчатых эмпирических зависимостей.

Если результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то расчет оценок числовых характеристик осуществляется соответственно для нормального закона распределения вероятности, например с обозначениями  $N(\hat{Q}_n; s_Q^2)$  или  $N(\hat{Q}_n; s_Q)$ .

### Математические модели результатов измерений

Математические модели для определения значений результата измерения, включающего результаты прямых измерений (непосредственно, от отсчетных устройств), имеют широкое распространение для науки и техники. Так как результаты измерений являются случайными величинами, их описание отличается от описания неслучайных величин. На практике чаще всего ограничиваются приближенными вычислениями оценок числовых характеристик распределения вероятности, с учетом поправок и случайных отклонений. Такие измерения называют еще косвенными.

Пусть, например, имеет место зависимость

$$Q = f(A, B, \dots, N), \quad (76)$$

где  $A, B, \dots, N$  – некоторые результаты измерений.

Вводя в рассмотрение показания и поправки двух прямых измерений, можно написать:

$$A = X + \theta_x; B = Y + \theta_y; Q = Z + \theta_z, \quad (77)$$

где поправки для простоты будем считать известными точно постоянными величинами, а показания

$$X = \bar{X} + \delta_x; Y = \bar{Y} + \delta_y; Z = \bar{Z} + \delta_z.$$

Тогда

$$\bar{Z} + \theta_z + \delta_z = f(\bar{X} + \theta_x + \delta_x; \bar{Y} + \theta_y + \delta_y).$$

Идея приближенных вычислений состоит в том, что функцию двух или более резуль-

татов измерений  $A, B, \dots$  представляют рядом Тейлора, в котором ограничиваются первыми членами разложения:

$$\begin{aligned} \bar{Z} + \theta_z + \delta_z = f(\bar{X}, \bar{Y}) + \frac{\partial f}{\partial X}(\theta_x + \delta_x) + \frac{\partial f}{\partial Y}(\theta_y + \delta_y) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2}(\theta_x + \delta_x)^2 + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2}(\theta_y + \delta_y)^2 + \dots \end{aligned} \quad (78)$$

Первые слагаемые в правой и левой частях этого выражения не зависят от поправок и случайных отклонений от средних значений. Поэтому

$$\bar{Z} = f(\bar{X}, \bar{Y}). \quad (79)$$

Вместо средних значений  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  могут быть использованы 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. Такими являются средние арифметические показаний средств измерений. Поэтому эффективная оценка  $\bar{Z}$  получается в результате подстановки в формулу (18) средних арифметических:

$$\hat{\bar{Z}} = f(\hat{\bar{X}}, \hat{\bar{Y}}). \quad (80)$$

Для определения поправки  $\theta$  - вычтем уравнение (18) из уравнения (17):

$$\theta_z + \delta_z = \frac{\partial f}{\partial X}(\theta_x + \delta_x) + \frac{\partial f}{\partial Y}(\theta_y + \delta_y) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2}(\theta_x + \delta_x)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2}(\theta_y + \delta_y)^2 \dots \quad (81)$$

и усредним левую и правую части получившегося выражения:

$$\begin{aligned} \theta_z = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \overline{(\theta_x + \delta_x)^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \overline{(\theta_y + \delta_y)^2} + \dots = \\ = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \theta_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \sigma_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \sigma_y^2 + \dots \end{aligned} \quad (82)$$

Отсюда видно, что даже если  $\theta_x = \theta_y = 0$ , то все равно может возникнуть необходимость во внесении поправки

$$\theta_z = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \sigma_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \sigma_y^2,$$

если только ею нельзя пренебречь. Возникновение этой поправки на неточность вычислений, объясняемое наличием квадратичных членов разложения, является важной особенностью приближенных вычислений на уровне оценок числовых характеристик.

Вычтем теперь уравнение (82) из уравнения (81), 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

$$\sigma_z^2 = \overline{\delta_z^2} = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 \delta_x^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \delta_x \delta_y + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 \delta_y^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 \sigma_y^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} R, \quad (83)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — средние квадратичные отклонения результатов измерений А и В; R — смешанный центральный момент второго порядка совместного распределения случайных значений А и В. Если результаты измерений А и В независимы, то R = 0.

Переходя в выражениях (21) и (22) к оценкам, получим

$$\theta_z = \frac{\partial f}{\partial X} \theta_x + \frac{\partial f}{\partial Y} \theta_y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \theta_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \theta_y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X} S_x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} S_y^2 + \dots;$$

$$S_z^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial X} \right)^2 S_x^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} \right)^2 S_y^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \hat{R};$$

$$S_z = \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial X} S_x \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} S_y \right)^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial f}{\partial Y} \hat{R}},$$

где частные производные называются функциями влияния. В случае большого числа независимых результатов измерений

$$S_z = \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial X} S_x \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial Y} S_y \right)^2 + \dots} \quad (84)$$

### Обратная задача теории измерений

Обратная задача теории измерений представляет собой комплекс мер направленных на установление связи между показанием средства измерений и входным неслучайным воздействием измеряемой величины. Такая задача является важной для всех направлений науки и техники, связанных с выполнением измерений и определением значения измеряемой величины с учетом достижимого нормирования.

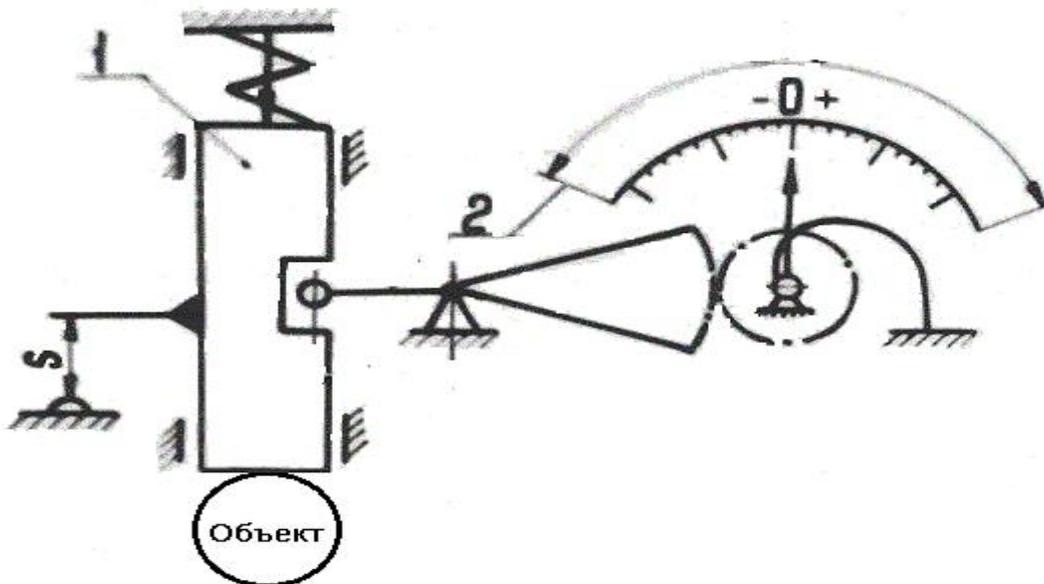


Рис. 8. Схема измерений

Откликом (реакцией), например, прибора (рис.8) на входное воздействие от объекта, воспринимаемое измерительным стержнем 1 служит отклонение указателя отсчётного устройства 2. Выше установлено, что из-за влияния множества факторов, точный учёт которых невозможен, отклик считается случайным. При этом представляет интерес не случайный отклик на входное воздействие от измеряемого объекта, а неслучайное значение измеряемой величины. Определение значения измеряемой величины по отклику средства измерений на входное воздействие называется обратной задачей теории измерений.

Обратная задача теории измерений решается в два этапа. На первом из них до начала измерений устанавливается связь между откликом и входным воздействием. Для этого отметкам шкалы на выходе средства измерений придаются значения измеряемой величины на входе. Эта процедура представляет собой передачу средству измерений информации о размере единицы величины. Она называется градуировкой и позволяет в дальнейшем по отклику судить о значении измеряемой величины.

На втором этапе после выполнения измерительной процедуры осуществляется переход от случайного результата измерения, полученного на выходе измерительного прибора, к неслучайному значению измеряемой величины на входе. Он состоит в отождествлении значения измеряемой величины с одной из характеристик положения результата измерения (обычно с его средним значением).

### Градуировка шкалы отсчетного устройства

Градуировка шкалы выполняется в условиях, когда измеряемая величина либо она является непрерывной, либо её изменением можно пренебречь, а время позволяет снимать показания после того, как указатель отсчётного устройства окончательно остановится на какой-нибудь отметке шкалы. Различают градуировку в отдельных точках диапазона измерений и построение графика характеристики.

Градуировка в отдельных точках диапазона измерений является наиболее простой. Так, например, при градуировке ртутного термометра в двух точках (при температуре таяния льда и температуре кипения воды) получают по  $n$  значений длины ртутного столба в каждой точке. Затем в центрах рассеяния наносят отметки шкалы и присваивают этим отметкам значения  $0^{\circ}\text{C}$  и  $100^{\circ}\text{C}$  соответственно. Если длина ртутного столба пропорциональна измеряемой температуре, то расстояние между полу-

ченными отметками шкалы можно разбить на 100 равных частей и получить термометрическую шкалу с ценой деления  $1^\circ\text{C}$ .

Построение характеристики градуировки предполагает две возможности. Первая из них заключается в том, что зависимость между входным воздействием и откликом на него известна (например, линейная, квадратичная, логарифмическая и т. д.), но неизвестны коэффициенты, входящие в алгебраическое уравнение. Вторая возможность состоит в необходимости аппроксимации экспериментальных данных аналитической зависимостью.

Если функция градуировки (построения шкалы) известна,

$$X = f(Q) \quad (85)$$

то при представлении её полиномом соответствующей степени

$$f(Q) = a_0 + a_1Q + a_2Q^2 + \dots + a_mQ^m$$

необходимо найти такие значения коэффициентов  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ , при которых эта зависимость наилучшим образом соответствует экспериментальным данным.

Если значения входных воздействий  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  известны точно, а отклики на них  $X_1, X_2, \dots, X_n$  подчиняются нормальному закону распределения вероятности, то обычно используется метод наименьших квадратов. При этом сумма квадратов отклонений откликов от характеристики градуировки имеет вид

$$\sum_1^n [X - f(Q)]^2 = \min \quad (86)$$

Здесь коэффициенты  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ , определяющие оптимальную по критерию наименьших квадратов характеристику градуировки, находятся из условия равенства нулю производных от этой суммы по каждому неизвестному коэффициенту. Если функция градуировки является нелинейной

$$X = a_0 + a_1 \frac{1}{Q}, \quad (87)$$

то данная функция подлежит линеаризации

$$X = a_0 + a_1 Y.$$

Если вид характеристики градуировки неизвестен, то возникает задача отыскания наилучшей аппроксимации экспериментальных данных, полученных при градуировке аналитической зависимостью (24). Решение её методом наименьших квадратов отличается от решения предыдущей задачи только тем, что степень полинома  $f(Q)$  неизвестна. Степень градуировки устанавливается из требований к точности градуировки.

### Пример 7

Установлено, что профиль исследуемой поверхности описывается функцией вида  $y = A \sin \varphi$ .

Определить методом наименьших квадратов оценку параметра данной функциональной зависимости по результатам измерения профиля поверхности:

$$\begin{array}{l} \varphi_i \quad 0 \quad \pi/2 \quad \pi \quad 3/2\pi \quad 2\pi \\ y_i \quad 0 \quad 1.5 \quad 0 \quad -1.5 \quad 0. \end{array}$$

Для определения оценки  $\hat{A}$  искомого параметра в соответствии с методом наименьших квадратов используется условие равенства нулю производной от этой суммы квадратов по неизвестному коэффициенту

$$\sum_1^n \frac{\partial (y_i - A \sin \varphi_i)^2}{\partial A} = 0. \quad (88)$$

Отсюда

$$\hat{A} = \frac{2 \sum_1^n y_i \sin \varphi_i}{\sum_i (1 - \cos 2\varphi_i)}.$$

Ответ

$$\hat{A} = 1.5.$$

### Переход от результата измерения к значению измеряемой величины

Так как результат измерения является случайным, естественно возникает вопрос, какое из его значений совпадает со значением измеряемой величины. Подсказкой служит то, что оно должно быть неслучайным, и его размерность должна совпадать с размерностью измеряемой величины. Сформулированным требованиям в равной мере удовлетворяют все характеристики положения: среднее значение, мода и медиана. Сделать более конкретный выбор из них на основе научной аргументации невозможно. По сложившейся практике со значением измеряемой величины  $Q$  отождествляется среднее значение результата измерения  $\bar{Q}$ . В теории вероятности, например, существует принцип практической уверенности согласно которому маловероятное событие при однократном испытании не произойдет. Этот принцип не доказывается математически; он подтверждается опытами измерений. Точно так же в метрологии можно быть практически уверенным в том, что среднее значение результата измерения  $\bar{Q}$  в большинстве случаев соответствует значению измеряемой величины  $Q$ . Это подтверждается всем многовековым опытом практических измерений.

Сказанное позволяет перейти от случайных значений результата измерения на выходе измерительного прибора к неслучайному значению измеряемой величины  $Q \equiv \bar{Q}$  на его входе.

Если, например, результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то любое его случайное значение  $O_i$ , удалено от среднего значения  $\bar{Q}$  не более чем

$$\begin{aligned} &\text{на } \pm 3\sigma_Q \text{ с вероятностью } 0,997; \\ &\text{на } \pm 2,6\sigma_Q \text{ с вероятностью } 0,99; \\ &\text{на } \pm 2\sigma_Q \text{ с вероятностью } 0,95; \\ &\text{на } \pm \sigma_Q \text{ с вероятностью } 0,68. \end{aligned}$$

Следовательно, можно утверждать и обратное: неслучайное значение  $Q \equiv \bar{Q}$  удалено от любого случайного значения результата измерения  $Q_i$  не более чем

на  $\pm 3 \sigma_Q$  с вероятностью 0,997;  
на  $\pm 2.6 \sigma_Q$  с вероятностью 0,99;  
на  $\pm 2 \sigma_Q$  с вероятностью 0,95;  
на  $\pm \sigma_Q$  с вероятностью 0,68.

Таким образом, всегда можно указать доверительный интервал, в пределах которого находится значение измеряемой величины с соответствующей доверительной вероятностью.

### Пример 8

Результат измерения расстояния (длины) подчиняется нормальному закону распределения вероятности с дисперсией  $10^{-4} \text{ м}^2$ . Чему равно расстояние  $L$ , если при его измерении получено значение  $L = 24,12 \text{ м}$  ?

**Решение.** Полученный результат является случайным. На самом деле расстояние  $L$  равно

(24,09 ... 24,15) м с вероятностью  $P = 0,997$ ;  
(24,10 ... 24,14) м с вероятностью  $P = 0,95$ ;  
(24,11 ... 24,13) м с вероятностью  $P = 0,68$ .

Если неизвестно, какому закону распределения вероятности подчиняется результат измерения, то вероятность того, что любое его случайное значение  $Q_i$  окажется за пределами доверительного интервала  $[\bar{Q} - t\sigma_Q; \bar{Q} + t\sigma_Q]$

$$P\{|Q_i - \bar{Q}| > t\sigma_Q\} = \int_{-\infty}^{\bar{Q} - t\sigma_Q} p(Q)dQ + \int_{\bar{Q} + t\sigma_Q}^{\infty} p(Q)dQ. \quad (89)$$

Введём в рассмотрение функцию

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

график которой показан на рис.10. Это позволит перейти к более компактной записи

$$P\{|Q_i - \bar{Q}| > t\sigma_Q\} = \int_{-\infty}^{\infty} \xi(Q)p(Q)dQ. \quad (90)$$

Результат интегрирования не уменьшится, если функцию

$\xi(Q)$  заменить, показанной на рис. 10 пунктиром квадратичной функцией  $\left(\frac{Q - \bar{Q}}{t\sigma_Q}\right)^2$ , которая при всех  $Q$  не меньше  $\xi(Q)$ . Тогда

$$P\{|Q_i - \bar{Q}| > t\sigma_Q\} \leq \frac{1}{(t\sigma_Q)^2} \int_{-\infty}^{\infty} (Q - \bar{Q})^2 p(Q) dQ = \frac{1}{t^2}, \quad (91)$$

а вероятность того, что отдельное значение результата измерения  $Q_i$  при любом законе распределения вероятности не отличается от среднего значения  $\bar{Q}$  больше чем наполовину доверительного интервала  $[\bar{Q} - t\sigma_Q; \bar{Q} + t\sigma_Q]$ ,

$$P\{\bar{Q} - t\sigma_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + t\sigma_Q\} \geq 1 - \frac{1}{t^2}. \quad (92)$$

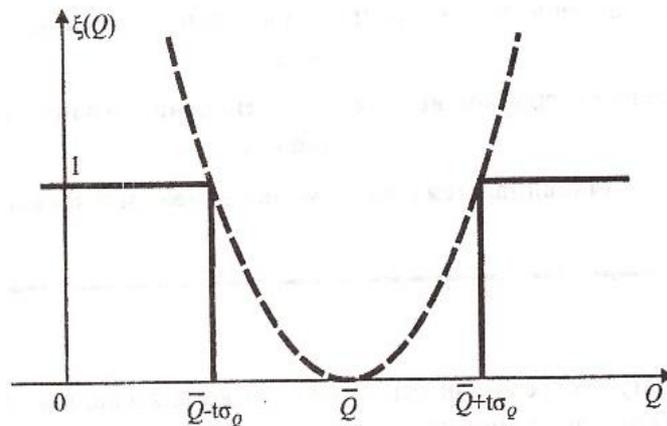


Рис. 9. К выводу неравенства П.Л. Чебышева

Эта формула называется неравенством П.Л. Чебышева. Она устанавливает нижнюю границу вероятности того, что случайное значение результата измерения  $Q_i$  не окажется за пределами доверительного интервала. При всех обстоятельствах оно удалено от среднего значения  $\bar{Q}$  не более чем

на $\pm 3\sigma_Q$	с вероятностью	0,889;
на $\pm 2,6\sigma_Q$	с вероятностью	0,85;
на $\pm 2\sigma_Q$	с вероятностью	0,75;
на $\pm \sigma_Q$	с вероятностью	0.

Следовательно, можно утверждать и обратное: неслучайное значение измеряемой величины  $Q \equiv \bar{Q}$  удалено от любого случайного значения результата измерения  $Q_i$  при любом законе распределения его вероятности не более чем

на $\pm 3\sigma_Q$	с вероятностью	0,889;
на $\pm 2,6\sigma_Q$	с вероятностью	0,85;
на $\pm 2\sigma_Q$	с вероятностью	0,75;
на $\pm \sigma_Q$	с вероятностью	0.

3. При неизвестном законе распределения вероятности результата измерения значение измеряемой величины на основании неравенства П.Л. Чебышева устанавливается с максимальной неопределённостью.

Уменьшить эту неопределённость можно выяснив, какому закону распределения вероятности подчиняется результат измерения.

### 1.2.2 Основы теории средств измерений

Измерительные, контрольно-измерительные приборы и инструменты находят широкое применение не только в сфере производств, но и при эксплуатации, диагностике технологических систем, обеспечении их экологической безопасности. Многообразие методов и средств измерений и контроля, принципов их действия, настройки, поверки и обслуживания вызывает необходимость их систематизации, рассмотрения наиболее характерных представителей контрольно-измерительных приборов и инструментов, проведения анализа основных достоинств и недостатков конкретных, наиболее распространенных конструкций и методов измерений.

В качестве измерительных механизмов средств технических измерений широко используются реечно-зубчатые, зубчатые и рычажно-зубчатые механизмы. Указанные механизмы воспроизводят линейную и нелинейно-линейную зависимости между перемещениями входного и выходного звеньев.

Точность таких измерительных приборов характеризуется теоретической, систематической и допускаемой (чаще пределом допускаемой погрешности) погрешностью. Погрешность нелинейно-линейного измерительного механизма называется теоретической. Постоянная составляющая погрешности измерительного механизма называется систематической. Систематическая погрешность образуется совокупностью теоретической погрешности и технологическими погрешностями элементов измерительного механизма.

**Пределом допускаемой погрешности называется наибольшее значение погрешности средства измерений, устанавливаемое нормативным документом для данного типа средств измерений, при котором оно еще признается годным к применению.**

В системе национальных приборостроительных фирм проводятся научно-технические исследования, связанные с повышением достоверности показаний, надежности, а также с обеспечением унификации элементов мультипликативных рычажных и зубчатых передач измерительных механизмов. Проведенные исследования позволили существенно расширить функциональные возможности и повысить эффективность средств активного и универсального контактного контроля.

В известных средствах контактного контроля отклонений длин и перемещений используются электроконтактные преобразователи фирмы «Калибр», электроконтактные головки фирмы «Крин», электроконтактные головки фирмы «Маузер» (Германия), индуктивные преобразователи фирмы «Калибр», а также индуктивные преобразователи перемещений, однооборотные и многооборотные измерительные головки фирмы «Измерон» (Санкт-Петербург). Подобные средства контактного типа используются чаще всего для контроля неподвижных или медленно движущихся изделий.

В состав большинства приборов контактного типа входят поступательно движущийся измерительный стержень и многозвенная рычажно-зубчатая измерительная цепь. В ряде случаев на входе измерительной цепи используются синусные передачи.

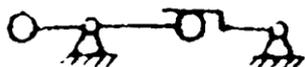


Рис.10. Механизм с ведущим внутренним кулисным рычагом



Рис.11. Механизм с ведущим внешним кулисным рычагом

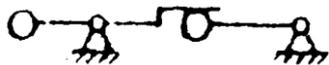


Рис.12 Механизм с ведущей внутренней кулисой

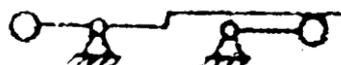


Рис.13. Механизм с ведущей внешней кулисой

Синусно-кулисные передачи (рис. 10–13), преобразующие вращательное движение синусного рычага во вращательное движение кулисы или кулисного рычага, являются высокоточными передачами при ограниченных угловых перемещениях (в диапазоне углов до  $5^{\circ} \dots 10^{\circ}$ ), благодаря возможности обеспечения высокого качества (простых по форме и технологичных по способу изготовления) контактных элементов подвижных звеньев.

Кулисные передачи образуются рациональным с точки зрения обеспечения требуемой точности комбинированием установки их элементов (встречное или однонаправленное расположение рычага и кулисы), замкнутых на мультипликативные зубчатые механизмы и на элементы отсчетных устройств.

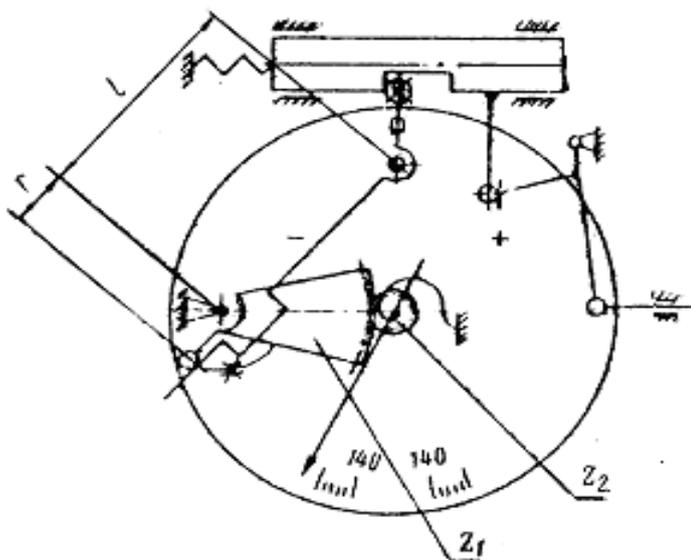


Рис. 14. Измерительный механизм рычажного микрометра

Рассмотрим схематизированную конструкцию (рис. 14) унифицированного механизма микрометра, содержащего двухрычажную синусно-кулисную передачу, одноступенчатую зубчатую передачу (ведомый зубчатый триб) и стрелочное отсчетное устройство.

Конструкция рассматриваемого механизма непосредственно или с частичным изменением элементной структуры используется для оснащения электроконтактных головок, индикаторных головок 1ИГ, 2ИГ, рычажных скоб СР, рычажных микрометров МР и др.

Элементы используемых рычажных передач образуют высшие кинематические пары (сочетания сферических, цилиндрических, плоских поверхностей). Поверхности контактных элементов высших кинематических пар являются технологичными и изготавливаются с высокой точностью. Поэтому рычажные передачи в конструкциях приборов устанавливаются перед сложнопрофильными, инерционными передачами (на входе измерительной цепи), обеспечивая тем самым оптимальный баланс влияющих на суммарную погрешность факторов.

Возросшие требования к повышению точности прецизионных приборов и преобразователей обусловили необходимость аналитической оценки теоретической (схемной) погрешности измерительных механизмов. В данном параграфе описываются простые по функциональному назначению рычажные передачи, которые для расширения функциональных и эксплуатационных возможностей прибора объединяются в составные множительные передачи.

Рассматриваемый прибор (рис. 14) представляет собой соединение микрометрического механизма микрометра с рычажно-зубчатым механизмом отсчетного устройства. В практике линейных измерений известны конструкции механизма (например, по а.с. СССР № 502196), в которых с помощью специального компенсатора осуществляется смещение отдельных участков продольного штриха стебля для существенного снижения суммарной погрешности микрометрической пары.

Коэффициент передачи  $I$  механизма определяется отношением длины окружности  $b$  измерительного барабана, на котором нанесены деления, к шагу  $S$  микрометрического винта:

$$I = \frac{b}{S}. \quad (93)$$

Цена деления винтовой передачи

$$c = \frac{S}{n}, \quad (94)$$

где  $n$  – число делений шкалы измерительного барабана.

Идеальная модель рычажно-зубчатого механизма (рис. 14) воспроизводит линейную зависимость между поступательным движением измерительного стержня и вращательным движением стрелки отсчетного устройства. Указанный механизм состоит из двухрычажного синусно-кулисного механизма с параллельными осями (ведущее звено кулиса) и зубчатой передачи.

Измерительное отношение  $i$  модели (определяющей закон построения шкалы) рычажно-зубчатого механизма со стрелочным отсчетным устройством (рис. 14) определяется из выражения

$$i = \frac{1}{l_i} \left( \frac{1}{r} + 1 \right) \frac{z_1}{z_2} R, \quad (95)$$

где  $l_1$  – длина входного синусного рычага;  $z_1, z_2$  – числа зубьев зубчатых колес;  $R$  – длина стрелки.

Микрометрические приборы являются наиболее массовыми и широко распространенными измерительными средствами общего назначения. Ранее выпускаемые микрометрические приборы с однорычажным механизмом имели ряд существенных недостатков:

- пределы измерения по шкале отсчетного устройства ( $\pm 30$  мкм);
- проблема унификации отсчетного устройства для всех типоразмеров;

- применение для осей передаточного механизма металлических подшипников скольжения приводит к образованию зазора в шарнире входного синусного механизма и к появлению дополнительной погрешности входного механизма и к повышенной вариации показаний.

Начало серийного производства приборов МР, оснащаемых новыми рычажно-зубчатыми измерительными механизмами с расширенными диапазонами измерения  $\pm 140$  мкм, относится к 1972 г. В качестве отсчетного устройства рычажных микрометров и скоб использован измерительный механизм, содержащий симметричную синусно-кулисную передачу (рис. 14) и одноступенчатую зубчатую передачу.

Ниже приводятся основные технические характеристики микрометрических приборов:

- диапазоны измерений: 0 – 25; 25 – 50; 50 – 75; 75 – 100 мм;
- цена деления измерительного барабана: 0,01 мм;
- цена деления отсчетного устройства: 0,002 мм;
- пределы измерения отсчетного устройства:  $\pm 0,14$  мм;
- допускаемая погрешность отсчетного устройства на участке шкалы  $\pm 0,03$ :  $\pm 0,001$  мм;
- более  $\pm 0,03$ :  $\pm 0,002$  мм;
- допускаемая погрешность показаний прибора в пределах участка шкалы  $\pm 0,03$ :  $\pm 0,003$  мм;
- измерительное усилие:  $600 \pm 100$  сН;
- колебание измерительного усилия: 100 сН.

### **1.2.3 Элементы допускаемой погрешности измерительных механизмов**

В практике технических измерений в последние десятилетия наибольшее распространение получили средства для контактного контроля отклонений длин и отклонений формы различного рода промышленных изделий и инструментов. Отечественными и зарубежными фирмами выпускается широкий ассортимент приборов и преобразователей для линейных измерений, оснащаемых рычажными и рычажно-зубчатыми механизмами. В рассматриваемом случае линейной измеряемой величиной является длина, ширина, высота объекта контроля, перемещение или разность указанных величин.

Измерительные приборы и преобразователи, оснащаемые рычажными механизмами, используются в измерительных устройствах станков, автоматических линий, переналаживаемых комплексов, а также для контроля предельных отклонений размеров деталей и отклонений формы обрабатываемых инструментов. Сравнительно малая погрешность измерений такими приборами достигается с помощью рычажных передач, устанавливаемых в контакте с прямолинейно движущимся ведущим звеном.

С практической точки зрения эффективными оказываются механизмы, обеспечивающие составной контроль отклонений размера и отклонений формы изделия. Подобные измерительные устройства должны иметь, с одной стороны, соответствующие диапазоны измерений, а с другой стороны, должны отвечать требуемой точности.

Теоретическая (схемная) погрешность рычажно-зубчатого механизма является частью предела основной допускаемой погрешности измерительного прибора в целом. В зависимости от величины допускаемой теоретической погрешности производится предварительный схемный анализ и выбор соответствующего вида рычажного механизма. Иными словами, задача анализа и синтеза включает выбор структурной схемы механизма и расчет параметров его звеньев, которые позволяют обеспечить требуемую теоретическую по-

грешность. Задача обеспечения требуемой погрешности рассматривается с помощью частных и идеальных функций положения.

В общем виде теоретическая погрешность  $\Delta\varphi$  определяется разностью функций положения реального и идеального механизмов

$$\Delta\varphi = \varphi(x, g^1, g^2, \dots, g^n) - \varphi_0(x, A_i).$$

Функция положения  $\varphi$ , реализующая связь между перемещениями ведущего и ведомого звеньев, зависит от входной координаты  $x$  и соответствующих ей размерных параметров  $g^1, g^2, \dots, g^n$  подвижных звеньев. Функция  $\varphi_0$  зависит от номинальных значений постоянных параметров  $A_i$  множительной цепи и воспроизводит теоретическую функцию положения идеального механизма.

На входе рычажного механизма в большинстве случаев используется синусный механизм (с фиксированной длиной синусного рычага). В качестве входного механизма может также использоваться тангенсный механизм. Однако влияние перекосов в поступательной паре и эксцентриситетов во вращательной паре проявляется в синусном механизме значительно меньше. Синусный и тангенсный механизмы работают по симметричной схеме расположения пределов измерения от нулевого положения.

Зубчатый механизм прибора для линейных измерений устанавливается на выходе измерительной цепи и имеет наименьший коэффициент влияния. Зубчатый механизм воспроизводит линейную зависимость между перемещениями звеньев и не имеет теоретической погрешности. Вследствие значительных погрешностей изготовления зубчатых пар, погрешность оснащаемых ими приборов может устанавливаться в пределах  $\pm 0,01$  мм и более. Поэтому в рычажно-зубчатых измерительных приборах зубчатые рычажные передачи устанавливаются предельно близко к отсчетному устройству или сами содержат элементы отсчетного устройства. Благодаря этому, однооборотные зубчатые механизмы позволяют проектировать измерительные приборы высокой точности (с погрешностью  $\pm 0,0005$  мм).

Рассмотрим схему **реечно-зубчатой измерительной головки типа ИЧ** фирмы «Крин» (рис. 15), используемой для абсолютных и относительных измерений размеров, а также для контроля отклонений формы и расположения поверхностей изделий. Измерительный механизм головки типа ИЧ относится к механизмам, оснащаемым только зубчатыми передачами, образующими линейную измерительную цепь.

Измерительная головка содержит чувствительный элемент Аббе, снабженный измерительным наконечником и зубчатой рейкой, взаимодействующей с зубчатым колесом  $z_2$  с помощью закрепленного с ним на одной оси зубчатого колеса (триба)  $z_1$ . Зубчатое колесо  $z_2$  находится в зацеплении с трибом  $z_3$ , на оси которого установлена стрелка – указатель основной шкалы (цена деления 0,01 мм). Кинематическое замыкание элементов измерительной цепи осуществляется с помощью пружины выбора люфта, закрепленной на центральном трибе зубчатого колеса  $z_4$ . На оси колеса  $z_4$  с помощью футера установлена малая стрелка, необходимая для определения числа оборотов стрелки основной шкалы. Оборот стрелки основной шкалы соответствует 1/10 части оборота малой стрелки. Малая стрелка служит указателем числа оборотов стрелки основной шкалы.

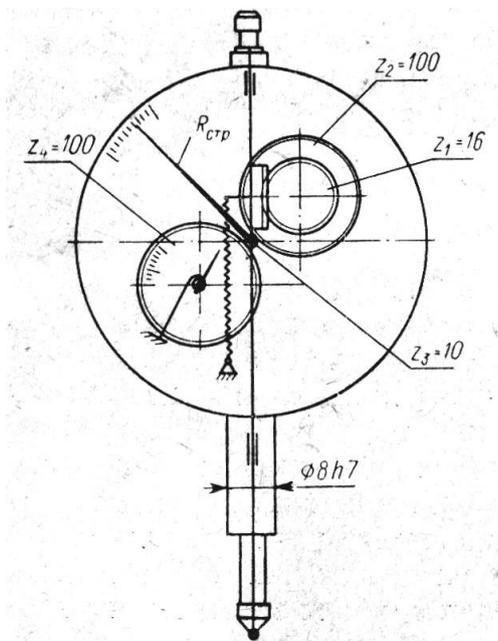


Рис. 15. Схема реечно-зубчатой измерительной головки типа ИЧ

Пружина выбора люфта, закрепленная на оси центрального триба колеса  $z_4$ , обеспечивает отсутствие зазора в контактах. Вследствие этого зубчатые колеса контактируют между собой при отсутствии люфта между зубьями в момент определения показания прибора. Измерительное усилие прибора обеспечивается специальной пружиной, закрепленной между корпусом и измерительным стержнем. В некоторых конструкциях головок типа ИЧ применяется устройство для разгрузки механизма от ударов, возникающих в момент контакта измерительного наконечника с поверхностью изделия. В этом случае защита механизма осуществляется с помощью плавающей зубчатой рейки, которая может перемещаться относительно измерительного стержня в пределах упругого зазора только при подготовке прибора к проведению отдельного измерения.

Измерительная головка типа ИЧ является типовым представителем для методики определения погрешностей измерительных механизмов, измерительные цепи которых содержат зубчатые передачи. Общее измерительное отношение  $i_p$  реечно-зубчатого механизма измерительной головки имеет вид

$$i_p = \frac{z_2}{r_1 z_3} R_{стр.} \quad (96)$$

где  $r_1$  – радиус делительной окружности зубчатого колеса  $z_1$  ( $r_1 = mz_1/2$ );

$m$  – модуль реечно-зубчатого зацепления;

$R_{стр.}$  – длина стрелки основной шкалы прибора.

Для примера определения величины требуемого измерительного отношения выберем параметры измерительной головки типа ИЧ:  $z_1 = 16$ ;  $z_2 = 100$ ;  $z_3 = 10$ ;  $b$  – длина деления основной шкалы ( $b = 1,5$ );  $c$  – цена деления основной шкалы ( $c = 0,01$  мм);  $R_{стр.} = 24$  мм;  $m = 0,199$ . Измерительное отношение идеального механизма  $i_0 = b/c = 150$ .

Следовательно, теоретическая погрешность  $\Delta u$  реечно-зубчатого измерительного механизма определяется как разность между реальной и идеальной функциями  $\Delta u = (i_p - i_0)c$ .

Линейность этих функций позволяет считать, что теоретическая погрешность указанных передач отсутствует. Выбранные параметры механизма, а, следовательно, и  $i_p$  могут обеспечить выполнение этого условия.

Однако на систематическую погрешность  $\Delta y_1$  измерительной головки оказывают существенное влияние погрешности изготовления зубчатой рейки и зубчатых колес, представляемые нормами кинематической точности, плавности работы зубчатых колес, контакта зубьев ГОСТ 9178-81 «Передачи зубчатые цилиндрические мелкомодульные».

Выражение систематической погрешности измерительной головки типа ИЧ имеет вид

$$\Delta y_1 = \frac{2}{m} [(F_{ip} + F'_{i1}) \frac{z_2}{z_1 z_3} + \frac{F'_{i2}}{z_2} + \frac{F'_{i3}}{z_3}] R_{cmp.} + \delta e, \quad (97)$$

где  $F_{ip}$  – накопленная погрешность шага зубчатой рейки ( $F_{ip} = F_p + f_t$ );  $F'_{i1}, F'_{i2}, F'_{i3}$  – кинематические погрешности зубчатых колес  $z_1, z_2, z_3$  соответственно;  $\delta e$  – эксцентриситет шкалы.

Из приведенного выражения следует, что требуемая точность измерительной головки достигается за счет использования ресурса точности зубчатых передач в процессе их изготовления. Отклонения накопленной погрешности шага при изготовлении зубчатой рейки по пятой степени кинематической точности установим в соответствии с её допуском  $F_{ip} = \pm 0,005$  мм.

Зубчатое колесо  $z_1$  входной передачи при четвертой степени кинематической точности имеет допуск  $F'_{i1} = 0,009$  мм. Зубчатые колеса  $z_2, z_3$  изготавливают по пятой степени кинематической точности:  $F'_{i2} = 0,016$  мм;  $F'_{i3} = 0,015$  мм. Эксцентриситет шкалы, зависящий от величины зазора при центрировании её относительно цилиндрического элемента корпуса, устанавливается с допуском  $\delta e = 0,01 \dots 0,02$  мм.

Принимая во внимание нормы точности изготовления зубчатых передач можно полагать, что систематическая погрешность измерительной головки ИЧ не превышает  $\Delta y_1 \leq 1,8$  мм. Тем не менее, такая погрешность при цене деления 0,01 мм обеспечила возможность изготовления многооборотных реечно-зубчатых измерительных головок типа ИЧ с пределами измерения 0–2; 0–5; 0–10; 0–25; 0–50 мм и с пределом допускаемой погрешности на нормируемом участке не более 0,015 мм.

Типовым представителем измерительных головок, измерительная цепь которых содержит зубчатые передачи с входной синусной передачей, является головка с наконечником бокового действия фирмы «Крин».

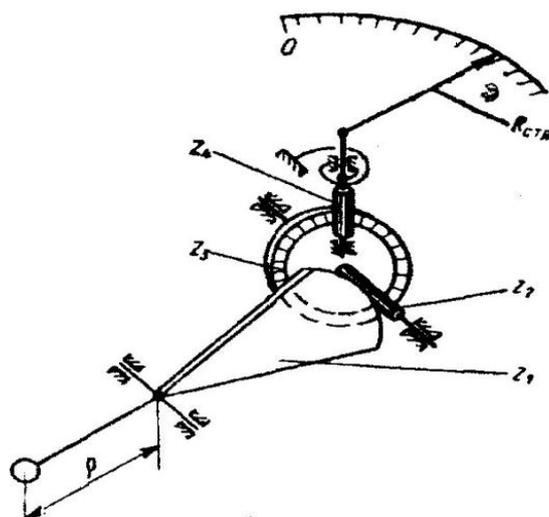


Рис. 16. Схема измерительной головки типа ИРБ

Рассмотрим принципиальную схему **измерительной головки с наконечником бокового действия типа ИРБ** (рис. 16). Указанная измерительная головка используется как для выполнения абсолютных и относительных измерений размеров, а также для контроля отклонений формы и расположения поверхностей изделий.

Для моделей измерительных головок этого типа является характерным наличие измерительного рычага  $p$  (рычаг синусного механизма) со сферическим контактным элементом, перемещающимся в плоскости перпендикулярной его оси. Необходимо пояснить, что измерение линейных размеров такой измерительной головкой производится при перемещении контактного элемента по дуге окружности, для которой величина измеряемого размера является хордой.

Измерительные головки с наконечником бокового действия, выпускаемые согласно ГОСТ 5584-75, имеют два типа исполнения. В основном варианте (модель ИРБ) шкала расположена параллельно оси измерительного рычага в его среднем положении и перпендикулярно к плоскости его углового перемещения.

В торцевом варианте исполнения ИРТ шкала расположена перпендикулярно оси измерительного рычага в его среднем положении и перпендикулярно к плоскости его углового перемещения.

Технические характеристики измерительных головок приведены в таблице 7.

Указанные в табл.7 измерительные головки имеют унифицированный зубчатый механизм, объединенный с входной синусной передачей. Следует отметить, что консольная конструкция наконечника бокового действия и незначительное измерительное усилие (30 сН) позволяет применять прибор в труднодоступных местах изделий, а также в случаях контроля миниатюрных деталей, имеющих сравнительно легко деформируемые поверхности.

Таблица 7.

Модель измерительной головки	ИРБ	ИРТ
Цена деления, мм	0,01	0,01
допускаемой погрешности: (в пределах 0,1 мм), мм, в диапазоне измерений), мм	0,005 0,01	
Диапазон измерений, мм	0 – 0,8	
Максимальное усилие, сН	30	
Диаметр присоединительного стержня, мм	5h7	
Максимальные размеры, не более, мм		

Исследуем метрологические возможности и характеристики измерительной головки типа ИРБ, которая является типовым представителем для методики определения погрешностей измерительных механизмов, измерительные цепи которых содержат сложные зубчатые передачи в сочетании с входным синусным механизмом. Общее измерительное отношение  $i_p$  механизма измерительной головки имеет вид

$$i_p = \frac{z_1 z_3}{\rho z_2 z_4} R_{стр.} \quad (98)$$

где  $\rho$  – длина синусного рычага ( $\rho = 10,25$  мм);

$z_1, z_2, z_3, z_4$  – зубчатые колеса измерительного механизма ( $z_1=270, z_2=20, z_3=72, z_4=12$ );

$R_{стр.}$  – длина стрелки ( $R_{стр.} = 12,5$  мм);

$b, c$  – длина и цена деления шкалы соответственно ( $b=0,95$  мм,  $c=0,01$  мм);

$S_{max}$  – диапазон измерений измерительной головки ( $S_{max} = 0,8$  мм).

Общее измерительное отношение с учетом выбранных параметров  $i_p = 95$ . Измерительное отношение идеального механизма  $i_0 = b/c = 95$ .

Следовательно, теоретическая погрешность  $\Delta y$  синусно-зубчатого измерительного механизма определяется как разность между реальной и идеальной функциями

$$\Delta y = (i_p - i_0)c.$$

Оценим теоретическую погрешность измерительной головки типа ИРБ. Ось накопчика бокового действия в момент измерения устанавливается перпендикулярно направлению измеряемой величины, вследствие этого схема синусного механизма становится симметричной схемой с нулевым начальным углом. Теоретическая погрешность измерительной головки, механизм которой воспроизводит нелинейно-линейную функцию, имеет вид

$$\Delta y = \frac{S_{max}^3 z_1 z_3}{6 \rho^3 z_2 z_4} R_{стр.} \quad (99)$$

Здесь погрешность синусного механизма определяется третьим членом разложения его функции положения в степенной ряд. С учетом принятых величин параметров механизма измерительной головки ИРБ её теоретическая погрешность  $\Delta y = 0,06$  мм.

На систематическую погрешность  $\Delta y_1$  измерительной головки ИРБ даже при её сравнительно небольшом диапазоне измерений ( $S_{max} = 0,8$  мм) оказывают влияние по-

грешности изготовления зубчатых колес ГОСТ 9178-81 «Передачи зубчатые цилиндрические мелкозубчатые».

Выражение систематической погрешности измерительной головки типа ИРБ имеет вид

$$\Delta y_1 = \frac{2}{m} \left[ \left( \frac{F'_{i1}}{z_1} + \frac{F'_{i2}}{z_2} \right) \frac{z_3}{z_4} + \frac{F'_{i3}}{z_3} + \frac{F'_{i4}}{z_4} \right] R_{\text{сгр}}, \quad (100)$$

где  $F'_{i1}, F'_{i2}, F'_{i3}, F'_{i4}$  – кинематические погрешности зубчатых колес  $z_1, z_2, z_3, z_4$  соответственно.

При изготовлении зубчатых колес по четвертой степени кинематической точности  $\Delta y_1 \leq 0,113$  мм. С учетом измерительного отношения  $i_p = 95$  систематическая погрешность (2.6) составляет 0,0012 мм. Располагая значениями теоретической и систематической погрешностей, а также используя априорную информацию проверок данного класса приборов, исследователь-проектировщик или представитель метрологической службы устанавливает предел допускаемой погрешности, фиксируемый в нормативно-технической документации.

#### 1.2.4 Теоретическая погрешность и элементы синтеза комбинированных рычажно-зубчатых механизмов

Количественная оценка теоретической и систематической погрешностей комбинированных, многосвязных рычажных и зубчатых передач является наиболее сложной и наиболее необходимой процедурой, позволяющей аналитическим путем определить ресурс повышения точности и эффективности использования средств технических измерений.

Исследуем теоретическую погрешность и её составляющие компоненты на примере двухрычажного синусно-кулисного механизма (рис. 2.8), относящегося к механизмам с ведущей внутренней кулисой.

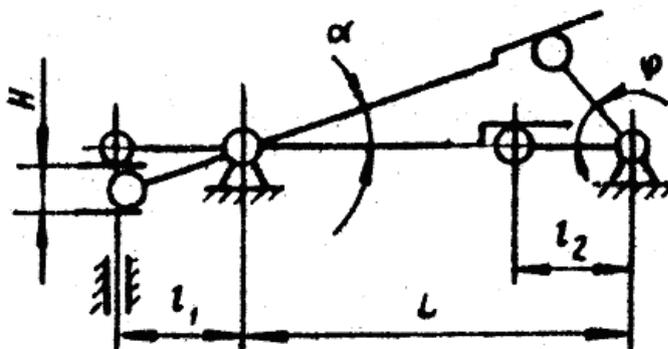


Рис. 17. Двухрычажный механизм с ведущей внутренней кулисой

Измерительный механизм (рис. 17) представляет собой сочетание входного синусного механизма и кулисного механизма с ведущей кулисой. На входе рассматриваемого измерительного рычажного механизма используется синусный механизм (рис. 18) с контактной парой плоскость – сфера.

На входе измерительной цепи может также устанавливаться тангенсный механизм с контактной парой сфера – плоскость. Однако влияние перекосов в поступательной паре и во вращательной паре (в шарнире рычага) проявляется в синусном механизме значительно слабее.

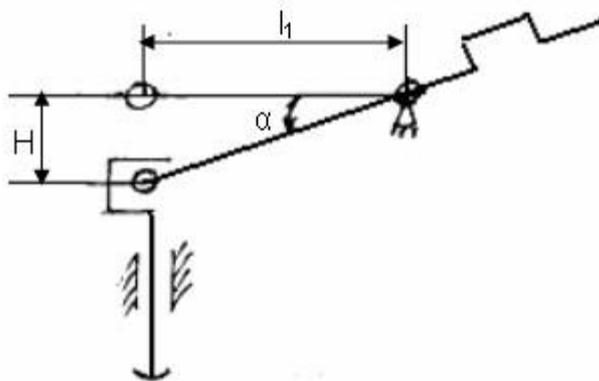


Рис. 18. Схема синусного механизма

Функция положения синусного механизма  $\varphi_s$  записывается в виде

$$\varphi_s = l_1 \sin \alpha,$$

где  $l_1$  – длина синусного рычага.

При этом заданная (идеальная) зависимость входного и выходного перемещений элементов синусного механизма имеет вид

$$H_0 = l_1 \alpha.$$

Синусный механизм работает по симметричной схеме отклонений от нулевого положения шкалы отсчетного устройства. Теоретическую (схемную) погрешность  $\Delta\varphi_s$  синусного механизма представим выражением:

$$\Delta\varphi_s = l_1 \sin \alpha - l_1 \alpha.$$

Разложим выражение схемной погрешности в ряд Тейлора, ограничив разложение многочленом третьей степени:

$$\Delta\varphi_s = (\alpha - \alpha^3/6) l_1 - l_1 \alpha.$$

Следовательно, схемная погрешность синусного механизма определяется третьим членом разложения  $\Delta\varphi_s$  в ряд Тейлора.

Предположим, что синусный рычаг совершает симметричные отклонения от среднего положения в пределах  $\alpha = \pm \pi / 24$ . При этом величина схемной погрешности синусного механизма

$$\Delta\varphi_s = 0,0004 l_1.$$

Приведем график схемной погрешности (рис. 19) синусного механизма при фиксированном перемещении синусного рычага  $\alpha$ .

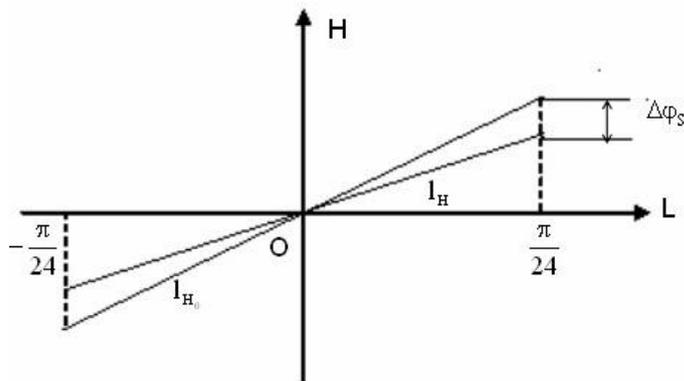


Рис. 19. График теоретической погрешности

Схемная погрешность  $\Delta\varphi_s$  в середине шкалы равна нулю ( $\alpha_0 = 0$ ), а на краях шкалы она имеет максимальное значение.

Исходный закон аналитической связи параметров синусного механизма

$$H_0 = l_0 \alpha$$

выражается через постоянный размер  $l_0$  синусного рычага. Анализ выражения схемной погрешности показывает, что снижение  $\Delta\varphi_s$  для фиксированных значений  $\alpha$  может быть достигнуто по переменной  $l_1$ .

Расчетное значение  $l_1$ , обеспечивающее наименьшую схемную погрешность в крайних отметках шкалы, определяется из уравнения  $\Delta\varphi_s = 0$ .

Используемые функции положения синусного механизма отвечают условию симметричности. Функция положения  $\varphi$  и заданная функция  $\varphi^\circ$  симметричны относительно нулевого значения шкалы.

Рассматриваемый двухрычажный измерительный механизм (рис. 17) образован с помощью синусного и кулисного элементарных механизмов, последовательно соединенных между собой. В данном случае требование симметричности должно соблюдаться для всех механизмов, образующих измерительную цепь. Кулисный механизм подобран с таким расчетом, чтобы его функция положения в определенной мере компенсировала схемную погрешность синусного механизма. В двухрычажном механизме происходит внутренняя компенсация схемной погрешности синусного механизма за счёт кулисного механизма. Ускоренное движение рычага синусного механизма компенсируется замедленным перемещением ведомого рычага кулисного механизма.

После установления элементарной структуры общего измерительного механизма (рис. 17) решается задача определения его общей теоретической погрешности. Функция положения по перемещению синусного механизма имеет вид

$$\alpha = \arcsin H/l_1,$$

где  $H$  – величина перемещения измерительного стержня прибора;  $l_1$  – длина синусного рычага.

Тогда функциональная зависимость результирующего перемещения рассматриваемого двухрычажного симметричного механизма будет иметь вид

$$\varphi = \arcsin \frac{L}{l_2} \frac{H}{l_1} - \arcsin \frac{H}{l_1}. \quad (101)$$

Зависимость выходного перемещения кулисного рычага также может быть выражена в виде отрезка степенного ряда:

$$\varphi = \left( \frac{L}{l_2} - 1 \right) \frac{H}{l_1} + \frac{1}{6} \left[ \left( \frac{L}{l_2} \right)^3 - 1 \right] \frac{H^3}{l_1^3} + \frac{3}{40} \left[ \left( \frac{L}{l_2} \right)^5 - 1 \right] \frac{H^5}{l_1^5}. \quad (102)$$

Принимая  $z_1 = 228$ ;  $z_2 = 16$ ;  $R = 22$  мм унифицированного измерительного механизма и отсчетного устройства прибора (рис. 14), определим передаточное отношение  $i_2$ , связывающее линейное перемещение стрелки отсчетного устройства с угловым перемещением кулисного рычага ( $l_2$ ):

$$i_2 = \frac{z_1}{z_2} R = 313,3. \quad (103)$$

С учетом выражения (27) общая функция положения механизма, рассматриваемого в качестве базового, примет вид

$$y = 313,5 \left\{ \left( \frac{L}{i_2} - 1 \right) \frac{H}{l_1} + \frac{1}{6} \left[ \left( \frac{L}{l_2} \right)^3 - 1 \right] \frac{H^3}{l_1^3} + \frac{3}{40} \left[ \left( \frac{L}{l_2} \right)^5 - 1 \right] \frac{H^5}{l_1^5} \right\}. \quad (104)$$

В рассматриваемом случае измеряемое значение  $H$  изменяется от  $-0,14$  до  $+0,14$  мм.

Теоретическая погрешность схемы определяется разностью функций, выражающих законы движения реального и идеального механизмов,

$$\Delta y = y - y_0 H, \quad (105)$$

где  $y_0$  – номинальное передаточное отношение, равное 470 при цене деления 2 мкм и интервале деления 0,94 мм.

Подставив в (29) найденные выражения, получим

$$\begin{aligned} \Delta y = & \left[ 313,5 \left( \frac{L}{i_2} - 1 \right) \frac{1}{l_1} - 470 \right] H + 52,25 \left[ \left( \frac{L}{l_2} \right)^3 - 1 \right] \frac{H^3}{l_1^3} + \\ & + 23,51 \left[ \left( \frac{L}{l_2} \right)^5 - 1 \right] \frac{H^5}{l_1^5} \end{aligned} \quad (106)$$

Номинальные значения параметров схемы  $l^1, l^2, L, z^1, z^2$ , длина стрелки  $R$ , входное измеряемое перемещение  $H$ , в конечном итоге, определяют величину теоретической погрешности рассматриваемого рычажно-зубчатого измерительного механизма и отсчетного устройства, шкала которого градуирована единицей линейного перемещения.

Необходимо подчеркнуть, что все члены разложения частной функции в степенной ряд (26) имеют знак (+), так как отношение параметров  $\frac{L}{l^2}$  реального двухрычажного механизма всегда больше 1.

При этом необходимо принять во внимание основные свойства функции (25), касающиеся её симметричности, нечетности, диапазона изменения аргумента  $-1 \leq x \leq +1$ . Функция положения (25) является гладкой функцией на интервале непрерывности  $[-1, 1]$ . Для определения параметров рычажных измерительных механизмов целесообразно использовать разложение их функций в степенные ряды с целью образования многочленов, близких к многочленам наилучших равномерных приближений. Многочлены наилучших равномерных приближений образуются с помощью рекуррентной последовательности Чебышева

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x). \quad (107)$$

Последовательность многочленов  $T_n(x)$  определена для значений  $n = 1, 2, 3, \dots$ . По определению многочлена Чебышева начальным условиям  $n = 0, n = 1$  соответствуют  $T_0(x) = 1, T_1(x) = x$ . Закрытым интервалом значений переменной  $x$  является интервал  $[-1, 1]$ .

Погрешность интерполяции функций положения измерительных механизмов многочленами соответствующих степеней становится наименьшей, если в качестве узлов интерполяции применяются корни многочленов Чебышева. С учетом этого обстоятельства устанавливаем, что для функции (26), ограниченной тремя членами разложения, наилучшее равномерное приближение может осуществляться с помощью полинома Чебышева третьей степени:

$$T^n(x) = 4x^3 - 3x. \quad (108)$$

Значения некоторых параметров исследуемого механизма определим, исходя из условия наилучшего равномерного приближения гладкой функции многочленом фиксированной степени.

Задаваясь величинами параметров  $l^2 = 5$  мм,  $L = 27,54$  мм и приравняв коэффициенты полинома Чебышева (31) к коэффициентам соответствующих степеней многочлена (28) с заменой переменной  $x$  на  $H = 0,14$  мм, получим величину длины синусного рычага механизма  $l^1 = 3,01$  мм, исходя из минимума теоретической погрешности.

Здесь целесообразно привести частную функцию положения двухрычажного унифицированного измерительного механизма с ведущей внешней кулисой прибора (рис.14):

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{L}{l_2} \frac{H}{l_1}\right) + \arcsin\left(\frac{H}{l_1}\right). \quad (109)$$

Разложение рассматриваемой функции положения в виде отрезка степенного ряда имеет вид

$$\varphi = \left(\frac{L}{l_2} - 1\right) \frac{H}{l_1} + \frac{1}{6} \left[ \left(\frac{L}{l_2}\right)^3 - 1 \right] \frac{H^3}{l_1^3} + \frac{3}{40} \left[ \left(\frac{L}{l_2}\right)^5 - 1 \right] \frac{H^5}{l_1^5}. \quad (110)$$

Симметричная нечетная частная функция положения с диапазоном изменения аргумента  $-1 \leq x \leq +1$  имеет положительные члены разложения по аналогичным с многочленом (26) условиям. В соответствии с этим синтез элементной структуры двухрычажных измерительных механизмов может осуществляться по алгоритму наилучшего равномерного приближения с использованием коэффициентов полинома Чебышева  $T^n(x)$ .

### 1.2.5 Оптимальное сочетание типовых рычажных передач в измерительных механизмах

Задача синтеза средств линейных измерений решается в процессе проведения аналитических и экспериментальных исследований, направленных на снижение или исключение теоретической погрешности. Процедуры, связанные с достижением требуемой точности измерительных приборов и преобразователей контактного типа, сводятся к необходимости проведения синтеза структурных элементов измерительных механизмов. Элементный синтез множительных передач механизмов реализуется с помощью соответствующих функций положения.

Выбор рациональных конструкций измерительных механизмов производится по критерию минимума их теоретической погрешности, определяемой как разность между разложением в степенной ряд частной функции положения исследуемого механизма и его идеальной функцией.

Выше установлено, что для повышения точности измерители контактного типа оснащают рычажными механизмами, которые располагают на входе измерительной цепи и подбирают из различных сочетаний синусных и кулисных передач, обеспечивающих наименьшую теоретическую погрешность.

Повышение точности многорычажных измерительных механизмов базируется на принципе рационального комбинирования составом различных структурных элементов.

Наиболее предпочтительными при этом считаются механизмы, реализующие симметричный закон формирования выходной измеряемой величины.

Измерительную цепь устанавливают так, чтобы максимально скомпенсировать теоретическую погрешность различных по структурному типу составляющих передач.

Пусть функция  $\varphi^0(x) = B_1(x)$ , описывающая линейную зависимость входной величины  $x$  симметричного механизма, аппроксимируется многочленом седьмой степени:

$$\varphi = B^1 x + B^3 x^3 + B^5 x^5 + B^7 x^7,$$

где  $B^1, B^3, B^5, B^7$  – коэффициенты, зависящие от параметров звеньев механизма. Тогда общая теоретическая погрешность  $\Delta\varphi$  механизма определяется из выражения

$$\Delta\varphi = B_3 x^3 + B_5 x^5 + B_7 x^7. \quad (111)$$

В известных средствах универсального и активного контактного контроля, оснащаемых рычажными и рычажно-зубчатыми индикаторами, используют в большинстве случаев унифицированные отсчетные устройства, комплектуемые на базе двухрычажных синусно-кулисных механизмов с внутренним и внешним расположением рычагов и кулис, замкнутых на зубчатую передачу.

В качестве зубчатой передачи применяют одноступенчатый измерительный механизм выпускаемых в настоящее время индикаторных рычажно-зубчатых головок 1ИГ и 2ИГ с ценой деления 1 мкм и 2 мкм соответственно. Перечисленные рычажные и зубчатые механизмы отличаются только конструкцией отсчетного устройства.

Значения угловых перемещений входных синусных рычагов известных рычажных механизмов невелики (устанавливаются в пределах  $\pm 5^\circ$ ). В связи с этим для расширения пределов измерения используются многорычажные механизмы, которые, с одной стороны, являются повышающими передачами, а с другой – обеспечивают сравнительно высокую точность воспроизведения линейной функции перемещения.

Проведем схемный анализ симметричных двухрычажных механизмов (рис. 20 и рис.21) по поводу перспективности их использования для средств контактного контроля с расширенными пределами измерения и с фиксированными требованиями к точности (в пределах единиц микрометров).

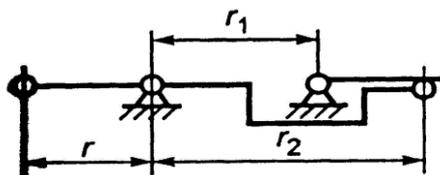


Рис. 20. Механизм с ведущим внешним кулисным рычагом

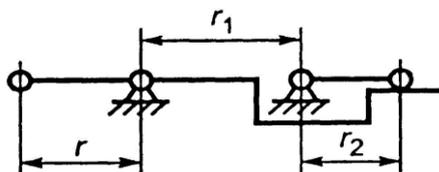


Рис. 21. Механизм с ведущей внешней кулисой

Известно, что функция положения синтезируемого двухрычажного механизма может быть заменена многочленом третьей степени

$$\varphi = B^1 x + B^3 x^3.$$

Теоретическая погрешность, обусловленная нелинейностью рычажных передач, будет определяться членом разложения  $B^3 x^3$ . Проанализируем поведение функции  $B^3 x^3$  при одновременном изменении схемных параметров кулисного механизма, сохраняя при этом постоянным общее передаточное отношение двухрычажного механизма.

Принимая во внимание тот факт, что коэффициенты  $B^1$  и  $B^3$  зависят от линейных параметров двухрычажных механизмов, задача нахождения их оптимальных значений сводится к минимизации члена  $B^3 x^3$  при условии сохранения общего передаточного отношения двухрычажной передачи.

Исследуем аналитическую зависимость коэффициента  $B^3$  от варьируемых схемных параметров на примере синусно-кулисного двухрычажного механизма (рис. 21). Разложение в степенной ряд частной функции положения рассматриваемого механизма записывается в виде

$$\varphi = \left( \frac{r_1}{r_2} + 1 \right) \frac{x}{r} + \frac{1}{6} \left[ \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^3 + 1 \right] \frac{x^3}{r^3}, \quad (112)$$

где  $r$  – длина синусного рычага;  $r_1$  – расстояние между опорами механизма;  $r_2$  – длина кулисного рычага.

Можно получить аналитическое соотношение для  $B_3$ , выразив функцию через параметр  $\alpha$  кулисной передачи, представленной на рис. 21,  $\alpha = 1 + r_1/r_2$ . Изменение значений  $\alpha$  производится при условии  $B^1 = \alpha/r = \text{const}$ . Зависимости  $B_3 = B_3(\alpha)$  для механизма с ведущим внешним кулисным рычагом (рис. 20) и механизма с ведущей внешней кулисой (рис. 21) используются для анализа и сопоставления систематических погрешностей.

Для снижения погрешности зубчатой части измерительного механизма в известных индикаторных рычажно-зубчатых головках устанавливают предельные значения передаточных отношений кулисных передач ( $4 \leq \alpha \leq 8$ ). Анализ зависимостей  $B_3 = B_3(\alpha)$  показывает, что синтезируемый кулисный механизм (рис. 21), который реализует функцию положения (33), имеет меньшую теоретическую погрешность. В рассмотренных измерительных механизмах одноступенчатая зубчатая передача расположена на выходе измерительной цепи. Систематическая погрешность таких измерительных механизмов имеет вид

$$\Delta y_1 = \frac{2}{m} \left[ \left( \frac{F'_{i1}}{z_1} + \frac{F'_{i2}}{z_2} \right) \right] R, \quad (113)$$

где  $F'_{i1}, F'_{i2}$  – кинематические погрешности зубчатого сектора  $z_1$  и зубчатого триба  $z_2$  соответственно;  $R$  – радиус стрелки, мм.

### 1.2.6 Приведенные, относительные и абсолютные погрешности

Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей назначают в форме **приведенных, относительных или абсолютных погрешностей** в зависимости от изменения погрешности в пределах диапазона измерений. При этом пределы допускаемой дополнительной погрешности, как правило, задаются в форме, отличной от формы выражения пределов допускаемой основной погрешности.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливают по фор-

муле

$$\Delta = \pm a \quad (114)$$

или

$$\Delta = \pm(a + bx) \quad (115)$$

Здесь:

- $\Delta$  - пределы допускаемой абсолютной основной погрешности в единицах измеряемой величины или в делениях шкалы;
- $x$  - значение измеряемой величины на входе (выходе) средств измерений или число делений по шкале;
- $a, b$  - положительные числа, не зависящие от величины  $x$ .

Допускается в обоснованных случаях пределы допускаемой абсолютной погрешности устанавливать по другим аналитическим зависимостям или с помощью графиков и таблиц. Для средств измерений, интервалы которых устанавливаются произвольно между выбираемыми отметками шкалы, допускается указывать, что погрешность каждого отдельного средства измерений не должна превышать установленной нормы допускаемой основной абсолютной погрешности.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности устанавливаются по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p, \quad (116)$$

где  $\gamma$  - пределы допускаемой приведенной основной погрешности, %;

$\Delta$  - пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, устанавливаемые по формуле (34);

$X_N$  - нормирующее значение, выраженное в тех же единицах величины, что и  $\Delta$ ;

$p$  - положительное число, выбираемое из ряда  $1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $(1,6 \cdot 10^n)$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $2,5 \cdot 10^n$ ;  $(3 \cdot 10^n)$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$  ( $n=1, 0, -1, -2$ , и т. д.).

Значения, указанные в скобках, не устанавливают для вновь разрабатываемых средств измерений. При одном и том же показателе степени  $n$  допускается устанавливать не более пяти различных пределов допускаемой основной погрешности (абсолютной или приведенной) для средств измерений конкретного вида.

Нормирующее значение  $X_N$  для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, а также для измерительных преобразователей с нулевым значением входного (выходного) сигнала на краю или вне диапазона измерений, устанавливают равным большему пределу измерений. Нормирующее значение устанавливается равным большему модулю пределов измерений, если нулевое значение этого сигнала находится внутри диапазона измерений.

Для электроизмерительных приборов с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений нормирующее значение устанавливается равным сумме модулей пределов измерений. Необходимо принять во внимание, что для средств измерений, оснащаемых шкалой с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений. Для средств измерений с установленным номинальным значением нормирующее значение устанавливают равным номинальному значению.

При этом для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой нормирующее значение устанавливают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы или часть шкалы, в единицах длины.

Пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm q, \quad (117)$$

если  $\Delta$  установлено по формуле (34), или по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{X_K}{x} \right| \right) - 1 \right], \quad (118)$$

где  $\delta$  - пределы допускаемой относительной основной погрешности, %;

$\Delta, x$  - соответствуют обозначениям в (34, 35);

$q$  - положительное число, выбираемое из ряда обозначений классов точности;

$X_K$  - больший (по модулю) из пределов измерений;

$c, d$  - положительные числа, выбираемые из ряда обозначений  $c$  учетом ранее принятых параметров и выражений:

$$c = b + d; d = \frac{a}{|X_K|}; \quad (119)$$

$a, b$  - в соответствии с (35).

*Примечание.* Практически равномерная шкала - шкала, длина делений которой отличается друг от друга не более чем на 30% и имеет постоянную цену делений.

Существенно неравномерная шкала - шкала с сужающимися делениями, для которой значение выходного сигнала, соответствующее среднему значению верхнего и нижнего пределов диапазона изменений входного (выходного) сигнала, находится в интервале между 65 и 100% длины шкалы, соответствующей диапазону изменений входного (выходного) сигнала.

Степенная шкала - шкала с расширяющимися или сужающимися делениями, отличная от шкал, указанных выше.

В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливаются по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы. В стандартах или технических условиях на средства измерений устанавливается минимальное значение показания  $x_0$ , которое обеспечивает применение принятого способа выражения пределов допускаемой относительной погрешности. Соотношение между числами  $c$  и  $d$  задается в нормативных документах или в стандартах на средства измерений конкретного вида.

Пределы допускаемых дополнительных погрешностей устанавливают:

- в виде постоянного значения для всей рабочей области влияющей величины или в виде постоянных значений по интервалам рабочей области влияющей величины;

- путем указания отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, соответствующего регламентированному интервалу влияющей величины, к этому интервалу;

- путем указания зависимости предела допускаемой дополнительной погрешности от влияющей величины (предельной функции влияния);

- путем указания функциональной зависимости пределов допускаемых отклонений от номинальной функции влияния.

Пределы допускаемой дополнительной погрешности, как правило, устанавливают в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности.

Предел допускаемой вариации выходного сигнала следует устанавливать в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности или в делениях шкалы. Пределы допускаемой нестабильности, как правило, устанавливают в виде доли предела допускаемой основной погрешности. Пределы допускаемых погрешностей

должны быть выражены не более чем двумя значащими цифрами.

Правила построения и примеры обозначения классов точности в документации и на средствах измерений приведены в табл. 8.

Метрологические характеристики для вольтметров нормируют по ГОСТ 8711-78:

- предел допускаемой основной погрешности и соответствующие нормальные условия;
- пределы допускаемых дополнительных погрешностей и соответствующие рабочие области влияющих величин;
- пределы допускаемой вариации показаний, невозвращение указателя к нулевой отметке;
- для мер электродвижущей силы (нормальных элементов) по ГОСТ 1954-82;
- пределы допускаемой нестабильности э. д. с. в течение года или трех дней;
- сопротивление изоляции между электрической цепью нормального элемента и его корпусом.

Таблица 8

Форма выражения погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности в документации
Приведенная	По формуле (36): - если нормирующее значение выражено в единицах величины на входе (выходе) средств измерений; - если нормирующее значение принято равным длине шкалы или ее части.	$\gamma = \pm 1,5$	Класс точности 1,5
		$\gamma = \pm 0,5$	Класс точности 0,5
Относительная	По формуле (37)	$\delta = \pm 0,5$	Класс точности 0,5
	По формуле (38)	$\delta = \pm \left[ 0,02 + 0,01 \left( \frac{X_k}{x} \right) - 1 \right]$	Класс точности 0,02/0,01
Абсолютная*	По формуле (34) или (35)		Класс точности М
Относительная*			Класс точности С

\* Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме абсолютных или относительных погрешностей, классы точности обозначают в документации прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами.

Метрологические характеристики плоскопараллельных концевых мер длины нормируют по ГОСТ 9038-83:

- пределы допускаемых отклонений от номинальной длины, плоскопараллельности;
- пределы допускаемого изменения длины в течение года.

*Примеры.*

1. Электроизмерительному прибору, предназначенному для измерений силы постоянного тока в диапазонах 0-10, 0-20 и 0-50 А, могут быть для отдельных диапазонов присвоены различные классы точности.

2. Электроизмерительному прибору, предназначенному для измерений электрического напряжения и сопротивления, могут быть присвоены два класса точности: один как вольтметру, другой - как омметру.

3. Класс точности для концевых мер длины может быть присвоен при выпуске мер из производства или изменен в процессе эксплуатации, если в результате последней отклонение длины меры от номинального значения превысило предел допускаемых отклонений для класса точности, присвоенного ранее.

4. Для милливольтметра термоэлектрического термометра с пределами измерений 200 и 600°C нормирующее значение  $X_N = 400^\circ\text{C}$ .

5. Для частотомеров с диапазоном измерений 45-55 Гц и номинальной частотой 50 Гц нормирующее значение  $X_N = 50$  Гц.

6. Для мер электродвижущей силы (нормальных элементов) задают классы точности, определяемые пределами допускаемого изменения их э. д. с. в течение года, выраженными в процентах.

### 1.2.7 Классификация серийно выпускаемых и экспериментальных средств измерений

Общая классификация наиболее распространенных и серийно выпускаемых средств технических измерений приведена в табл. 9.

Таблица 9

Название средств измерений	Измеряемая величина		
	Линейная		Угловая
	Измерение	Контроль	
Измерительные головки типа ИЧ	+	+	
Измерительные головки с наконечником бокового действия			
ИРБ, ИРТ	+	+	
Штангенциркули			
Приборы с нониусной шкалой			
ШЦ	+		
ШЦЦ	+		
Угломеры			
УМ			+
УН			+
Микрометрические приборы			
МК	+		

Название средств измерений	Измеряемая величина		
	Линейная		Угловая
	Измерение	Контроль	
МРИ	+	+	
МН	+	+	
Скобы с отсчетным устройством			
СР		+	
Измерительные головки			
1ИГ		+	
2ИГ		+	
Многооборотные индикаторные головки			
1МИГ		+	
2МИГ		+	
Пружинно-оптические приборы			
Оптикатор		+	
Оптико-механические приборы			
БМИ	+		+
УИМ	+		+
Длиномеры	+		
Проекторы			+
Приборы для измерения шероховатости			
МИС-11	+		
МИИ-4	+		
Электромеханические приборы			
Профилограф-профилометр	+		
Электроконтактный преобразователь		+	
Виброконтактный преобразователь	+	+	

В табл.9 приведена номенклатура серийно выпускаемых отечественными фирмами и экспериментально освоенных средств технических измерений. Принципиальные схемы ряда конструкций, метрологические характеристики, принципы действия и правила использования средств измерений содержатся в разделе 1.2.

### 1.2.8 Однократное измерение

#### Априорная информация

Подавляющее большинство измерений с помощью серийно выпускаемых приборов 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.

У серийно выпускаемых измерительных приборов шкалы отсчетных устройств в большинстве случаев уже проградуированы в значениях измеряемой величины. Первый

этап решения обратной задачи теории измерений, следовательно, выполнен, и в результате измерительной процедуры снимается показание (14), в которое при необходимости нужно внести поправку. После внесения поправки получается результат измерения (15), (16), который в отличие от значения измеряемой величины является случайным и в этом смысле не представляет интереса. На втором этапе решения обратной задачи неслучайное значение измеряемой величины отождествляется со средним значением результата измерения, область определения которого устанавливается, исходя из априорной (от лат. a priori - предшествующей опыту, в данном случае измерению) информации.

Таким образом, 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 предшествовавших измерений. Если ее нет, то используется информация о том, на сколько среднее значение результата измерения может отличаться от его случайного значения, полученного в результате измерительного эксперимента. Такая информация бывает представлена классом точности средства измерений. В тех случаях, когда измерения выполняются не в нормальных, а в рабочих условиях, то должно быть известно значение аддитивной, или мультипликативной поправки  $\theta$ . Если оно неизвестно, то с одинаковой вероятностью значение поправки может быть любым в пределах от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$ . Без априорной информации выполнение однократного измерения бессмысленно.

### Пример 9

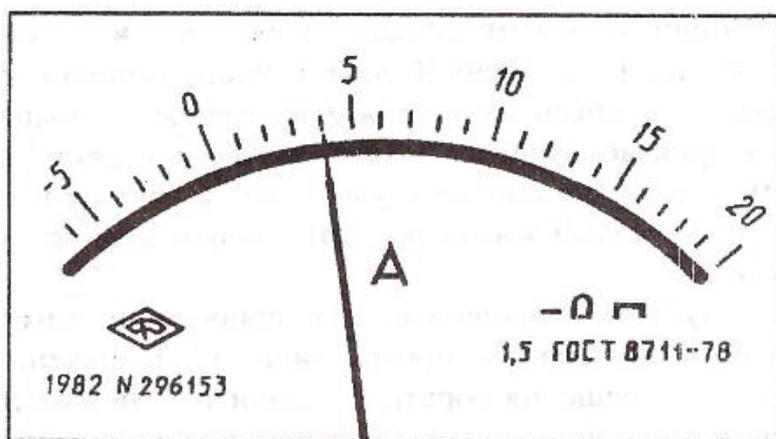


Рис. 22. Лицевая панель амперметра класса точности 1,5 с равномерной шкалой

Указатель отсчетного устройства амперметра класса точности 1,5, шкала которого показана на рис. 10, остановился на отметке 4 А. Чему равна измеряемая сила тока?

**Решение.** При таком обозначении класса точности измеряемая сила тока не может отличаться от той, которую показывает указатель, более чем на 0,3 А. Поэтому измеряемая сила тока находится в интервале от 3,7 до 4,3 ампера.

### Пример 10

Расстояние между двумя плоскопараллельными поверхностями измерено с помощью набора концевых мер длины класса точности 0,2 с номинальными значениями 10, 3 и 2 мм. Чему равно расстояние между этими поверхностями?

**Решение.** 1. Стандартные неопределенности по типу В централизованного равномерного закона распределения вероятности отсчета конечных мер длины равны:

$$u_1 = \frac{10 \cdot 0,2}{100\sqrt{3}} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} \text{ мм}; \quad (120)$$

$$u_2 = \frac{3 \cdot 0,2}{100\sqrt{3}} = \frac{0,06}{\sqrt{3}} \text{ мм}; \quad (121)$$

$$u_3 = \frac{2 \cdot 0,2}{100\sqrt{3}} = \frac{0,04}{\sqrt{3}} \text{ мм}. \quad (122)$$

2. Расстояние между плоскопараллельными поверхностями равно 15 мм с суммарной неопределенностью

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0,04 \text{ мм}. \quad (123)$$

Последний пример позволяет коснуться правила округления. В метрологии принято среднее квадратичное 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 тех случаях, когда значащая цифра старшего разряда меньше 4 (в промежуточных вычислениях сохраняется на одну значащую цифру больше). Вследствие этого, при квадратичном суммировании

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (124)$$

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

$$\begin{aligned} 0,9025u^2 &< u^2 - u_i^2; \\ u_i^2 &< 0,9025u^2; \\ u_i &< 0,312u. \end{aligned}$$

Таким образом, слагаемым  $u_i \leq \frac{1}{3}u$  всегда можно пренебречь.

### Порядок действий при однократном измерении

Последовательность действий при однократном измерении показана на рис. 23. Предварительно проводится тщательный анализ априорной информации. В ходе этого анализа уясняется физическая сущность изучаемого явления, уточняется его модель, определяются меры защиты (экранирование, компенсация электрических и магнитных полей и др.). Определяются 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 рабо-

те средства измерений, исключение или компенсацию влияющих факторов, выполняется основная измерительная процедура — получение одного значения отсчета (или показания, если шкала отсчетного устройства уже проградуирована в значениях измеряемой величины).

Если измерение выполняется не в нормальных, а в рабочих условиях, то в показание вносится поправка, значение которой может быть известно точно или с некоторой неопределенностью. Внесением поправки заканчивается процедура получения результата однократного измерения. После этого выбирается вероятность, с которой будет установлен интервал, в пределах которого находится значение измеряемой величины, и определяются границы этого интервала.

Таким образом, конечной целью измерительного эксперимента является получение достоверной количественной информации о значении измеряемой величины  $Q$ . На пути к определению пределов, в которых находится значение измеряемой величины, получение результата однократного измерения служит промежуточным этапом. Проанализируем несколько конкретных вариантов.

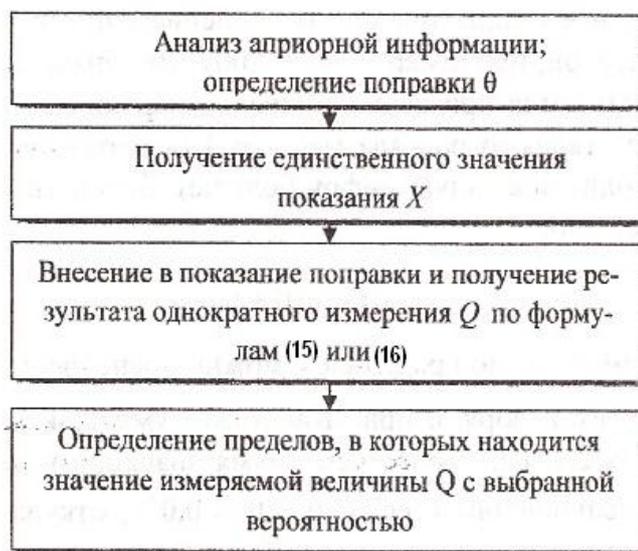


Рис.23. Порядок выполнения однократного измерения

**Вариант 1.** Априорная информация: отсчет, а следовательно, и показание подчиняются нормальному закону распределения вероятности с известной стандартной неопределенностью типа А. Измерение будет выполняться в рабочих условиях, и в показание нужно внести аддитивную поправку, значение которой равно  $\theta$ .

В этом случае результат измерения  $Q$  (см. формулу (16)) будет подчиняться нормальному закону распределения вероятности с известным средним квадратичным отклонением  $\sigma_Q = \sigma_x$ , смещенному по отношению к закону распределения вероятности показания  $X$  на значение поправки  $\theta$ , внесение которой обеспечит правильность измерения (см. рис. 7). Для более наглядного решения обратной задачи по данным табл. 6 построим график зависимости доверительного интервала от доверительной вероятности  $P$ . На рис. 24 ему соответствует верхняя кривая.

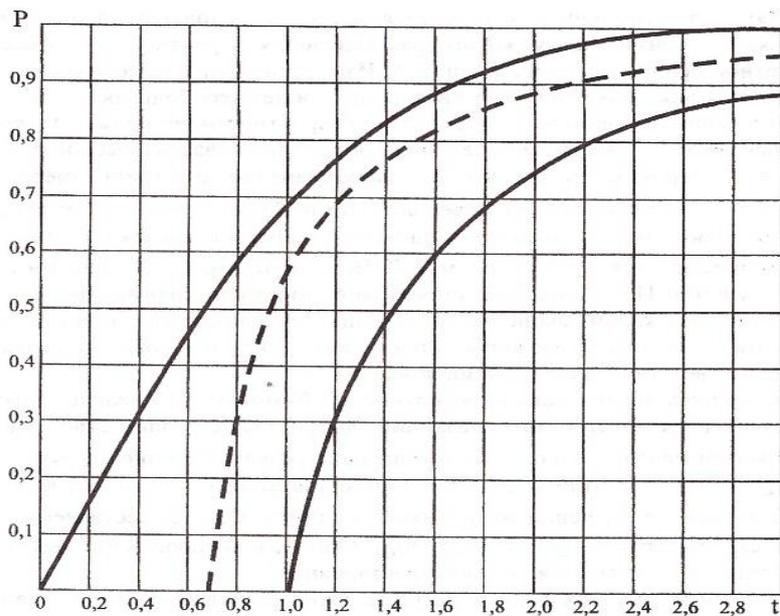


Рис. 24. Вероятность попадания отдельного значения результата измерения в окрестность среднего значения

Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , можно по верхней кривой на рис. 24 определить параметр  $t$ , показывающий, на сколько  $\sigma_Q$  полученное экспериментально значение результата однократного измерения  $Q_i = X_i + \theta$  может отличаться от среднего значения  $\bar{Q}$ , отождествляемого со значением измеряемой величины  $Q$ . С той же вероятностью значение измеряемой величины  $Q$  находится в интервале  $[Q_i - t\sigma_Q; Q_i + t\sigma_Q]$ . Эта измерительная информация записывается в форме

$$Q = Q_i - t\sigma_Q \dots Q_i + t\sigma_Q \text{ с вероятностью } P. \quad (124)$$

Все значения  $Q$  в интервале  $[Q_i - t\sigma_Q; Q_i + t\sigma_Q]$  равноправны.

**Вариант 2.** Априорная информация: отсчет, а следовательно, и показание подчиняются неизвестному закону распределения вероятности с известной стандартной неопределенностью типа А. Измерение будет выполняться в нормальных условиях и во внесении поправки нет необходимости.

В данном случае закон распределения вероятности результата измерения будет неизвестен, известным будет лишь его среднее квадратичное отклонение  $\sigma_Q = \sigma_x$ . Вероятность того, что отдельное значение результата измерения  $Q$ , при любом законе распределения вероятности не будет отличаться от среднего значения  $\bar{Q}$  больше чем наполовину доверительного интервала  $[\bar{Q} - t\sigma_Q; \bar{Q} + t\sigma_Q]$ , устанавливается неравенством П.Л. Чебышева. Иными словами, неравенство П. Л. Чебышева определяет нижнюю границу вероятности того, что ни при каком законе распределения вероятности случайное значение результата измерения не окажется за пределами доверительного интервала. Эта граница соответствует нижней кривой на рис. 24.

Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , можно по нижней кривой на рис. 24 найти параметр  $t$ , показывающий на сколько  $\sigma_Q$ , экспериментально полученное значение результата однократного измерения  $Q_i = X_i$  может отличаться от среднего значения  $\bar{Q}$ . С той же вероятностью неслучайное значение измеряемой величины  $Q$ , отождествляемое с  $\bar{Q}$ , находится в интервале  $[Q_i - t\sigma_Q; Q_i + t\sigma_Q]$ . Форма, в которой записывается эта измерительная информация, приведена в варианте 1.

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

$$P(\bar{Q} - t\sigma_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + t\sigma_Q) \geq 1 - \frac{4}{9} \cdot \frac{1}{t^2}. \quad (125)$$

Соответствующая граница на рис. 24 показана пунктиром.

**Вариант 3.** Априорная информация представлена классом точности измерительного прибора. Измерение будет выполняться в нормальных условиях, так что во внесении поправки необходимости нет.

Так как поправка в показание не вносится, закон распределения вероятности результата измерения совпадает с законом распределения вероятности показания и  $\bar{X} = \bar{Q}$ . Значение измеряемой величины  $Q$ , отождествляемое с  $\bar{Q}$  и  $\bar{X}$ , не может отличаться от значения  $X_i$ , которое показывает указатель отсчетного устройства, больше чем на соответствующее классу точности число процентов.

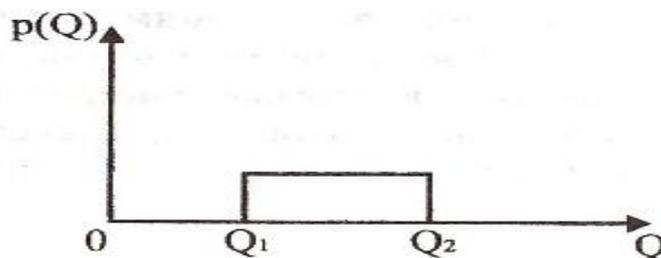


Рис. 25. Ситуационная модель нецентрированного равномерного закона распределения вероятности

Поскольку среди возможных значений  $Q$  нет предпочтительных, постольку математической моделью такой ситуации является равномерный закон распределения вероятности  $Q$  на интервале возможных значений  $[Q_1; Q_2]$ , показанный на рис. 25. Мерой неопределенности принятой ситуационной модели считают аналог дисперсии нецентрированного равномерного закона распределения вероятности, обозначаемого буквой в степени  $u^2$  с индексом  $Q$ . Аналог математического ожидания случайной величины в интервале от  $Q_1$  до  $Q_2$  равен

$$M(X) = \frac{Q_1 + Q_2}{2}. \quad (126)$$

Аналог дисперсии нецентрированного равномерного закона распределения вероятности случайной величины  $x$  в интервале от  $Q_1$  до  $Q_2$  определяется интегралом

$$u_Q^2 = \frac{1}{Q_2 - Q_1} \int_{Q_1}^{Q_2} \left(x - \frac{Q_1 + Q_2}{2}\right)^2 dx. \quad (127)$$

Примем обозначения

$$v = x - \frac{Q_1 + Q_2}{2},$$

$$dx = dv. \quad (128)$$

При  $x = Q_1, v = \frac{Q_1 - Q_2}{2}, x = Q_2, v = \frac{Q_2 - Q_1}{2}.$

Таким образом, аналог среднего квадратичного отклонения не центрированного равномерного закона распределения вероятности (стандартная неопределенность типа В) определяется из выражения

$$u_Q = \frac{Q_2 - Q_1}{2\sqrt{3}}. \quad (129)$$

Аналогичным образом, определяется аналог среднего квадратичного отклонения центрированного равномерного закона распределения вероятности случайной равновероятной величины, например, в интервале от  $-a$  до  $a$ , равен

$$u_Q = \frac{a}{\sqrt{3}}.$$

При этом аналог математического ожидания случайной величины в интервале от  $-a$  до  $a$  имеет вид

$$M(X) \equiv 0. \quad (136)$$

Функция распределения вероятности  $Q$  согласно рис. 25

$$F(Q) = \int_{Q_1}^Q p(Q) dQ = \int_{Q_1}^Q \frac{1}{Q_2 - Q_1} dQ = \frac{1}{Q_2 - Q_1} Q \Big|_{Q_1}^Q = \frac{Q - Q_1}{Q_2 - Q_1}. \quad (137)$$

Вероятность того, что значение  $Q$  находится слева от середины интервала  $[Q_1; Q_2]$  на удалении не более чем  $ku_Q$ , равна

$$\frac{1}{2} - F\left(\frac{Q_1 + Q_2}{2} - ku_Q\right),$$

а вероятность того, что оно находится в окрестности середины интервала  $\pm ku_Q$ , в два раза больше

$$P = 1 - 2F\left(\frac{Q_1 + Q_2}{2} - ku_Q\right). \quad (138)$$

Это аналог доверительной вероятности, называемый уровнем доверия. Коэффициент  $k$ , являющийся аналогом параметра  $t$ , называется коэффициентом охвата, а произведение  $ku_Q$  - расширенной неопределенностью.

Используя выражение (25) при

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2} - ku_Q$$

и принимая во внимание (см. п. 1.1), что

$$Q_2 - Q_1 = 2u_Q\sqrt{3}, \quad \frac{Q_1 + Q_2}{2} - Q_1 = u_Q\sqrt{3},$$

окончательно получим

$$P = \frac{k}{\sqrt{3}}. \quad (139)$$

На рис. 26 по формуле (139) построена линейная зависимость уровня доверия  $P$  от коэффициента охвата  $k$  при равномерном законе распределения вероятности  $Q$ .

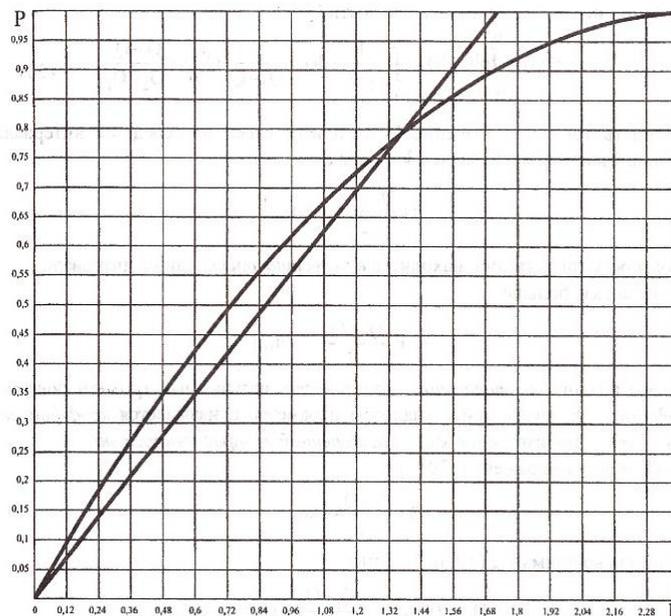


Рис. 26. Зависимость уровня доверия  $P$  от коэффициента охвата  $k$

Задавшись уровнем доверия  $P$ , можно, используя эту зависимость, определить коэффициент охвата  $k$ , показывающий, на сколько  $u_Q$  значение измеряемой величины  $Q$  может отличаться от своего среднего значения, равного  $X_i$ , т.е. указать интервал  $[X_i - ku_Q; X_i + ku_Q]$ , в котором значение измеряемой величины  $Q$  находится с выбранным уровнем доверия. Эта измерительная информация записывается в форме

$$Q = X_i - ku_Q \dots X_i + ku_Q \text{ с уровнем доверия } P$$

(140)

### В примере 9

- $I = (3,7 \dots 4,3)A$  с уровнем доверия 1;
- $I = (3,704 \dots 4,298)A$  с уровнем доверия 0,99;
- $I = (3,714 \dots 4,286)A$  с уровнем доверия 0,95;
- $I = (3,73 \dots 4,27)A$  с уровнем доверия 0,9;
- $I = (3,827 \dots 4,173)A$  с уровнем доверия 0,58;

$I = (3,85...4,15)A$  с уровнем доверия 0,5.

**Вариант 4.** Априорная информация представлена классом точности измерительного прибора. Измерение будет выполняться в рабочих условиях, и в показание нужно внести аддитивную поправку, значение которой равно  $\theta$ .

Внесение аддитивной поправки смещает математическую модель  $p(\bar{X})$  влево или вправо в зависимости от знака  $\theta$  так, как это показано, например, на рис. 27. Неопределенность измерения при этом не меняется. Задавшись уровнем доверия  $P$ , можно по тому же графику на рис. 26 определить коэффициент охвата  $k$ , показывающий, на сколько  $u_Q$  значение измеряемой величины  $Q$  может отличаться от своего среднего значения, равного  $Q_i = X_i + \theta$ , т.е. указать интервал  $[Q_i - ku_Q; Q_i + ku_Q]$ , в котором значение измеряемой величины  $Q$  находится с выбранным уровнем доверия. Эта измерительная информация записывается в форме

$$Q = Q_i - ku_Q \dots Q_i + ku_Q \text{ с уровнем доверия } P \tag{141}$$

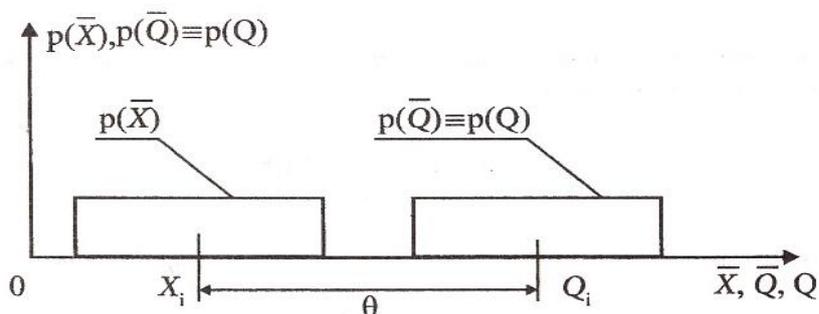


Рис.27. Внесение аддитивной поправки, значение которой известно точно

**Вариант 5.** Априорная информация представлена классом точности измерительного прибора. Измерение будет выполняться в условиях, при которых в показание нужно внести аддитивную поправку, значение которой находится в интервале от  $\theta_1$  до  $\theta_2$ .

На рис. 28 показаны ситуационные модели  $p(\bar{X})$ ,  $p(\theta)$  и их композиция

$$p(\bar{Q}) \equiv p(Q) \tag{142}$$

в предположении, что неопределенности показания и поправки равны. Композицией двух равномерных законов распределения вероятности с одинаковой дисперсией является треугольный закон (закон распределения вероятности Симпсона) со средним значением

$$Q_i = X_i + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \text{ и параметрами, показанными на рис. 28.}$$

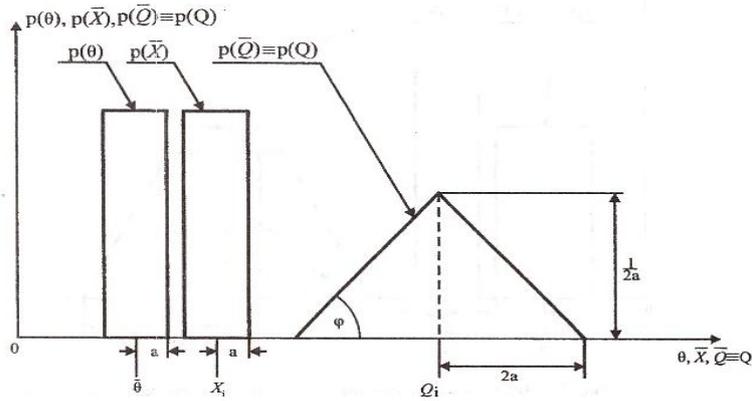


Рис.28. Внесение аддитивной поправки, значение которой неизвестно

При  $Q_i - 2a \leq Q \leq Q_i$

$$p(Q) = [Q - (Q_i - 2a)] \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q - (Q_i - 2a)}{4a^2}. \quad (143)$$

Обозначим  $Q - (Q_i - 2a) = x$ , тогда

$$F(x) = \int_0^x \frac{x}{4a^2} dx = \frac{x^2}{8a^2} = \frac{[Q - (Q_i - 2a)]^2}{8a^2}. \quad (144)$$

Вероятность того, что значение  $Q$  находится слева от  $Q_i$  на удалении не более чем  $ku_Q$ , равна

$$\frac{1}{2} \frac{[(Q_i - ku_Q) - (Q_i - 2a)]^2}{8a^2},$$

а вероятность того, что оно находится в окрестности  $Q_i$  на удалении не более чем  $\pm ku_Q$ , в два раза больше

$$P = 1 - \frac{[(Q_i - ku_Q) - (Q_i - 2a)]^2}{4a^2}. \quad (145)$$

Для треугольного закона распределения вероятности  $u_Q = \frac{2a}{\sqrt{6}}$ .

Отсюда

$$P = \frac{k}{\sqrt{6}} \left( 2 - \frac{k}{\sqrt{6}} \right). \quad (146)$$

По формуле (41) построена (рис.26) нелинейная зависимость уровня доверия  $P$  от коэффициента охвата  $k$  при треугольном законе распределения вероятности  $Q$ . Используя эту зависимость для заданных значений уровня доверия  $P$ , можно определить коэффициент охвата  $k$ , показывающий, на сколько  $u_Q$  значение измеряемой величины  $Q$  может отличаться от своего среднего значения, равного

$X_i + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ , т.е. указать интервал

$$\left[ X_i + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - ku_Q; X_i + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + ku_Q \right], \quad (147)$$

в котором значение измеряемой величины  $Q$  находится с выбранным уровнем доверия. Эта измерительная информация записывается в форме

$$Q = X_i + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - k u_Q \dots X_i + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + k u_Q \quad \text{с уровнем доверия } P \quad (148)$$

## 1.2.9 Многократное измерение

### 1.2.9.1 Модели выполнения измерительных процедур

Функциональной основой выполнения измерительных процедур являются модели создания и анализа процедур измерений различных свойств объектов и восстановления аналитических зависимостей (оценок числовых характеристик и др.) на основе полученных экспериментальных данных. В общем виде процедуру измерений представим моделями взаимодействующих множеств  $W, Z, U, M, Y$ , отвечающих условиям определенной метрологической задачи

$$W \rightarrow Z \rightarrow U \rightarrow M \rightarrow Y.$$

Совокупность  $W$  - представляет собой множество априорных значений измеряемой величины  $W$ . Количество элементов  $w_i$  множества  $W$  зависит от априорной информации относительно условий опыта и установленных требований и норм измеряемой величины. Информация о свойствах измеряемой величины подвергается детальному изучению и анализу. На стадии априорного анализа используют информацию о свойствах измеряемой величины (непрерывная, дискретная), о её наиболее вероятном интервале размеров, о предполагаемом законе распределения, о требуемой точности измерений. Интервал элементов (чисел) измеряемой величины может быть задан множеством  $W$ , ограниченным предельными числами, например, слева  $C$  или справа  $D$  (возможно слева и справа). С помощью кванторов данное утверждение запишется в виде

$$W = \{ \forall w \in W \rightarrow (C \leq w \leq D) \}. \quad (149)$$

Вещественные множества, располагающиеся на числовой оси измеряемой величины, образуют объединения и пересечения множеств. Объединению и пересечению множеств  $F$  и  $W$  на их числовой оси соответствуют символьные обозначения  $F \cup W$  и  $F \cap W$ .

Второе множество  $Z$  отражает совокупность способов и методов измерений. Наиболее известными являются абсолютные, относительные, прямые, косвенные, совокупные, совместные измерения. Множество  $Z$  характеризует не только обширную общность традиционных способов и методов измерений, но и устанавливает определенную связь с метрологическими характеристиками (с систематической погрешностью или с другими погрешностями) соответствующих средств измерений.

Множество  $U$  называется выборочным одномерным или многомерным множеством, элементами которого являются значения  $u_1, \dots, u_1, \dots, u_n$  измеряемой величины, полученные при проведении эксперимента. Элементы множества  $U$ , представляющие собой совокупность формализованных показателей или количественные значения измеряемой величины, выражаются в формате методов использования измерительных шкал порядка, интервалов, отношений.

Множеству  $M$  принадлежат методы и математические операции нахождения оценок параметров. Основу математических действий при этом составляют процедуры определения оценок числовых характеристик. К основным числовым характеристикам законов

распределения относятся следующие:  $M(x)$  – математическое ожидание,  $D(x)$  – дисперсия,  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение,  $p(x)$  – плотность распределения вероятности,  $F(x)$  – функция распределения вероятности.

Принадлежащие числовым характеристикам распределения случайной величины среднее значение (математическое ожидание) и среднее квадратичное отклонение вычислить невозможно в силу конечного числа измерений, получаемых экспериментальным путем. Оценку числовой характеристики получают на основе конечного числа экспериментальных данных. Оценки должны быть состоятельными, несмещенными и эффективными.

Состоятельной считается оценка, которая сходится по вероятности ( $n \rightarrow \infty$ ) к оцениваемой числовой характеристике.

Несмещенной называется такая оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемой числовой характеристике.

Эффективной является одна из нескольких рассматриваемых несмещенных оценок, которая имеет наименьшее рассеяние относительно среднего значения.

Оценками математического ожидания  $M(x)$  и среднего квадратичного отклонения  $\sigma$  являются среднее арифметическое значение  $\hat{Q}_n$  и стандартное отклонение  $s$  соответственно.

Множество  $Y$  содержит апостериорную информацию об оценках результатов измерений в узаконенных единицах измеряемых величин.

Измерения одной и той же величины постоянного размера выполняются при повышенных требованиях к точности измерений. Подобные измерения характерны для профессиональной деятельности метрологов.

Многократное измерение выполняется с целью накопления и эффективного использования апостериорной информации для повышения точности результата измерения. Апостериорная информация содержится в массиве экспериментальных данных, полученных независимым путём. Измерение, выполняемое приборами различной точности, называется неравноточным измерением.

Если значение измеряемой величины не меняется во времени или этим изменением можно пренебречь, выполняется одним средством измерений в одинаковых условиях, то такое измерение называется равноточным.

Измеряемые размеры в необходимых случаях могут перепроверяться различными службами. При этом массив экспериментальных данных может быть сформирован из нескольких серий равноточных и неравноточных измерений.

### 1.2.9.2 Измерение с равноточным отсчетом

Результатом многократного измерения одной и той же величины постоянного размера с равноточными значениями отсчета является среднее арифметическое из  $n$  независимых значений, образующих полученный массив экспериментальных данных

$$\hat{Q}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (150)$$

Оно является оценкой среднего значения результата измерения, получение которого на практике невозможно из-за ограниченного объема экспериментальных данных.

Дисперсия среднего арифметического

$$\sigma_{\bar{Q}_n}^2 = D\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n D(Q) = \frac{n\sigma_Q^2}{n^2} = \frac{\sigma_Q^2}{n} \quad (151)$$

в  $n$  раз меньше дисперсии результата измерения. Это фундаментальное положение лежит в основе широко применяющихся во многих областях науки и техники методов накопления, усреднения, уменьшения разброса, сглаживания экспериментальных данных.

Соответственно стандартное отклонение среднего арифметического, или стандартная неопределенность типа А, результата многократного измерения согласно (43), равно

$$S_{\bar{Q}_n} = \frac{S_Q}{\sqrt{n}}, \quad (152)$$

т. е. в  $\sqrt{n}$  раз меньше стандартной неопределенности типа А результата отдельного измерения.

Алгоритм действий при выполнении многократного измерения с равноточными значениями отсчета показан на рис. 29. При анализе априорной информации рассматриваются условия, в которых будет проводиться измерение. Если измерение будет выполняться в рабочих условиях, то определяются значения поправок, которые нужно будет вносить в показание. Устанавливается, есть ли основания считать, что результат измерения будет подчиняться нормальному закону распределения вероятности, или таких оснований нет. После этого выполняется основная измерительная процедура: получение в одних и тех же условиях, тем же оператором и с помощью одного и того же средства измерений  $n$  независимых значений отсчета. Если отсчетное устройство измерительного прибора не градуировано в значениях измеряемой величины, то с помощью характеристики градуировки все значения отсчета переводятся в значения показания, после чего при необходимости в них вносятся поправки, которые могут отличаться одна от другой из-за изменения во времени влияющих факторов. Для простоты будем считать их аддитивными и известными точно.

При этом 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 многократном измерении одной и той же величины постоянного размера ошибки проявляются в том, что отдельные значения в массиве экспериментальных данных заметно отличаются от остальных. Иногда это отличие настолько большое, что ошибка очевидна. Остается понять и устранить ее причину или просто отбросить это значение как заведомо неверное. Если отличие незначительное, то оно может быть следствием как ошибки, так и рассеяния отсчета, а следовательно, показания и результата измерения, которые являются случайными. Нужно поэтому иметь какое-то правило, руководствуясь которым принимать решения в сомнительных случаях.

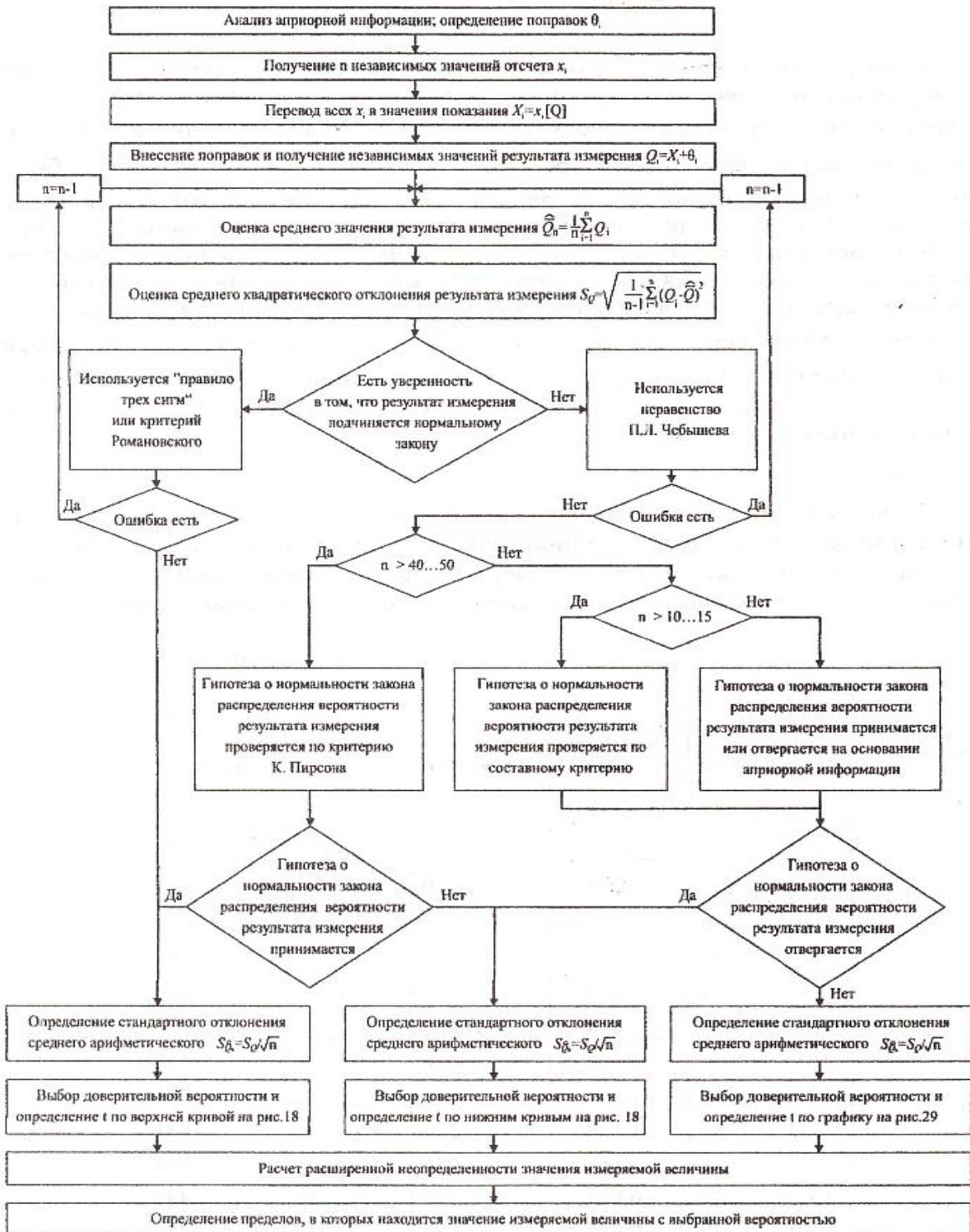


Рис.29. Порядок выполнения многократного измерения с равнозначными значениями отсчета

## Обнаружение и исключение ошибок

### Правило трех сигм

Если результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то все его случайные значения  $Q_i$  с вероятностью 0,997 концентрируются в окрестности среднего значения  $\bar{Q} \pm 3\sigma_Q$  и появление какого-нибудь отдельного значения за пределами интервала  $[\bar{Q} - t\sigma_Q; \bar{Q} + t\sigma_Q]$  с большой уверенностью можно рассматривать как следствие ошибки. Такое значение должно быть исключено из массива экспериментальных данных. Это правило называется правилом трех сигм. На практике вместо числовых характеристик распределения вероятности результата измерения используются их точечные оценки. Если оказывается, что сомнительное значение  $Q_i$  отличается от среднего арифметического  $\hat{Q}_n$  больше чем на  $3S_Q$ , то такое значение отбрасывается. После этого  $\hat{Q}_n$  и  $S_Q$  рассчитываются заново и проверяется следующее сомнительное значение, если такое окажется. Если нет, то исключение ошибок на этом заканчивается.

### Пример 11

15 независимых числовых значений результата измерения температуры в помещении по шкале Цельсия приведены во второй графе табл. 8. Согласно априорной информации результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности. Нет ли ошибок в экспериментальных данных?

Таблица 10

i	$t_i$	$t_i - \hat{t}_{15}$	$(t_i - \hat{t}_{15})^2$	$t_i - \hat{t}_{14}$	$(t_i - \hat{t}_{14})^2$
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
П	39	-0,014	196	- 0,021	441
14	39	- 0,014	196	-0,021	441
15	40	- 0,004	016	-0,011	121

**Решение.** 1. Среднее арифметическое значение результата измерения'

$$\hat{t}_{15} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = 20,404 . \quad (137)$$

2. Необходимые для определения стандартного отклонения результата измерения вспомогательные вычисления сведены в третью и четвертую графы табл. 10.

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{t}_{15})^2} = 0,033. \quad (153)$$

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

4. Без восьмого значения<sup>1</sup>

$$\hat{t}_{14} = 20,411. \quad (154)$$

5. Результаты вспомогательных вычислений при повторном определении стандартного отклонения сведены в пятую и шестую графы табл. 6.

$$S_t = 0,016. \quad (155)$$

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

При небольших массивах экспериментальных данных среднее арифметическое значение подчиняется закону распределения вероятности Стьюдента (В.С. Госсета). В этом случае нужно пользоваться критерием Романовского, согласно которому отбрасывается сомнительное значение результата измерения, отличающееся от среднего арифметического  $\hat{Q}_n$  больше чем на  $tS_Q$ , где  $t$  (значение коэффициента Стьюдента) выбирается из табл. 7.

Если нет уверенности в том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то для обнаружения и исключения ошибок можно воспользоваться неравенством П.Л. Чебышева. Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , по нижней кривой на рис. 12 следует найти параметр  $t$ , показывающий самое большое  $\sigma_Q$ , на которое случайные значения результата измерения могут отличаться от его среднего значения. Вместо числовых характеристик распределения вероятности результата измерения используются их точечные оценки. Если оказывается, что сомнительное значение  $Q_i$  отличается от среднего арифметического  $\hat{Q}_n$  больше чем на  $tS_Q$ , то такое значение отбрасывается. Затем  $\hat{Q}_n$  и  $S_Q$  рассчитываются вновь и с проверкой следующего сомнительного значения, если такое окажется.

При использовании неравенства П.Л. Чебышева доверительная вероятность выбирается не столь высокой как в случае применения правила трех сигм. Как следует из нижнего графика на рис. 24, доверительный интервал будет тогда слишком широким. Уже при  $P = 0,94$   $t = 4$ , т. е. можно сказать, что действует правило четырех сигм. Если из априорной

<sup>1</sup> При вычислении среднего арифметического часто приходится уменьшать или увеличивать число слагаемых. Для того чтобы не повторять всю процедуру суммирования и не перегружать память вычислительных устройств, удобно пользоваться формулой

$$\hat{Q}_{n\pm 1} = \frac{1}{n \pm 1} (n\hat{Q}_n \pm Q_j). \quad (156)$$

информации следует, что результат измерения подчиняется симметричному закону распределения вероятности, то на рис. 24 можно пользоваться средней (пунктирной) кривой. В этом случае правилу трех сигм соответствует доверительная вероятность  $P = 0,95$ .

После проверки ошибок в массиве экспериментальных данных и исключения их, следует определить: подчиняется или нет результат измерения нормальному закону распределения вероятности.

Таблица 11

n	P													
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999	
2	0,16	0,33	0,51	0,73	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6	
3	0,14	0,29	0,45	0,62	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6	
4	0,14	0,28	0,42	0,58	0,77	0,89	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9	
5	0,13	0,27	0,41	0,57	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6	
6	0,13	0,27	0,41	0,56	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9	
7	0,13	0,27	0,40	0,55	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0	
8	0,13	0,26	0,40	0,55	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4	
9	0,13	0,26	0,40	0,54	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0	
10	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8	
11	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6	
12	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5	
13	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3	
14	0,13	0,26	0,39	0,54	0,69	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,0	4,2	
15	0,13	0,26	0,39	0,54	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1	
16	0,13	0,26	0,39	0,54	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0	
17	0,13	0,26	0,39	0,54	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0	
18	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0	
19	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	3,9	
20	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9	
21	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8	
22	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8	
23	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8	
24	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8	
25	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7	
26	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7	
27	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7	
28	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7	
29	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7	
30	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7	
40	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,6	
60	0,13	0,25	0,39	0,53	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,5	
120	0,13	0,25	0,39	0,53	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,6	3,4	
∞	0,13	0,25	0,39	0,52	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3	

### Проверка соответствия распределения вероятности результата измерения нормальному закону

Для проверки нормальности распределения вероятности результата измерения нужно построить гистограмму (эмпирическую плотность вероятности). Она наглядно представляет характер закона распределения вероятности, если соблюдаются следующие правила при ее построении:

1. Интервалы  $\Delta Q$ , на которые разбивается ось абсцисс, выбирают по возможности одинаковыми.
2. Число интервалов  $k$  устанавливается в соответствии со следующими рекомендациями:

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

3. Масштаб выбирается таким, чтобы высота гистограммы относилась к ее основанию примерно как 5 к 8

Иногда по виду гистограммы можно с большой уверенностью заключить, подчиняется или нет результат измерения нормальному закону распределения вероятности. Если, например, гистограмма имеет вид, показанный на рис. 31,а, то результат измерения определенно не подчиняется нормальному закону. Если же гистограмма имеет вид, показанный на рис. 31,б, то возникает вопрос: достаточно ли хорошо она соответствует теоретической кривой плотности вероятности нормального закона распределения, показанной сплошной линией? Для разрешения этого сомнения нужно иметь правило, руководствуясь которым можно было бы принимать то или иное решение.

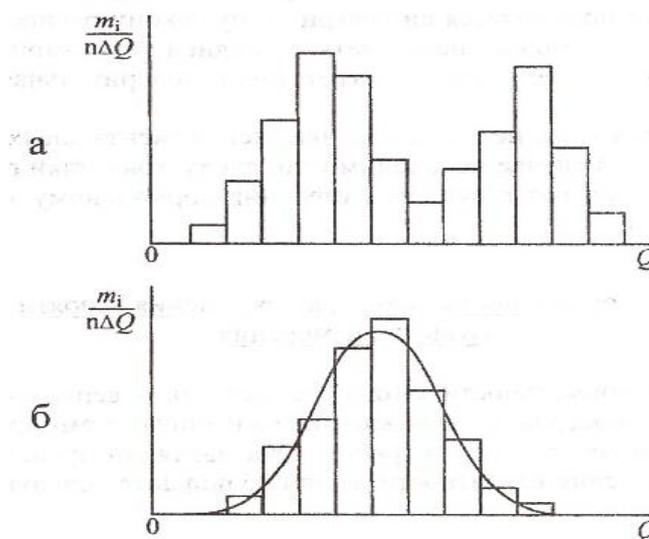


Рис. 30. Гистограммы, построенные по экспериментальным данным

Существуют несколько так называемых критериев согласия, по которым проверяются гипотезы о соответствии экспериментальных данных тому или иному закону распределения вероятности. При количестве независимых значений результата измерения  $n > 40 \dots 50$  наиболее распространенным из них является критерий К. Пирсона.

При использовании этого критерия за меру расхождения экспериментальных данных с теоретическим законом распределения вероятности 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 весовым коэффициентом  $n / P_i$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n}{P_i} \left( \frac{m_i}{n} - P_i \right)^2 \quad (157)$$

Если расхождение случайно, то  $\chi^2$  подчиняется  $\chi^2$  - распределению (хи- квадрат распределению К. Пирсона). Кривые интегральной функции этого распределения представлены на рис. 32. Интегральная функция определяет вероятность того, что случайное число примет значение, меньшее аргумента этой функции. Поэтому, задавшись значением интегральной функции распределения К. Пирсона  $F(\chi_o^2)$ , можно проверить, больше или меньше ее аргумента  $\chi_o^2$  (см. рис. 31) вычисленное значение  $\chi^2$ . Если меньше, то с выбранной вероятностью  $\chi^2$  можно считать случайным числом, подчиняющимся  $\chi^2$  - распределению К. Пирсона, т. е. гипотеза о соответствии эмпирического закона распределения вероятности теоретическому подтверждается<sup>2</sup>. Если же окажется, что  $\chi^2 > \chi_o^2$ , то с той же вероятностью признают, что  $\chi^2$  не является случайным числом, подчиняющимся распределению К. Пирсона. Это означает, что расхождение между эмпирической и теоретической плотностями вероятности результата измерения не случайно, т. е. гипотеза о соответствии эмпирического закона распределения вероятности теоретическому закону не подтверждается.

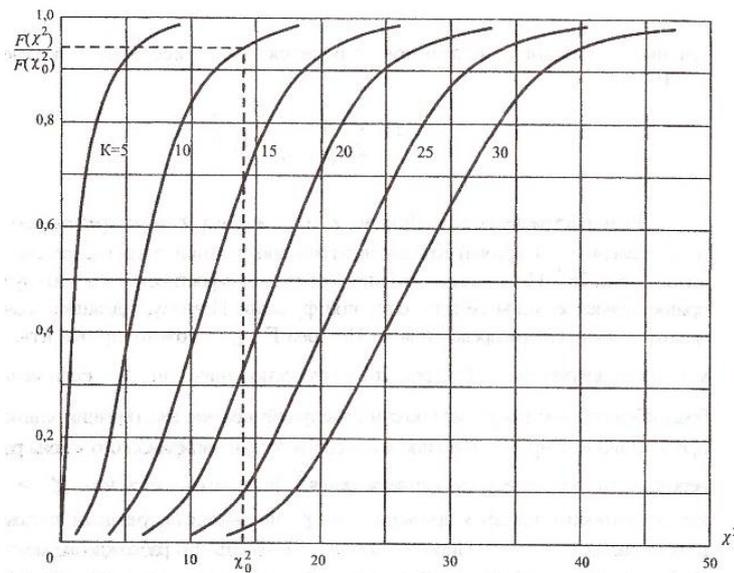


Рис. 31. Интегральная функция распределения вероятности К. Пирсона

<sup>1</sup>Здесь k соответствует числу интервалов при проверке соответствия закона распределения вероятности нормальному закону.

<sup>2</sup>Результаты проверок по критериям согласия не являются доказательствами.

### Пример 12.

100 независимых числовых значений результата измерения, каждое из которых повторилось m раз, приведены в первой графе табл. 12.

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

Таблица 12

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

**Решение.** 1. Используя результаты вспомогательных вычислений, приведенные в третьей графе табл. 12, найдем среднее арифметическое значение результата измерения

$$\hat{Q}_{100} = 8,63. \quad (158)$$

2. Используя результаты вспомогательных вычислений, приведенные в четвертой, пятой и шестой графах табл. 12, найдем стандартное отклонение результата измерения

$$S_Q = 0,13.$$

3. Ни одно из значений результата измерения не отличается от среднего арифметического больше чем на  $4S_Q = 0,52$ . Согласно неравенству П.Л. Чебышева с вероятностью не менее 0,94 можно считать, что ошибок нет.

4. Для получения представления о характере закона распределения вероятности результата измерения, на рис. 33 по данным табл. 11, построим гистограмму. Вид гистограммы позволяет предположить, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

Таблица 13

Интервалы	$m_i$	$m_i/n\Delta Q$
8,2...8,3	0	0
8,3...8,4	3	0,3
8,4...8,5	9	0,9
8,5...8,6	18	1,8
8,6...8,7	35	3,5
8,7...8,8	21	2,1

Интервалы	$m_i$	$m_i/n\Delta Q$
8,8...8,9	13	1,3
8,9...9,0	1	0,1
9,0...9,1	0	0

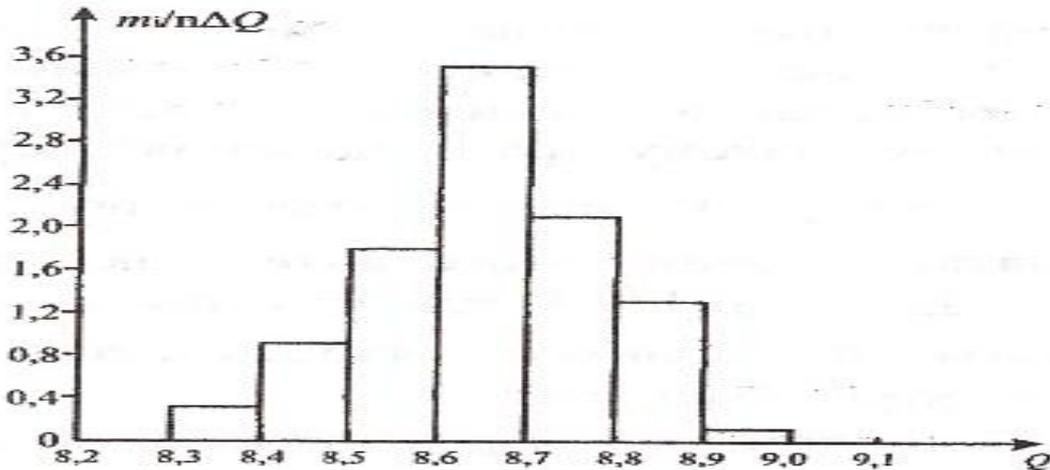


Рис. 32. Гистограмма, построенная по данным табл. 11

5. Правдоподобие этой гипотезы проверим по критерию К. Пирсона. При использовании критерия К. Пирсона в каждом интервале должно быть не менее пяти независимых значений результата измерения. В соответствии с этим образуем интервалы так, как это показано во второй графе табл. 14.

Таблица 14

$i$	Интервал $[Q_{i-1}; Q_i]$	$m_i$	$t_i$	$L(t_i)$	$P_i$	$m_i - nP_i$	$\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$
1	$[-\infty; 8,425]$	7	-1,614	-0,4467	0,0533	1,67	0,523
2	$[8,425; 8,4751]$	5	-1,220	-0,3888	0,0579	-0,79	0,108
3	$[8,475; 8,5251]$	8	-0,827	-0,2959	0,0929	-1,29	0,179
4	$[8,525; 8,5751]$	10	-0,433	-0,1676	0,1283	-2,83	0,624
5	$[8,575; 8,6251]$	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	$[8,725; 8,7751]$	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

6. Определим на сколько  $S_Q$  и в каком направлении отстоит от среднего арифметического правая граница  $Q_i$  каждого интервала

$$t_i = \frac{Q_i - \hat{Q}_{100}}{S_Q} = \frac{Q_i - 8,63}{0,13}. \quad (159)$$

Полученные значения параметра  $t_i$  внесем в четвертую графу табл. 14.

7. По значению  $t_i$  из верхнего графика на рис. 24 можно определить, с какой вероятностью отдельное значение результата измерения, подчиняющееся нормальному закону распределения вероятности, попадает в интервал  $[\hat{Q} - t_i S_Q; \hat{Q} + t_i S_Q]$ .

С вероятностью в два раза меньшей оно попадает в левую или правую половину этого интервала. Эта вероятность представляет собой функцию Лапласа  $L(t_i)$ , так что для повышения точности расчетов можно пользоваться не графиком, а табл. 6. Полученные из табл. 6 значения  $L(t_i)$  занесены в пятую графу табл. 14.

8. Теоретическая вероятность  $P_i$  попадания в  $i$ -й интервал отдельного значения результата измерения, подчиняющегося нормальному закону,

$$P_i = L(t_i) - L(t_{i-1}). \quad (160)$$

Принимая во внимание, что  $L(-\infty) = -0,5$ , а  $L(\infty) = 0,5$  поместим рассчитанные значения  $P_i$  в шестую графу табл. 9.

9. В седьмую и восьмую графы внесены результаты остальных вспомогательных вычислений. Суммирование чисел в восьмой графе дает  $\chi^2 = 2,528$ .

10. Из графика на рис. 30 видно, что рассчитанное значение  $\chi^2 < \chi_{0,95}^2$ , которое соответствует, например, вероятности 0,95. Обычно вероятность, с которой принимается решение, выбирается равной 0,9 ... 0,95. Таким образом, можно принять гипотезу о том, что результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

Проверка нормальности распределения вероятности результата измерения с помощью критерия К. Пирсона дает хорошие результаты для  $n > 40 \dots 50$ . При  $10 \dots 15 < n < 40 \dots 50$  применяется так называемый составной критерий  $d$ . Сначала рассчитывается

$$d = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - \hat{Q}_n|}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_n)^2}}. \quad (161)$$

и проверяется условие

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max}, \quad (162)$$

где  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$  зависят от вероятности  $P^*$ , с которой принимается их интервал по табл. 15.

Если это условие соблюдается, то дополнительно проверяются периферийные значения в массиве экспериментальных данных. При  $10 \leq n \leq 20$  считается допустимым отклонение одного из независимых значений результата измерения от среднего арифметического больше чем на  $2,5 S_Q$ , при  $20 < n \leq 50$  - двух, что соответствует доверительной вероятности  $P^{**} \approx 0,98$ . Несоблюдения хотя бы одного из этих двух условий достаточно для того, чтобы гипотеза о нормальности закона распределения вероятности результата измерения была отвергнута. В противном случае гипотеза принимается с вероятностью  $P = P^* + P^{**} - 1$ .

Таблица 15

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

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.

### Определение пределов, в которых находится значение измеряемой величины

При многократном измерении с равноточными значениями отсчета и нормальном законе распределения вероятности результата измерения решение обратной задачи состоит в отождествлении математического ожидания среднего арифметического  $M(\hat{Q}_n)$  со значением измеряемой величины  $Q$ . Закон распределения вероятности среднего арифметического является композицией законов распределения вероятности  $n$  слагаемых. При  $n \rightarrow \infty$  в соответствии с центральной предельной теоремой он стремится к нормальному закону распределения, независимо от того, каким законом распределения вероятности подчиняются слагаемые. Так что при больших массивах экспериментальных данных можно считать, что результат многократного измерения  $\hat{Q}_n$  всегда подчиняется нормальному закону распределения вероятности, а

$$M(\hat{Q}_n) = \bar{Q} \equiv Q. \quad (163)$$

На рис. 33 показаны плотности вероятности результата измерения, подчиняющегося нормальному закону, и его среднего арифметического значения.

В том и другом случаях показана ширина доверительного интервала  $4\sigma_Q$  и  $4\sigma_{\hat{Q}_n}$  при доверительной вероятности 0,95. Задавшись доверительной вероятностью  $P_i$  по верхней кривой на рис. 24 можно определить параметр  $t$ , показывающий, на сколько  $S_{\hat{Q}_n}$  полученное экспериментально значение среднего арифметического  $\hat{Q}_n$  может отличаться от его

математического ожидания  $M(\hat{Q}_n)$ , отождествляемого со значением измеряемой величины  $Q$ . С той же вероятностью значение измеряемой величины  $Q$  находится в интервале

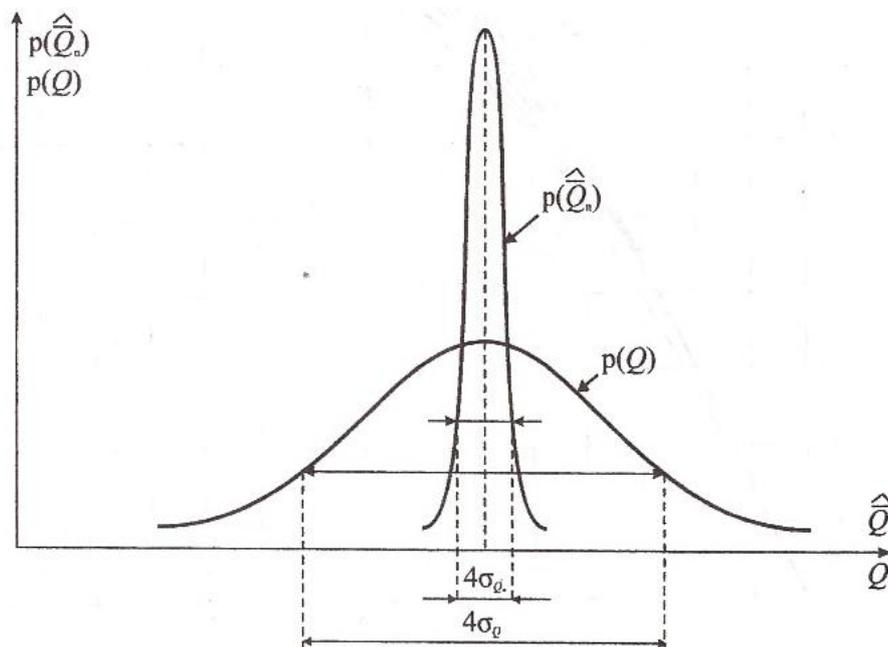


Рис. 33. Графики плотности вероятности результата измерения и его среднего арифметического значения, подчиняющихся нормальному закону распределения вероятности

$$\left[ \hat{Q}_n - tS_{\hat{Q}_n}; \hat{Q}_n + tS_{\hat{Q}_n} \right]. \quad (164)$$

Соответствующая измерительная информация записывается в форме

$$Q = \hat{Q}_n - tS_{\hat{Q}_n} \dots \hat{Q}_n + tS_{\hat{Q}_n} \text{ с вероятностью } P. \quad (165)$$

При небольшом объеме экспериментальных данных, если результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности, то среднее арифметическое подчиняется закону распределения вероятности Стьюдента с математическим ожиданием

$$M(S_{\hat{Q}_n}) = \bar{Q} \equiv Q. \quad (166)$$

При увеличении  $n$  распределение вероятности Стьюдента быстро приближается к нормальному, становясь почти неотличимым от него уже при  $n > 40 \dots 50$ .

На рис. 35 приведены зависимости вероятности попадания среднего арифметического  $S_{\hat{Q}_n}$ , подчиняющегося закону распределения вероятности Стьюдента, в окрестность его математического ожидания  $M(S_{\hat{Q}_n})$  при различных  $n$ , для большей точности расчетов можно пользоваться табл. 6.

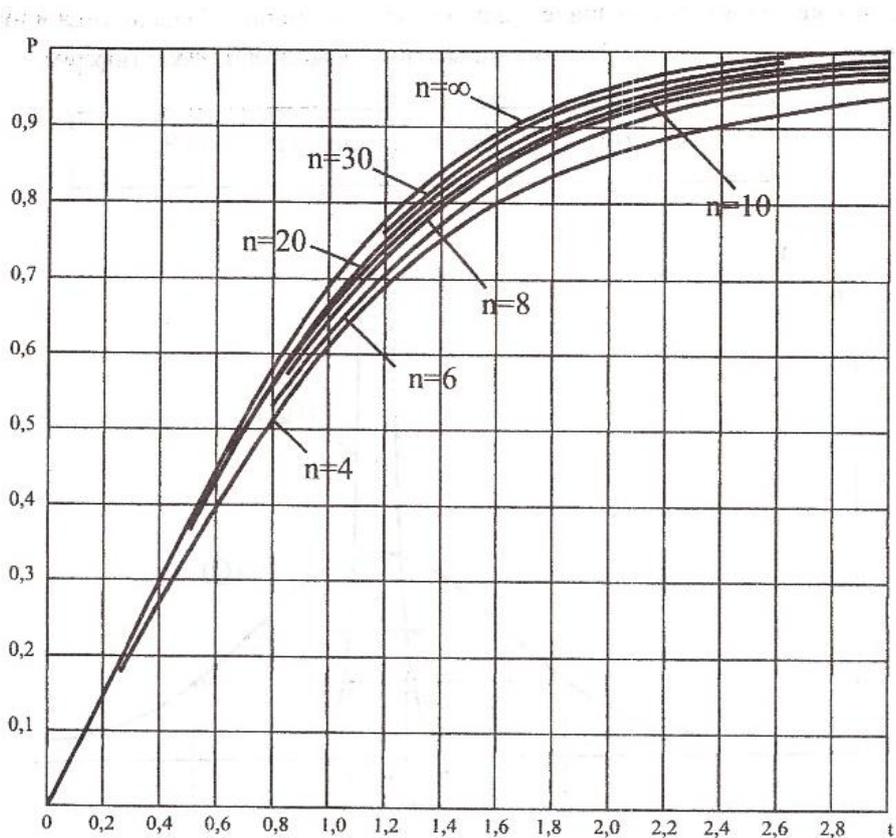


Рис. 34. Вероятность попадания среднего арифметического в окрестность его математического ожидания

Задавшись доверительной вероятностью  $P$ , можно по кривой, соответствующей определенному  $n$ , определить параметр  $t$ , показывающий, на сколько  $S_{\hat{Q}_n}$  полученное экспериментально значение среднего арифметического  $\hat{Q}_n$  может отличаться от его математического ожидания  $M(\hat{Q}_n)$ , отождествляемого со значением измеряемой величины  $Q$ . С той же вероятностью значение измеряемой величины  $Q$  находится в интервале  $[\hat{Q}_n - tS_{\hat{Q}_n}; \hat{Q}_n + tS_{\hat{Q}_n}]$ . Форма записи этой информации не отличается от приведенной выше.

При небольшом объеме экспериментальных данных, если результат измерения не подчиняется нормальному закону распределения вероятности, определение закона распределения вероятности среднего арифметического представляет достаточно сложную задачу. Среднее арифметическое в этом случае может оказаться неэффективной оценкой, но его все равно целесообразно использовать, так как стандартное отклонение среднего арифметического при любом законе распределения в  $\sqrt{n}$  раз меньше стандартного отклонения результата измерения.

С заданной доверительной вероятностью  $P$ , можно по нижней кривой на рис. 24 определить параметр  $t$ , показывающий самое большое количество  $S_{\hat{Q}_n}$ , на которое полученное экспериментально значение среднего арифметического  $\hat{Q}_n$  может отличаться от его математического ожидания  $M(\hat{Q}_n)$ , отождествляемого со значением измеряемой величины  $Q$ . С той же вероятностью значение измеряемой величины  $Q$  находится в интервале  $[\hat{Q}_n - tS_{\hat{Q}_n}; \hat{Q}_n + tS_{\hat{Q}_n}]$ . Форма записи этой измерительной информации приведена выше.

Если согласно априорной информации результат измерения подчиняется симметричному закону распределения вероятности, то его среднее арифметическое значение тоже подчиняется симметричному закону. В этом случае вместо нижней кривой на рис. 24 можно пользоваться средней кривой, показанной пунктиром.

### **1.3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

#### **1.3.1. Единство измерений**

Под единством измерений понимается такое их состояние, при котором обеспечивается достоверность измерений, а значения измеряемых величин выражаются в узаконенных единицах. Достоверность - показатель качества измерительной информации, характеризующий степень уверенности в том, что значение измеренной величины находится в указанном интервале. Количественной характеристикой (мерой) достоверности служат доверительная вероятность и уровень доверия. При одном и том же результате измерения выбором доверительной вероятности, или уровня доверия, можно обеспечить любую достоверность измерительной информации. Следовательно, достоверность не относится к числу показателей качества результата измерения. Она не рассчитывается а posteriori, а задается в виде основного требования к качеству измерительной информации. Достоверность измерительной информации - является условием единства измерений.

Под обеспечением единства измерений понимается деятельность, направленная на установление и применение научных, правовых, организационных и технических основ, правил, требований, норм и средств, необходимых для достижения заданного уровня единства измерений. Обеспечение единства измерений направлено на защиту прав и законных интересов граждан, установленного правопорядка и экономики Российской Федерации от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

Научной основой обеспечения единства измерений является наука об измерениях — метрология. Один из ее разделов - «Законодательная метрология» - служит нормативно-правовой основой обеспечения единства измерений. Организационную основу обеспечения единства измерений составляют государственные службы обеспечения единства измерений, метрологические службы федеральных органов исполнительной власти и метрологические службы юридических лиц. Технической основой обеспечения единства измерений служит система воспроизведения единиц СИ и передачи информации об их размерах всем без исключения средствам измерений.

#### **1.3.2 Техническая основа обеспечения единства измерений**

Единицы Международной системы воспроизводятся с помощью специальных технических средств, называемых эталонами. Эталон - это техническое устройство, обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы с целью передачи информации о её 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. Каждый эталон состоит из воспроизводящей части и приспособлений или устройств, обеспечивающих съем и передачу информации о размере единицы.

Эталоны основных единиц SI большей частью воспроизводят их в соответствии с определениями. 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, частоты и длины состоит из двух эталонных комплексов. Первый из них находится под Москвой во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Он воспроизводит единицу времени секунду со стандартной неопределенностью типа A  $10^{-10}$  с как промежуток времени, равный 9192631770 периодам сверхвысокочастотного электромагнитного излучения, испускаемого атомами цезия-133 в нагретом состоянии.

Единица длины метр в Международной системе единиц выражается через единицу времени - секунду и фундаментальную физическую константу - скорость света в вакууме. Так как значение этой фундаментальной физической константы считается известным точно, то во втором эталонном комплексе, находящемся в Санкт-Петербурге во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии (ВНИИМ) им. Д.И. Менделеева, метр воспроизводится со стандартной неопределенностью типа A, равной  $5 \cdot 10^{-10}$  м.

Для передачи информации о размерах секунды и метра средствам измерений в состав эталона входят квантово-механические часы, интерференционный компаратор для аттестации концевых и штриховых мер длины, многочисленные вспомогательные приспособления.

Единица массы - килограмм - воспроизводится 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 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 ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Стандартная неопределенность типа A воспроизведения килограмма гирей составляет  $(1...2) \cdot 10^{-8}$  кг. Кроме гири в состав государственного первичного эталона единицы массы входят еще эталонные весы для съема и передачи информации о размере единицы массы.

Единицей температуры Цельсия является градус Цельсия (символ °C), размер которого равен кельвину по определению. Разность температур может быть выражена в Кельвинах и градусах Цельсия.

МТШ-90 включает в себя несколько диапазонов. В диапазоне температур свыше 0°C фиксированными точками являются:

- тройная точка воды - 273,16 К (0,01°C);
- температура плавления галлия - 302,9146 К (29,7646°C);
- температура затвердевания индия - 429,7485 К (156,5985°C);
- температура затвердевания олова - 505,078 К (231,928°C);
- температура затвердевания цинка - 692,677 К (419,527°C);
- температура затвердевания алюминия - 933,473 К (660, 323°C);
- температура затвердевания серебра - 1234,93 К (961,78°C);
- точка затвердевания золота - 1337,33 К (1064,18°C);
- точка затвердевания меди - 1357,77 К (1084, 62°C).

Под температурой плавления или затвердевания понимается температура равновесия жидкой и твердой фаз металла при давлении 101325 Па. Интерполяция осуществляется при помощи платиновых термометров сопротивления. В диапазоне температур от 0 до 961,78 °С неопределенность типа А находится в пределах от 0,00005 до 0,002 К.

В диапазоне температур свыше 961,78°С при воспроизведении единицы температуры применяется аппаратура, позволяющая измерять температуру тел по собственному тепловому излучению. Метрологические характеристики государственного первичного эталона в этом диапазоне:

Температура, °С	Неопределенность типа В, °С	Неопределенность типа А, °С
961,78	0,1	0,15
2500	0,3	1,4

Единица силы электрического тока - ампер - воспроизводится не может по определению, 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. Это использовалось в существовавшем до недавнего времени государственном первичном эталоне единицы силы электрического тока - ампера, хранящемся во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. В основу его было положено взаимодействие электрических токов в последовательно соединенных коаксиальных соленоидах (катушках) с однослойной обмоткой. Наружный соленоид крепился неподвижно, а внутренний, подвешенный к одному из плеч коромысла весов, при включении электрического тока втягивался внутрь неподвижного с силой

$$F = k \cdot I^2, \quad (167)$$

где расчетный коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от геометрических соотношений в электродинамической системе. На равноплечих весах эта сила уравнивалась массой гирь. Согласно расчетам при массе уравнивающих гирь около 8 г сила электрического тока  $I$  составляет 1 ампер. Стандартная неопределенность типа А воспроизведения ампера этим эталоном не превышала  $4 \cdot 10^{-6}$  А.

В настоящее время государственный первичный эталон единицы силы электрического тока основан на использовании квантовых эффектов в сверхпроводниках. Это нестационарный эффект Джозефсона, позволяющий воспроизводить единицу электродвижущей силы и электрического напряжения - вольт, и квантовый эффект Холла, позволяющий воспроизводить единицу электрического сопротивления - ом. Основными элементами аппаратуры, воспроизводящей значения силы тока 1 мА и 1 А, являются мера напряжения на основе эффекта Джозефсона, криогенная мера сопротивления, криогенный компаратор постоянного тока.

Эталон ампера имеет следующие характеристики: относительную неопределенность типа А -  $5 \cdot 10^{-8}$ , относительную неопределенность типа В -  $2 \cdot 10^{-7}$ .

Для воспроизведения производных единиц используются основные единицы SI. Информация о размерах единиц закладывается в средства измерений при их производстве. Она содержится либо в номинальном значении меры, либо в значениях отметок на шкалах отсчетных устройств, либо в градуировочных таблицах и графиках. В таком виде эта информация хранится на протяжении всего периода эксплуатации средств измерений. Правильность и точность заложенной в средство измерений информации о размере единицы устанавливается на государственных испытаниях головных образцов средств измерений с

целью утверждения типа. В дальнейшем сохранность этой информации контролируется при поверках или калибровках.

Соответствие единицы измерений ее определению, содержащемуся в Международной системе единиц, проще всего было бы проверить, сравнив ее с единицей, воспроизводимой государственным эталоном. Но парк средств измерений насчитывает многие тысячи и даже миллионы экземпляров, а государственный эталон один. Поэтому приходится прибегать к многоступенчатой процедуре, схема которой показана на рис. 36. В прямоугольных рамках помещаются названия эталонов, стандартная неопределенность по типу А и стандартная неопределенность по типу В, с которой они воспроизводят единицу. В верхних полях находятся:

- первичный эталон, предназначенный для воспроизведения единиц с наивысшей в стране точностью и передачи размера единицы вторичным эталонам;
- вторичные эталоны.

По метрологическому назначению вторичные эталоны подразделяют:

- на эталоны сравнения, применяемые для межлабораторных и международных сличений;
- эталоны-копии, применяемые для передачи размера единицы рабочим эталонам;
- эталоны-свидетели, применяемые для контроля сохранности государственного эталона и замены его в случае утраты (в настоящее время применяются не во всех схемах передачи).

Под полем вторичных эталонов располагается поле рабочих эталонов высшей точности.

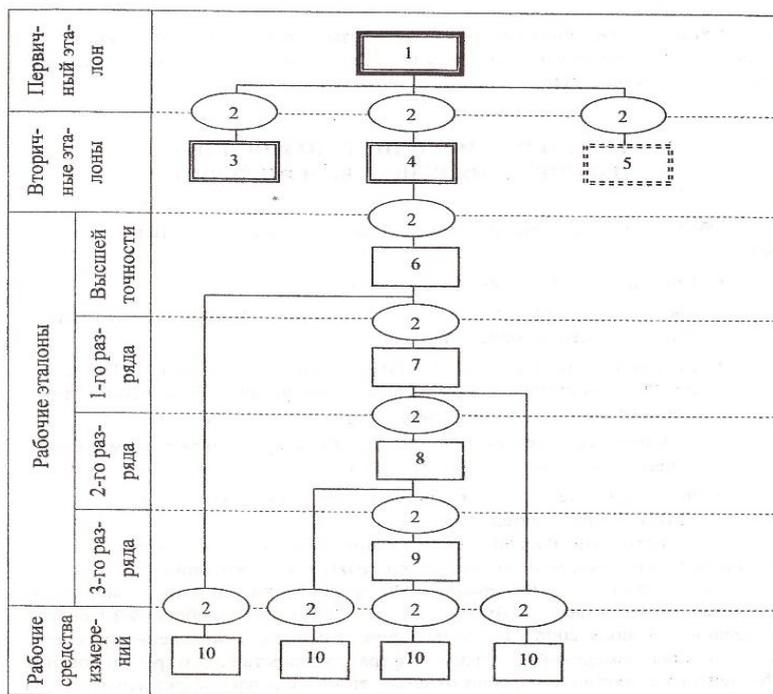


Рис. 35. Передача информации о размере единицы SI (вариант): 1 - государственный первичный эталон; 2 - методы передачи информации о размере единицы; 3 - эталон сравнения; 4 - эталон-копия; 5 - эталон-свидетель; 6 - рабочий эталон высшей точности; 7, 8, 9 - рабочие эталоны соответствующих разрядов; 10 - средства измерений

Ниже находятся рабочие эталоны, которые подразделяются на разряды (1-й, 2-й и т. д.) по мере увеличения неопределенности воспроизведения единицы. На каждой ступени передачи информации неопределенность увеличивается в 3...5 раз (иногда в 1,25... 10 раз).

Рабочие эталоны предназначены для передачи информации о размере единицы средствам измерений. В нижнем поле размещаются средства измерений различного уровня точности. В овальные рамки заключена информация о методах передачи информации о размере единицы.

Схема, приведенная на рис. 36 (она называется поверочной схемой), используется для поверки и калибровки всех без исключения мер, измерительных приборов и измерительных систем.

### **1.3.3 Нормативно-правовая основа обеспечения единства измерений**

Обеспечение единства измерений в нашей стране осуществляется на основе

- Конституции Российской Федерации;
- закона Российской Федерации от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»;
- постановления Правительства Российской Федерации от 12.02.1994 г. № 100 «Об организации работ по стандартизации, обеспечению единства измерений, сертификации продукции и услуг»;
- межотраслевой системы стандартов «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ)»;
- нормативно-технических и распорядительных документов субъектов хозяйственной деятельности.

По Конституции Российской Федерации (статья 71) стандарты, эталоны, Метрическая система, исчисление времени находятся в ведении РФ.

Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений», принятый Государственной Думой 11 июня 2008 года и одобренный Советом Федерации 18 июня 2008 года, устанавливает основные положения обеспечения единства измерений в стране. Сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений охватывает 17 направлений деятельности. За законом и принимаемыми в соответствии с ним актами законодательства РФ закрепляется регулирование всех отношений, связанных с обеспечением единства измерений в стране. В области международных отношений приоритет отдается правилам международного договора, если они отличаются от тех, которые содержатся в законодательстве РФ об обеспечении единства измерений.

Закон устанавливает требования к измерениям, единицам величин, эталонам, стандартным образцам и средствам измерений, регламентирует такие формы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений, как

- утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений;
- поверка средств измерений;
- метрологическая экспертиза;
- государственный метрологический надзор;
- аттестация методик (методов) измерений;
- аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений.

Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут в добровольном порядке подвергаться калибровке.

Нормативные правовые акты и нормативно-технические документы в области обеспечения единства измерений образуют Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Закон устанавливает организационные основы обеспечения единства измерений. Виновные в нарушении законодательства Российской Федерации об обеспечении единства измерений несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 12.02.1994 г. № 100 «Об организации работ по стандартизации, обеспечению единства измерений, сертификации продукции и услуг» утверждены следующие нормативные документы в области обеспечения единства измерений:

- Положение о государственных научных метрологических центрах;
- Порядок утверждения положений о метрологических службах федеральных органов исполнительной власти и юридических лиц;
- Порядок аккредитации метрологических служб на право поверки средств измерений;
- Положение о метрологическом обеспечении обороны в Российской Федерации.

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) - это свод нормативно-технических документов (межгосударственных стандартов - ГОСТ, национальных стандартов Российской Федерации - ГОСТ Р, правил - ПР, руководящих документов - РД, рекомендаций - Р, методических инструкций - МИ), регламентирующих все стороны деятельности по обеспечению единства измерений. В настоящее время ГСИ включает около 3000 нормативно-технических документов. Дальнейшее ее совершенствование предполагает приведение ГСИ в соответствие с федеральным законом «О техническом регулировании» и перевод значительного количества документов из числа обязательных в разряд рекомендательных.

Нормативно-технические и распорядительные документы субъектов хозяйственной деятельности не должны нарушать обязательные требования государственных стандартов. К таким документам относятся:

- стандарты отраслей;
- стандарты предприятий;
- стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений;
- распорядительные документы.

Все они имеют рекомендательный характер.

#### **1.3.4 Организационная основа обеспечения единства измерений**

Организационную основу обеспечения единства измерений составляют:

- государственные службы обеспечения единства измерений;
- метрологические службы федеральных органов исполнительной власти;
- метрологические службы юридических лиц.

Структура государственных служб обеспечения единства измерений показана на рис. 36



Рис. 36. Структура государственных служб обеспечения единства измерений

На федеральном уровне государственное регулирование обеспечением единства измерений осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование) в соответствии с Положением, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2004 г. № 294. Непосредственно этой деятельностью занимаются находящиеся в ведении Ростехрегулирования государственные службы обеспечения единства измерений:

- Государственная метрологическая служба (ГМС);
- Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ);
- Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО);
- Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

Метрологические службы федеральных органов исполнительной власти создаются приказом руководителя этого органа управления и функционируют в соответствии с утвержденным им Положением о метрологической службе. Они могут включать:

- структурные подразделения (службу) главного метролога в центральном аппарате федерального органа исполнительной власти;
- головные и базовые организации метрологической службы в отраслях, назначаемые федеральным органом исполнительной власти;
- метрологические службы предприятий, объединений, организаций, учреждений.

Метрологические службы юридических лиц решают следующие задачи:

- обеспечение единства и требуемой точности измерений, необходимого уровня метрологического обеспечения производства;
- внедрение современных методов и средств измерений с целью повышения уровня научных исследований;
- организация и проведение калибровки и ремонта средств измерений, находящихся в эксплуатации;

- надзор за состоянием и применением средств измерений, эталонов единиц SI, методик выполнения измерений, за соблюдением метрологических правил, норм и требований нормативных документов по обеспечению единства измерений;
- выдача обязательных предписаний, направленных на предотвращение или устранение нарушений метрологических правил, требований и норм;
- проверка своевременности представления средств измерений на испытания в целях утверждения типа, а также на поверку и калибровку;
- анализ состояния измерений, испытаний и контроля на предприятии;
- проведение метрологической аттестации методик выполнения измерений;
- взаимодействие с другими подразделениями предприятия по вопросам обеспечения единства и требуемой точности измерений.

Метрологические службы юридических лиц аккредитуются на техническую компетентность в области обеспечения единства измерений. Головные и базовые организации должны быть аккредитованы соответствующими федеральными органами исполнительной власти при участии специалистов - метрологов. Главный центр метрологической службы - ВНИИМС - осуществляет научно-методическое руководство работами по аккредитации головных и базовых организаций и ведет регистрацию головных и базовых организаций метрологических служб федеральных органов исполнительной власти и объединений юридических лиц.

## 2 МОДЕЛИ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

### 2.1 Назначение и области применения

Так как процесс измерения есть физический эксперимент, при выполнении которого измеряемая величина сравнивается с такой же величиной, принятой за единицу, то естественно, что измерительный прибор должен иметь измерительную систему, снабженную образцовыми устройствами (мерами).

Здесь и в дальнейшем под измерительной системой, или устройством, понимаем устройство, служащее для прямого или косвенного сравнения измеряемой величины с единицей измерения, а под отсчетной системой, или устройством, — устройство, на котором производят непосредственный отсчет приращения измеряемого размера или отсчет величины контролируемого размера. Поэтому к отсчетным устройствам также относим шкалу с нониусом или индексом, поле зрения окуляра или экрана и т. д.

Для контроля геометрических параметров деталей и узлов в промышленности применяются механические, оптико-механические, электрические, фотоэлектрические, пневматические и другие измерительные приборы и устройства. Измерительные системы широко используются в металлорежущих станках для контроля перемещения рабочих органов или для контроля геометрических размеров деталей в процессе обработки, в контрольно-измерительных машинах и в контрольно - измерительных приборах, служащих для контроля геометрических параметров.

Измерительной системой называется совокупность функционально объединенных средств измерений: мер величин, измерительных приборов, измерительных преобразователей, электронно-вычислительных машин и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого пространства с целью измерений одной или нескольких физических величин. Измерительная система предназначена для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для контроля, автоматической обработки, передачи и использования в автоматических и других системах. Измерительная система может входить в состав систем, выполняющих более обширные функции контроля, диагностики, распознавания и восстановления образов, управления научными экспериментами, испытаниями технологических процессов и испытаниями сложных объектов.

В зависимости от назначения измерительные системы подразделяются на три вида измерительные контролирующие, измерительные информационные и измерительные управляющие. В рассматриваемом случае необходимо выделить актуальные вопросы структуры и алгоритмов действий измерительной контролирующей системы. Измерительная контролирующая система – это измерительная система, предназначенная для целей контроля параметров и свойств объекта, технологического процесса или явления.

Элементом каждой измерительной системы, обеспечивающим процесс измерительных преобразований, является измерительный канал последовательного или параллельного действия. Измерительная информация первичных преобразователей по одноканальной или многоканальной схемам поступает в электронно-вычислительные устройства для определения и соответствующего анализа результатов измерений и контроля.

В измерительных системах с многоканальной схемой измерение различных величин осуществляется через индивидуальный измерительный канал. При этом выходной сигнал каждого канала передается на вход общего вычислительного устройства.

В процессе формирования измерительной информации первичных преобразователей анализируют априорную информацию об ожидаемых измеряемых параметрах (форма сигнала, частота, период, амплитуда, фазовый сдвиг), учитывая требования к точности результата измерений. В зависимости от указанной структуры параметров выбирают соответствующее математическое обеспечение анализа опытов.

Измерительные системы с учетом их составной структуры делятся на механические и электронные.

Механическая система представляет собой совокупность несущих направляющих, с помощью которых осуществляются перемещения внутри системы. Отличительной особенностью механической системы является то, что в течение цикла функционирования система осуществляет измерения координат контрольных и реальных точек объекта в пространстве. Сведения о координатах положения во времени контрольных точек заложены в базу данных измерительной системы. Механическая измерительная система, базирующаяся на принципе пошагового сканирования координат, обеспечивает сравнительно высокую точность проводимых измерений.

Электронные измерительные системы по сравнению с механическими системами определяют не координаты положения контрольных точек, а фиксируют значения отклонений контролируемых параметров относительно их номинальных значений. Измерительная информация от первичных преобразователей поступает в вычислительные устройства в режиме абсолютного времени.

Для измерения параметров вибраций, действующих на измерительный наконечник первичных преобразователей, а также для контроля стабильности их режимов может использоваться цифровой анализатор-измеритель «Ассистент» фирмы «НТМ - Защита». Прибор может применяться для измерений параметров вибрации, характеристик машин и механизмов в лабораторных и цеховых условиях, а также для анализа спектров преобразователей, принцип действия которых основан на вибрационных режимах. Конструкция прибора состоит из измерительного блока, входного усилителя, микрофонов и преобразователя вибрации. Характеристики режимов во времени и значения измеряемых величин отображается на дисплее измерительного блока.

В предлагаемом разделе рассмотрен только принцип действия измерительных систем, применяемых для промышленного назначения.

Измерительные системы можно разделить на группы в зависимости от их разрешающей способности. Измерительные системы, позволяющие производить отсчет величин с погрешностью 0,01 мм и более, можно отнести к системам с низкой разрешающей способностью, а системы, обеспечивающие более высокую точность измерений, — к системам с высокой разрешающей способностью.

Измерительными или отсчетными системами снабжены практически станки всех типов, а измерительными системами с высокой разрешающей способностью снабжаются прецизионные станки, которые применяются в машиностроении и приборостроении для изготовления деталей повышенной точности. Кроме высокой точности это оборудование должно обладать необходимой производительностью и экономической эффективностью, которые в большой степени зависят от степени автоматизации.

При автоматизации металлообрабатывающих станков используют специальные программные устройства, которые задают и контролируют необходимые перемещения рабочего органа и инструмента с целью получения требуемой по чертежу формы и точности геометрических размеров.

Технический уровень и эффективность производственных процессов в значительной мере определяется степенью автоматизации контроля и управления. Важнейшим элементом в цепи систем автоматического управления и активного контроля является первичный преобразователь, преобразующий входную измеряемую величину в сигнал, удобный для получения управляющей команды в форме аналог-код или для регистрации и наблюдения.

Одним из ответственных узлов программного управления является преобразователь (датчик) обратной связи. Датчики обратной связи применяются для подачи сигнала о фактически пройденном пути или о фактическом положении рабочего органа с целью сравне-

ния его с заданным перемещением или положением (для некоторых систем программного управления).

Датчики обратной связи характеризуются следующими показателями:

1) точностью, под которой понимают полосу расстояний по обеим сторонам заданного размера, в границах которой находятся все отклонения от этого размера;

2) разрешающей способностью — наименьшим приращением перемещения, которое может быть распознано измерительной системой как дискретное.

К измерительным системам предъявляются следующие требования:

1. Высокая точность измерения перемещения рабочего органа и инструмента.

2. Обеспечение удобного и быстрого отсчета измеряемой величины.

3. Точность отсчетно-измерительных систем должна быть выше точности станка, на котором они устанавливаются.

4. Длительное сохранение точности в процессе эксплуатации.

5. Выработка сигналов, соответствующих, текущему значению или приращению величины измеряемого перемещения в форме, удобной для автоматизации управления станком.

6. Малая чувствительность к изменению температуры, влажности и барометрического давления в помещении.

Кроме того, к оптическим измерительным системам предъявляется еще ряд требований, к которым можно отнести: отсутствие ошибок от параллакса; штрихи шкал и растровых сеток должны проецироваться в одной плоскости и с малым разрывом; штрихи должны иметь равную толщину по всей длине и т. д.

Измерительные устройства повышенной точности используются на координатно-расточных, профиль шлифовальных, фрезерных, горизонтально-расточных и других станках. Для успешного использования указанных станков в промышленности необходимо знать принцип действия и конструктивные особенности измерительных систем, которыми они снабжены. При проектировании новых прецизионных металлорежущих станков работникам станкостроительных заводов приходится наряду с выбором типа измерительной системы налаживать технологический процесс изготовления наиболее ответственных элементов измерительных устройств (шкал, сеток, лимбов, кодовых дисков и т. д.), с которыми производят сравнение при контроле перемещений рабочих органов станков.

Технологический процесс изготовления шкал, сеток, лимбов, кодовых дисков — трудоемок и состоит из ряда специфических приемов. При нанесении делений или при подготовке заготовок под деление необходимо строго соблюдать последовательность выполнения технологических операций, так как от этого зависит качество шкал, сеток и других штриховых мер.

Измерительные устройства, служащие для проверки отклонений прямолинейности направляющих станков, определения жесткости некоторых узлов и соединений в станках, определения отклонений прямолинейности перемещения суппорта или рабочего стола станка, определения ошибок изготовления отдельных элементов станка, для контроля размеров обрабатываемых деталей и т. д., устанавливаются на станину станка только во время проведения измерений.

Измерительные устройства для измерения деталей в процессе обработки, для контроля перемещения рабочих органов и визирования на выбранную точку поверхности детали закрепляются на подвижных или неподвижных частях станка.

К измерительным устройствам, служащим для контроля размеров обрабатываемых деталей, относятся: микроскопы М12 для резьбошлифовального станка, микроскопы МШЗК к шлифовально-затыловочному станку, визирные микроскопы МКР для координатно-разметочного станка, центроскопы ЦО-1 для прецизионного токарного станка, приборы и устройства для контроля геометрических размеров в процессе обработки и т. д.

Для отсчета перемещений различных органов в станках до последнего времени в основном применялись механические измерительные устройства, которые одновременно являлись и транспортирующими системами, т. е. служили для перемещения контролируемого органа в заданную координату. Эти измерительные устройства включают в себя микрометрическую винтовую пару (винт — гайка), а отсчет перемещения осуществляется по круговому лимбу, укрепленному на вращающемся винте относительно неподвижного индекса или, наоборот, по вращающемуся индексу относительно неподвижного лимба. Точность перемещения определяется точностью изготовления пары винт — гайка. Вследствие больших нагрузок, приходящихся на пару винт — гайка при переносе тяжелого рабочего органа, эти измерительные и транспортирующие устройства сравнительно быстро изнашиваются и теряют свою первоначальную точность. Следовательно, механические измерительные системы не позволяют сохранить высокую точность измерений на длительное время. Поэтому эти измерительные системы применяются в станках невысокого класса точности.

В современных металлообрабатывающих станках для контроля перемещения рабочих органов применяются высокоточные оптико-механические, фотоэлектрические и электромеханические измерительные системы, позволяющие контролировать величину перемещения с высокой точностью.

Координатно-измерительные машины предназначены для двух и трех координатного прецизионного контроля геометрических параметров деталей и komponуются на базе координатно-расточных станков. Эти машины выпускаются Ленинградским оптико-механическим объединением.

Для измерения перемещений рабочих органов оборудования применяются различные по принципу действия измерительные системы (устройства). Эти системы, встроенные в конструкцию позволяют повысить точность установки рабочего органа в заданную технологическим процессом координату. От точности работы измерительных систем и от места их расположения в конструкции станка во многом зависит точность получения геометрических параметров обрабатываемых деталей.

В настоящее время в промышленности широко распространены автоматические и механизированные производственные процессы, в которых для контроля перемещений применяют измерительные системы. Так, например, в станках с программным управлением одним из узлов, определяющих точность позиционирования рабочих органов, является измерительная система, ответственным элементом которой служит датчик обратной связи. Поэтому при проектировании станков с программным управлением особое внимание уделяется выбору типа датчиков обратной связи.

Измерительные системы, применяемые в металлообрабатывающих станках, в зависимости от характера получаемого сигнала могут быть дискретными и аналоговыми. В дискретных системах отсчет получается после того, как измерительный орган проходит определенное расстояние. Это расстояние называется разрешающей способностью дискретной измерительной системы.

В зависимости от величины разрешающей способности дискретные измерительные системы разделяются на грубые (первичные) и точные (вторичные) - с разрешающей способностью в сотые доли миллиметра и выше.

Аналоговые измерительные системы вырабатывают сигнал непрерывно пропорционально линейному перемещению или углу поворота. Разрешающая способность аналоговых измерительных систем определяется наименьшим фиксируемым перемещением рабочего органа, которому соответствует наименьшее улавливаемое изменение выходного сигнала. Разрешающая способность аналоговых систем определяется уровнем шумов электрической аппаратуры, служащей для измерения выходного сигнала.

Аналоговые измерительные системы имеют ограниченное применение при измерении больших длин вследствие их высокой стоимости и трудности изготовления точных и больших по размеру образцовых устройств. Поэтому в промышленности широко используются дискретно-аналоговые измерительные системы, в которых грубые перемещения (порядка 1—5 мм) осуществляются дискретным датчиком, а точные — аналоговым датчиком.

В металлообрабатывающих станках для контроля перемещений рабочих органов применяются механические, оптико-механические, электрические и фотоэлектрические измерительные системы.

Механические измерительные системы вследствие износа трущихся деталей не могут долгое время сохранять высокую точность измерений, в то время как оптико-механические, фотоэлектрические и электрические измерительные системы обеспечивают высокую точность отсчетов в течение длительного времени. Высокоточные измерительные системы находят широкое применение в координатно-измерительных машинах и в станках, где требуется высокая точность контроля перемещений рабочих органов.

Особенно широко применяются фотоэлектрические измерительные системы, в которых для точного позиционирования используются фотоэлектрические микроскопы. Создание лазерных установок с высокой монохроматичностью длины волны позволит применять для контроля больших перемещений с высокой точностью фотоэлектрические измерительные системы с интерференционными датчиками. В ряде стран применяются высокоточные фотоэлектрические измерительные системы с растровыми датчиками.

## 2.2 Преобразователи вибрационных перемещений

Вопросам анализа динамических процессов уделяется особое внимание при проектировании и изготовлении высокоточного оборудования, для создания которого необходимо устранить очаги вибрации.

При проектировании оборудования необходимо учитывать возможные причины колебаний в системе, вызванные неуравновешенностью вращающихся деталей, дефектами их изготовления, нарушением режима эксплуатации машин, периодическими толчками и т. п.

Колебания, возникающие от вышеуказанных причин, называются вынужденными; энергия этих колебаний поддерживается возмущающими силами. Характер вибраций изменяется при изменении величины и частоты возмущающей силы. Известно, что совпадение частот собственных и вынужденных колебаний ведет к резкому увеличению инерционных нагрузок, действующих на перемещаемый элемент. Зная частоту собственные - колебаний, можно создать машину, в которой будут отсутствовать резонансные колебания. Частота собственных колебаний системы и ее узлов определяется массой и жесткостью деталей, а следовательно, может изменяться по воле конструктора.

Вибрации, возникающие в оборудовании, сопровождаются шумами, которые вызывают утомление обслуживающего персонала и снижают производительность его труда.

Для изучения колебательных процессов, возникающих в механизме во время его работы, необходима специальная виброизмерительная аппаратура, причем ее конструктивные особенности зависят от условий измерения вибраций.

Изучением теории колебательных процессов, проектированием виброизмерительной аппаратуры и экспериментальным исследованием различных колебательных процессов занимается сравнительно молодая отрасль техники — **виброметрия**.

Измерить собственно вибрацию невозможно, поэтому приходится измерять один или несколько параметров, которыми она характеризуется, а именно: частоту основного и составляющих колебаний, скорость, ускорение, мгновенное и среднее смещение, мгно-

венное и среднее ускорение и скорость, амплитуду составляющих скорости и ускорения, фазу колебания и т. д.

Приборы для измерения указанных параметров должны иметь на выходе отсчетные системы или устройства, позволяющие производить непрерывную запись изменения колебательных процессов во времени. Получаемые кривые называются виброграммами.

По признаку определяемого параметра вибрации указанные приборы классифицируются следующим образом:

- частотомеры — приборы для измерения частоты колебаний объекта;
- виброметры и вибрографы — приборы для измерения и записи смещений колебания объекта;
- велосиметры и велосиграфы — приборы для измерения и записи скорости колебания;
- акселерометры и акселерографы — приборы для измерения и записи амплитуды ускорения;
- торсиографы и торсиометры — приборы для записи и измерения угловых смещений.

Для записи и анализа колебательных процессов широкое применение находят осциллографы и анализаторы, калибровка же виброизмерительной аппаратуры производится на специальных установках, называемых вибростендами.

В практике приходится сталкиваться с разнообразными колебательными процессами — синусоидальными, периодическими и непериодическими, поэтому невозможно создать аппаратуру, пригодную для измерения любых вибрационных процессов. При проектировании виброизмерительной аппаратуры приходится обращаться к достижениям электроники, электроакустики, автоматики и вычислительной техники.

Специалистов по проектированию виброизмерительной аппаратуры следует знакомить с теорией колебательных процессов, методами проектирования виброизмерительных приборов и измерения тех или иных колебательных процессов.

В настоящем учебном пособии не рассматриваются методы сложения и разложения колебаний, вынужденные колебания в нелинейных системах, колебания систем с двумя и многими степенями свободы, колебания системы с распределенными параметрами, так как эти разделы теории колебаний можно изучить по монографии проф. Ю. И. Иориша.

Авторы поставили перед собой задачу ознакомить студентов с принципом действия и конструктивными особенностями приборов, используемых для измерения и записи параметров вибрации.

### **Вынужденные колебания в линейных системах с одной степенью свободы**

В общем случае твердое тело имеет шесть степеней свободы, т. е. его положение определяется шестью независимыми параметрами, а движение — шестью уравнениями.

Для измерения вибраций необходимо связать с телом указатель и выбрать шкалу, закрепленную на неподвижном основании. Если тело совершает сложное движение, то одним указателем и одной шкалой измерить это движение невозможно; надо установить несколько указателей и несколько шкал. В общем случае для измерения колебаний тела необходим прибор, который позволил бы фиксировать изменения шести независимых параметров. Так как такой прибор создать невозможно, конструируют приборы, позволяющие измерять параметры вибраций в определенном направлении. Если необходимо измерять колебания тела относительно двух координатных осей, в корпусе прибора устанавливают два датчика.

Сложность измерения параметров вибраций заключается в необходимости иметь неподвижную шкалу (точку), относительно которой производят измерение. Таковую точку в

приборах создают искусственно, отделяя инерционную массу от корпуса с помощью пластичного подвеса, не пропускающего к ней колебания, действующие на корпус.

Решая различные технические задачи, исследователю приходится встречаться с собственными, вынужденными, параметрическими колебаниями, а также с автоколебаниями.

Собственные колебания возбуждаются в исследуемой системе единичным воздействием на нее возмущающей силы, причем характер колебания определяется параметрами самой системы. Собственные колебания характеризуются амплитудой (наибольшим отклонением от начального положения), периодом, круговой частотой (числом полных колебаний, совершаемых за время, равное  $2\pi$  с) и начальной фазой.

Связь между периодом, круговой частотой и частотой колебания выражается формулой

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{f} \text{ (с)}. \quad (168)$$

Вынужденные колебания возникают в системе независимо от собственных, под действием заданных внешних периодических или непериодических возмущений. Характер вынужденного колебательного процесса зависит от свойств системы и от закона изменения внешней возмущающей силы.

Параметрические колебания возникают в системе при периодическом изменении некоторых ее физических параметров под действием внешних факторов.

Автоколебаниями называются колебания, установившаяся амплитуда и частота которых определяются свойствами самой колебательной системы. Автоколебания относятся к незатухающим и поддерживаются силами, зависящими от колебательного процесса. Автоколебательные процессы встречаются при резании металлов, работе колебательного контура, в линиях электропередач и т. д. Они протекают на частотах, близких к частоте собственных колебаний; форма колебательного процесса может быть любой.

### Уравнение движения чувствительного элемента

Чувствительный элемент датчика состоит из инерционной массы, подвешенной на пружинном подвесе, демпфирующего устройства, и ограничителей движения.

В большинстве виброизмерительных приборов используется колебательная система, обладающая одной степенью свободы (рис. 37).

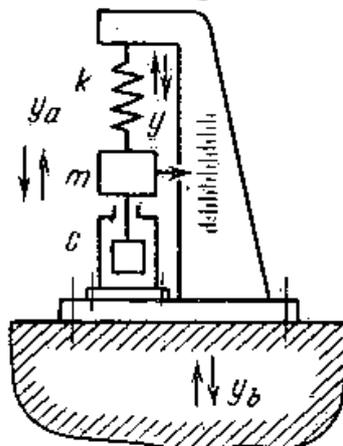


Рис. 37. Схематическое изображение чувствительного элемента

Инерционная масса  $m$  такой системы совершает относительно корпуса датчика строго направленное движение. Это обеспечивается специальным пружинным подвесом жесткостью  $k$ . К инерционной массе прикрепляется демпфирующее устройство с коэффициентом успокоения  $c$ .

Предположим, что корпус датчика установлен на колеблющемся объекте; при этом инерционная масса совершает абсолютное движение, определяемое законом

$$y_a = y \pm y_b, \quad (169)$$

где  $y_b$  — перемещение корпуса вместе с объектом, колебания которого измеряются;

$y_a$  — перемещение инерционной массы относительно корпуса.

Предположим, что перемещения инерционной массы  $y_a$  малы, сила упругости пружины пропорциональна ее деформации, что в системе не возникает иного трения, кроме сопротивления в успокоителе, которое пропорционально первой степени скорости относительного движения инерционной массы; тогда на систему действуют следующие силы: сила инерции —  $m\ddot{y}_a$ , сила упругости пружины —  $ky$  и сила успокоения  $c\dot{y}$ .

Учитывая силы, действующие на инерционную массу при ее колебании, получим уравнение движения чувствительного элемента

$$m\ddot{y}_a + c\dot{y} + ky = 0 \quad (170)$$

Так как относительное движение инерционной массы  $m$  равняется ( $y_a = y \pm y_b$ ), то уравнение (170) примет вид

$$m\ddot{y}_a + c\dot{y} + ky = -m\ddot{y}_b$$

Разделив все члены на  $m$  и положив, что  $\frac{c}{m} = 2g$  и  $\frac{k}{m} = \omega_0^2$ , получим уравнение движения чувствительного элемента

$$\ddot{y} + 2g\dot{y} + \omega_0^2 y = -\ddot{y}_b \quad (171)$$

Точный теоретический анализ уравнения (171) позволяет определить влияние входящих в него членов на качество работы чувствительного элемента. Но так как точный анализ сложен, ограничимся рассмотрением качественного влияния отдельных членов уравнения на характер его решения. Такой подход позволит определить, какими параметрами должен обладать прибор, чтобы соответствовать своему назначению.

Предположим, что в чувствительном элементе разрабатываемого виброизмерительного прибора отсутствует успокоение ( $2g \approx 0$ ) при малой частоте его собственных колебаний ( $\omega_0 \approx 0$ ). При таких условиях уравнение движений чувствительного элемента (171) примет вид

$$\ddot{y} = -\ddot{y}_b \quad (172)$$

Решение уравнения (172) без учета произвольных постоянных будет иметь вид

$$y = -y_b \quad (173)$$

Из уравнения (173) видно, что колебание чувствительного элемента, обладающего вышеуказанными параметрами, соответствует амплитуде перемещения исследуемого объекта, т. е. такой чувствительный элемент можно применять в виброметрах.

Если же чувствительный элемент имеет низкую частоту собственных колебаний ( $\omega_0 \approx 0$ ) при сильном успокоении, то уравнение (170) примет вид

$$2\mathcal{G}\dot{y} = -\ddot{y}_b. \quad (174)$$

После интегрирования и пренебрежения постоянными интегрирования уравнение (174) примет вид

$$y = -\frac{\dot{y}_b}{2\mathcal{G}}. \quad (175)$$

Из уравнения (175) видно, что чувствительный элемент, имеющий малую частоту собственных колебаний при сильном успокоении, может быть использован в приборах для измерения скорости колебания.

При высокой частоте собственных колебаний и отсутствии успокоения в системе будем иметь следующее уравнение движения инерционной массы:

$$\omega_0^2 y = -\ddot{y}_b \quad (176)$$

или

$$y = -\frac{1}{\omega_0^2} \ddot{y}_b. \quad (177)$$

Показания прибора, чувствительный элемент которого совершает движение, описываемое уравнением (176), будут соответствовать ускорению колебаний объекта. Прибор с таким чувствительным элементом называется акселерометром.

Приближенный анализ уравнения (171) показывает, что приборы, служащие для измерения амплитуды колебания, должны иметь малую частоту собственных колебаний чувствительного элемента; приборы для измерения ускорения (акселерометры) должны иметь жесткий подвес.

Если корпус прибора совершает колебания по закону  $y_b = a \sin \omega t$ , то дифференциальное уравнение (171) движения инерционной массы имеет следующий вид:

$$\ddot{y} + 2\mathcal{G}\dot{y} + \omega_0^2 y = a\omega^2 \sin \omega t, \quad (178)$$

где  $a$  — амплитуда вынужденных колебаний,  $\omega$  их круговая частота.

Решение уравнения (178) представляющее сумму решения однородного уравнения  $y_1$  и частного решения неоднородного уравнения  $y_2$ , запишется в следующем виде:

$$y = y_1 + y_2.$$

Рассмотрим сначала свободные колебания чувствительного элемента при неподвижном корпусе и отсутствии демпфирующего устройства.

Уравнение свободных колебаний такого чувствительного элемента будет

$$\ddot{y} + \omega_0^2 y = 0. \quad (179)$$

Решение уравнения (179) имеет следующий вид:

$$y = C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий.

Если в начальный момент  $t = 0$ ,  $y = y_0$ ;  $\dot{y} = \dot{y}_0$ , то

$$y = y_0 \cos \omega_0 t + \frac{\dot{y}_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t. \quad (180)$$

После преобразования уравнение (180) примет вид:

$$y = A \sin(\omega_0 t + a), \quad (181)$$

где

$$A = \sqrt{y_0^2 + \left(\frac{y_0}{\omega_0}\right)^2}; \quad (182)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m} \left[ \frac{1}{c} \right]}; \quad (183)$$

$$a = \operatorname{arctg} \frac{y_0}{\dot{y}_0} \omega_0. \quad (184)$$

Таким образом, инерционная масса, выведенная из равновесия, будет совершать незатухающие колебания, амплитуда и частота которых определяются выражениями (182) и (183), а сдвиг фазы  $a$  — выражением (184).

### 2.3 Основные элементы и узлы виброизмерительных приборов

В последние годы в практике вибрационных измерений широкое распространение находят электромеханические измерительные приборы, состоящие из датчика, усиливающего устройства и устройства для регистрации колебательного процесса. При этом усиливающие и регистрирующие устройства собираются в виде отдельного блока.

Приборы, позволяющие анализировать и записывать изменения сложных колебательных процессов во времени, либо входят в конструкцию вибрационного измерительного прибора, либо же изготавливаются отдельным блоком.

Датчик является основной частью вибрационного измерительного прибора и служит для восприятия механических колебаний и для их преобразования в электрический импульс. Поэтому датчик должен состоять из чувствительного элемента и преобразующего устройства. При проектировании виброизмерительной аппаратуры особое внимание уделяется выбору чувствительного элемента, так как от точности его работы во многом зависит точность, измерения параметров вибраций.

#### Чувствительные элементы

Чувствительный элемент датчика, служащий для восприятия механических колебаний, состоит из инерционной массы на упругом подвесе, демпфирующего устройства, ограничителей хода инерционной массы и арретиров.

Чувствительный элемент характеризуется частотой собственных колебаний, величина которой определяется инерционной массой и жесткостью упругого подвеса. Последняя зависит от конструкции подвеса и материала, из которого он выполнен.

**Инерционный элемент.** Для инерционного элемента используются материалы с большой плотностью, чтобы в небольшом объеме обеспечивался необходимый вес. Иногда в приборах с высокой собственной частотой колебаний отсутствует инерционный элемент и его функции выполняет масса упругого элемента.

**Упругий элемент** (подвес инерционного элемента к корпусу датчика) служит для создания восстанавливающей силы. Упругие элементы изготавливаются из материалов, обладающих высоким коэффициентом упругости и пределом прочности, линейностью силовой характеристики и низким порогом чувствительности. Материал подвеса не должен

изменять своих свойств под влиянием температуры, влажности, паров бензина, масел и т. д.

В зависимости от конструктивного оформления подвесы виброизмерительных приборов можно разделить на пружинные, маятниковые и пружинно-маятниковые. В большинстве случаев пружинные подвесы служат для измерения колебаний высокой частоты, а маятниковые – для измерения колебаний низкой частоты.

Пружинные подвесы делятся на подвесы с направленным ходом и без направленного хода инерционной массы. Подвесы первой группы находят более широкое применение в виброизмерительных приборах.

Чувствительные элементы с направленным ходом инерционной массы содержат специальные приспособления (оси и втулки, опоры и шпонки, являющимися элементами трубки и т. д.), допускающие перемещения инерционной массы только в определенном направлении. Иногда направляющие элементы составляют часть подвеса, образуемого плоскими пружинами. Последние обладают значительной податливостью в одном направлении и большой жесткостью в перпендикулярных ему направлениях, поэтому перемещение инерционной массы возможно в направлении наименьшей жесткости.

Конструкции подвесов с дополнительными направляющими устройствами представлены на рис. 5. Во время длительной эксплуатации в условиях сильной вибрации возможны износ и разбалтывание направляющих (за счет сил, действующих в направлении, перпендикулярном движению чувствительного элемента), что снижает точность работы датчика из-за восприятия боковых составляющих вибрации.

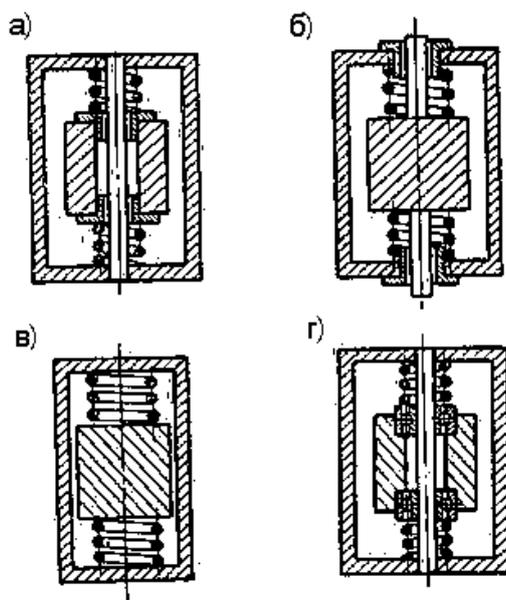


Рис.38. Схематическое изображение подвесов с дополнительными направляющими элементами

В подвесах, представленных на рис. 38а, 38б и 38в, инерционная масса перемещается в направляющих скольжения. Винтовая пружина, соединяющая корпус прибора с инерционной массой, играет роль упругого подвеса. В подвесе рис. 38а втулка перемещается вдоль цапфы, а в подвесе рис. 38б ось перемещается во втулке.

Большим недостатком этих подвесов является наличие трущихся поверхностей, из-за которых при изменении коэффициента трения в сопряженных парах вместе со скоростью изменяются и характеристики подвеса. Для уменьшения трения можно использовать в направляющих подшипники качения (рис. 38г). Однако их подвесы имеют пониженную вибропрочность, так как под действием боковых составляющих вибрации шарики подшипника разрушают беговые дорожки и в сопряженных парах появляются зазоры.

Подвесы, у которых направляющими являются плоские пружины, показаны на рис. 6. В таких подвесах отсутствует сухое трение, что во много раз повышает их чувствительность.

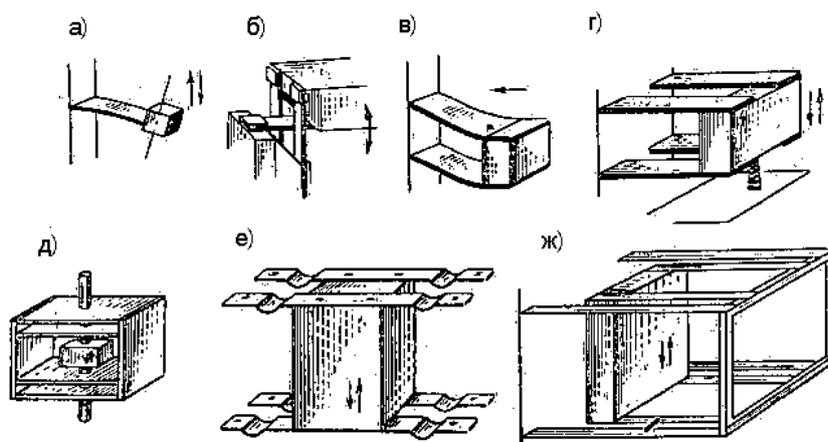


Рис.39. Подвесы с плоскими пружинами

Подвес, представленный на рис. 6а, применяется для измерения перемещений малой амплитуды. При больших амплитудах колебания инерционного элемента его ось симметрии смещается и наклоняется, что сильно искажает показания прибора.

Подвес, называемый «крест плоских пружин», используемый в маятниковых чувствительных элементах, отличается большой равномерностью деформации пружин, образующих подвес (рис. 39б).

Подвес с двумя параллельными пружинами (рис. 39в) имеет более совершенную конструкцию — в нем инерционная масса при колебаниях не поворачивается, а лишь несколько смещается к неподвижным креплениям пружины.

Подвес, представленный на рис.39г, отличается большой устойчивостью к боковым смещениям и закручиванию. Иногда в этих подвесах применяется пружина, служащая для компенсации статического прогиба под действием силы тяжести инерционной массы. Пружина должна быть мягкой, чтобы не изменять жесткость системы

Часто применяются подвесы с двусторонним (рис. 39д) или односторонним (рис. 39ж) промежуточным подвижным соединением. Наличие промежуточных соединений устраняет смещение и наклон инерционной массы, но иногда ухудшает частотную характеристику чувствительного элемента.

Подвес с серьгами (рис. 39е) применяется для чувствительных элементов с низкой частотой собственных колебаний. Этот подвес позволяет получить компактный чувствительный элемент.

В виброизмерительных приборах часто используются подвесы из круглых пружин, общий вид которых показан на рис. 40. Эти подвесы позволяют получить довольно компактный чувствительный элемент. Пружина с эксцентричными вырезами (рис. 40б) лучше пружины с вырезом по спирали (рис. 40а), так как позволяет инерционной массе перемещаться при работе прибора только вдоль оси симметрии.

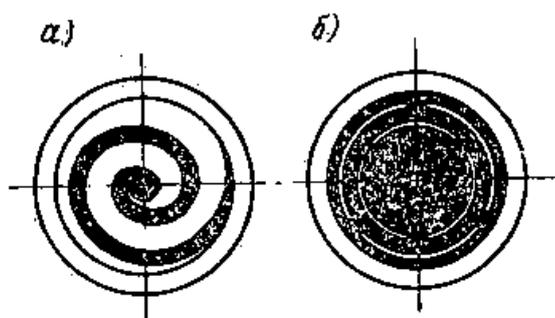


Рис. 40. Плоские, пружины для подвеса: а—спиральная; б — пружина «паук»

Подвесы с круглыми подвесами неудобны при сборке, так как возможно выталкивание — пружина выскальзывает из мест закрепления.

Маятниковые и пружинно-маятниковые подвесы являются примерами чувствительных элементов, обладающих низкой частотой собственных колебаний. К ним относятся: маятник с наклонной осью, горизонтальный маятник, маятник Гейгера и др.

Маятниковые подвесы применяются для измерения колебаний небольшой амплитуды, пока вращательные движения инерционного элемента вокруг оси с достаточной точностью могут быть аппроксимированы линейными колебаниями. Маятниковые подвесы чувствительны к паразитным угловым колебаниям, следовательно, такими подвесами нецелесообразно измерять колебания, состоящие из линейных и угловых компонентов.

Работа маятниковых чувствительных элементов и методика определения частоты их собственных колебаний рассмотрена в ряде литературных источников. Здесь рассмотрена работа чувствительного элемента маятника с горизонтальной осью, наиболее часто встречающегося в виброизмерительных приборах для измерения низкочастотных колебаний.

Для определения частоты собственных колебаний маятника с горизонтальной осью надо составить дифференциальное уравнение его движения, предварительно определив силы, действующие на маятник. Схематическое изображение чувствительного элемента дано на рис. 41.

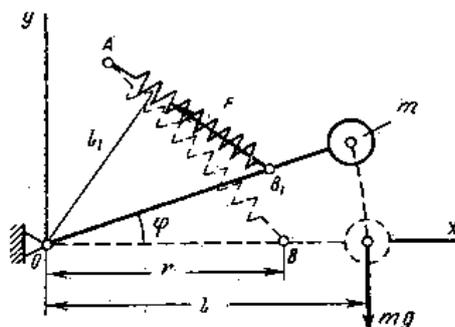


Рис.41. Схема горизонтального маятника с винтовой пружиной

## 2.4 Виды преобразователей измерения вибрационных перемещений

В некоторых преобразователях механические колебания непосредственно преобразуются в электродвижущую силу (индукционные, пьезоэлектрические и фотоэлектрические преобразователи), а в других происходит изменение параметров системы индуктивности, емкости, сопротивления и т. д. Соответственно они называются индуктивными, емкостными и преобразователями омического сопротивления.

Ниже рассмотрен принцип действия преобразователей, наиболее часто встречаемых в практике вибрационных измерений.

Индукционные преобразователи состоят из чувствительного элемента, постоянного магнита и катушки с проводами. Подвижной может быть катушка или постоянный магнит; если подвижный постоянный магнит, то неподвижными являются катушки, и наоборот. При движении катушки в поле постоянного магнита в ней индуцируется э. д. с., пропорциональная скорости перемещения инерционной массы. Э. д. с., индуцируемая в катушке, определяется выражением

$$E = \omega \frac{\Phi}{b} v = \omega \pi D_{cp} B v, \quad (185)$$

где  $\omega$  — число витков в катушках датчика;

$\Phi$  — магнитный поток в зазоре,  $Вб$ ;

$v$  — скорость перемещения катушки,  $см/с$ ;

$b$  — ширина поверхностей магнитного элемента, ограничивающих воздушный зазор,  $см$ ;

$D_{cp}$  — средний диаметр витка катушки,  $см$ ;

$B$  — магнитная индукция в зазоре,  $Вб/см^2$ .

Магниты изготавливают из высококоэрцитивных сплавов, а полюсные наконечники и магнитные элементы — из мягкого материала, например, из материала армо. Для повышения индуктивности необходимо намагничивать сплавы вместе с магнитными элементами.

Каркас катушки изготавливают из эбонита, пластмассы и алюминия, причем в алюминиевом каркасе для снижения степени успокоения по образующей цилиндра каркаса делается сплошной разрыв, который уменьшает токи Фуко.

Имеются разнообразные конструкции индукционных преобразователей. На рис. 42 показаны схемы преобразователей с поступательным движением катушек (рис. 42а и б) и магнитов (рис. 42в и г). Крепление на плоских пружинах 4 каркаса 3 с катушкой 2 позволяет создать чувствительный элемент для измерения амплитуд ускорений (рис. 42а).

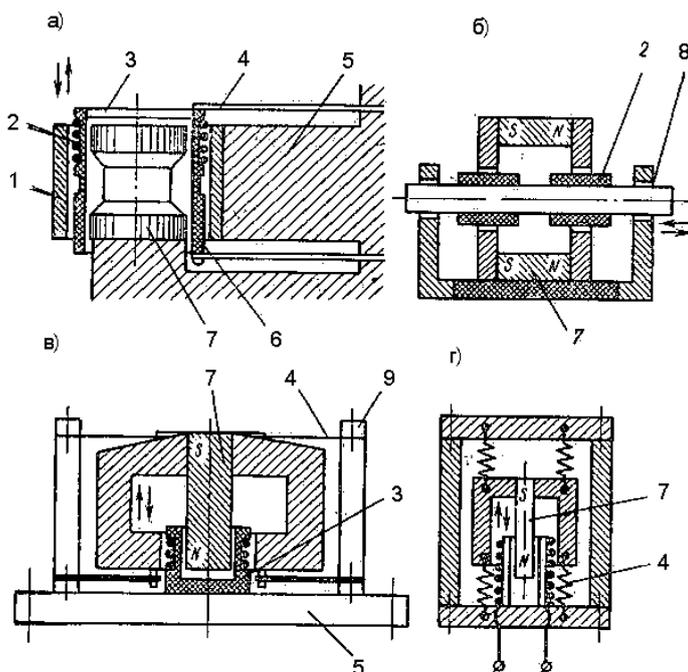


Рис. 42. Индукционные преобразователи

Чувствительные элементы акселерометров должны иметь малую массу при высокой жесткости пружин. Постоянный магнит 7 и магнитный провод 1 закрепляются в корпусе 5 датчика. В нижней части каркаса имеется утолщение из бронзового кольца 6, являющееся демфирующим устройством. Подвес из плоских пружин малочувствителен к влиянию боковых компонентов вибрации.

Для измерения больших перемещений используют преобразователь, изображенный на рис. 42б, у которого катушки 2 перемещаются в направляющих скользящих 8. Постоянный магнит 7 жестко укреплен в корпусе.

Виброметр (рис. 42в) с низкой частотой собственных колебаний (ниже 1 Гц) состоит из магнита 7, подвешенного на плоских пружинах 4, стоек 9, основания 5 (корпуса) и каркаса 3 с катушкой. Каркас изготавливается из эбонита или пластмассы.

Виброметр с магнитом 7, подвешенным на винтовых цилиндрических пружинах 4 (рис. 42г), также имеет низкую частоту собственных колебаний.

К недостаткам индукционных датчиков относится их сравнительно высокая чувствительность к изменению температуры. Иногда для компенсации ошибок от температуры последовательно с датчиком включают добавочное сопротивление из манганина.

**В пьезоэлектрических преобразователях** используется явление возникновения электрических зарядов у некоторых кристаллов при деформировании в определенном направлении.

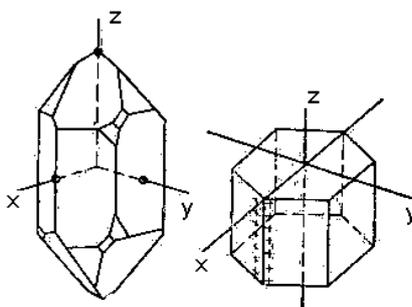


Рис. 43. Кристалл кварца и его оси симметрии

Так, если кристалл кварца (рис. 43) деформировать вдоль продольной оси  $z$ , то электрические заряды не обнаружатся. Ось  $z$  является оптической (нейтральной) осью. При деформировании кристалла вдоль осей  $x$  и  $y$  происходит электризация граней. Это обстоятельство надо учитывать, чтобы вырезать из кристалла пластинку, сориентированную нужным образом.

При воздействии на пластинку, должным образом вырезанную из кристалла, силой  $F$ , направленной вдоль оси  $x$ , на перпендикулярных этой силе поверхностях появятся разные и противоположные по знаку заряды  $+q_x$  и  $-q_x$ . Их величины определяются выражением

$$q_x = KF, \quad (186)$$

где  $F$  — сила, действующая на пластинку кварца;

$K$  — пьезоэлектрическая постоянная кварца.

Если сила действует вдоль оси  $y$ , то величина зарядов определится выражением

$$q_y = K \frac{a}{b} F, \quad (187)$$

где  $a$  и  $b$  — линейные размеры (ширина и толщина) пластинки.

Кристаллы кварца не имеют широкого распространения вследствие слабого пьезоэффекта, хотя пьезоэлектрическая постоянная кварца мало изменяется при колебании температуры, влажности и барометрического давления.

Широкое применение в преобразователях находят кристаллы сегнетовой соли. Однако при их применении следует помнить о влиянии влажности окружающей среды и колебаний температуры на пьезоэлектрическую постоянную  $K$ .

Наибольшее распространение в качестве преобразователей нашли кристаллы титаната бария. При спекании мелких кристаллов титаната бария с цементирующим веществом получают пластинки, которые затем подвергают поляризации в постоянном электрическом поле.

Существует несколько типов пьезоэлектрических преобразователей.

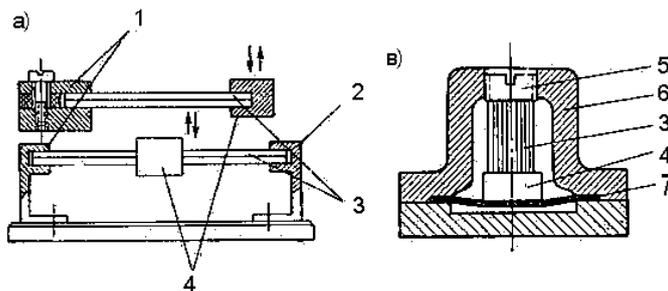


Рис. 44. Пьезопреобразователи: а — с биморфными пьезоэлементами, закрепленными консолью (вверху), и с двумя заделанными концами (внизу); б — с использованием поперечного пьезоэффекта

Наибольшее распространение получили преобразователи, у которых пьезокристалл испытывает деформации изгиба (рис. 44а) или сжатия и растяжения (рис. 44б). Пьезокристалл 3, закрепленный с помощью планок 1 в корпусе б, нагружен инерционной массой 4. Она может крепиться к консолям или в центральной части пьезокристалл, который при перемещении инерционного элемента испытывает деформации изгиба. Для повышения чувствительности преобразователя необходимо, чтобы пьезоэлектрический кристалл работал на изгиб с кручением.

В преобразователе, изображенном на рис. 44б, используется поперечный пьезоэлектрический эффект. Пьезокристалл 3 закреплен между плоской пружиной 7 и металлической гайкой 5 (рис. 44б). Инерционная масса 4 прикреплена к плоской пружине. Предварительный натяг обеспечивается перемещением гайки 5 в корпусе б.

Преобразователи с фотоэлементами, реагирующие на изменение светового потока, бывают с запирающим слоем (селеновые, меднозакисные, серносеребряные) и с внешним или внутренним фотоэффектом. Это полупроводники, в которых вследствие перехода электронов из полупроводника в проводник (или наоборот) при освещении возникает э. д. с.

В фотоэлементах с внешним фотоэффектом, состоящих из катода и анода, под действием света из катода излучаются электроны, которые собираются на аноде. Анод и катод фотоэлемента находятся в стеклянной колбе; в зависимости от характера ее наполнения различают вакуумные и газонаполненные фотоэлементы. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом обладают высокой чувствительностью, что позволяет использовать их для контролирования быстро протекающих колебательных процессов. Но необходимо помнить, что при работе фотоэлемента, при непрерывном его освещении, их фотоэффект снижается.

Основной характеристикой фотоэлектрического преобразователя является чувствительность  $s$ , которая определяется отношением изменения тока  $\Delta I$  к изменению светового потока  $\Delta \Phi$  или его спектрального состава

$$s = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi} [\mu A / Лм]. \quad (188)$$

Так например, чувствительность серноталлиевых фотоэлементов равна  $\sim 600 \mu A / Лм$ , селенового  $500 \mu A / Лм$ . Обработка таллия некоторыми элементами позволяет получить фотоэлементы, имеющие обратную полярность и чувствительность до  $6500 \mu A / Лм$ .

Высокая чувствительность фотоэлементов с запирающим слоем позволяет использовать их без усилителей, хотя фотоэлементы обладают заметной инерционностью, что сужает область их применения.

В фотоэлектрических преобразователях с внешним или внутренним фотоэффектом измеряемой величиной воздействуют на интенсивность потока лучистой энергии. Чаще всего воздействуют на световой поток.

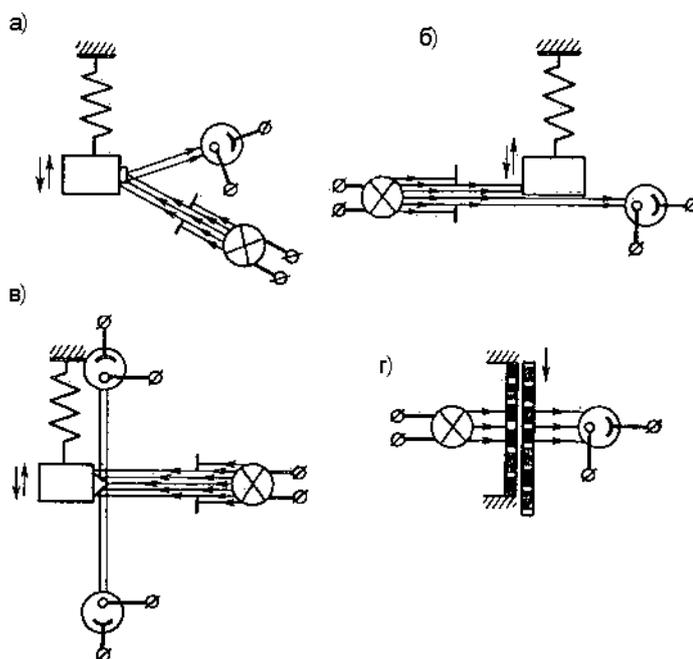


Рис.45. Способы получения сигнала в фотоэлектрических датчиках

Способы получения сигнала в фотоэлектрических преобразователях показаны на рис. 45. Интенсивность света можно изменять различными способами: изменением действующей поверхности зеркала (рис. 45а), перекрывая часть света колеблющимся предметом (рис. 45б); иногда используют дифференциальные схемы с подвижной призмой (рис. 45в) или с заслонкой типа сдвоенной решетки (рис. 45г).

Ни одна из рассмотренных схем фотоэлектрических датчиков не имеет погрешности от трения в направляющих, так как вибрирующий объект не имеет непосредственной связи с деталями датчика.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом изготавливают нанесением тонкого слоя полупроводника на поверхность тонкого проводника.

В качестве источников излучения в преобразователях с фотоэлементом используются лампы накаливания, ртутные лампы высокого давления, лампы тлеющего разряда и осциллографические трубки. Иногда используются источники жестких излучений — рентгеновские трубки, искусственные радиоактивные вещества и т. д.

Приемниками видимого и некоторых участков ультрафиолетового и инфракрасного излучения являются фотоэлементы: с внешним фотоэффектом, фотосопротивления, вентильные фотоэлементы и фотоумножители.

Приемниками жестких излучений являются счетчики Гейгера — Мюллера, кристаллические счетчики и т. д.

Принцип действия радиационных преобразователей аналогичен принципу действия преобразователей с фотоэлементами, но в них имеются специальные источники излучения лучей и приемники этих лучей.

**Индуктивные преобразователи** широко применяются при измерении почти всех параметров вибраций. Работа индуктивных преобразователей основана на изменении сопротивления магнитопровода при изменении величины воздушного зазора магнитной цепи или магнитной проницаемости железного сердечника.

Индуктивные преобразователи в зависимости от принципа действия делятся на преобразователи с переменным воздушным зазором (рис. 46а — в) и с подвижным сердечником (рис. 46г, д). Для измерения толщин покрытия из неметаллических материалов применяются индуктивные преобразователи, принцип действия которых основан на изменении вихревых токов.

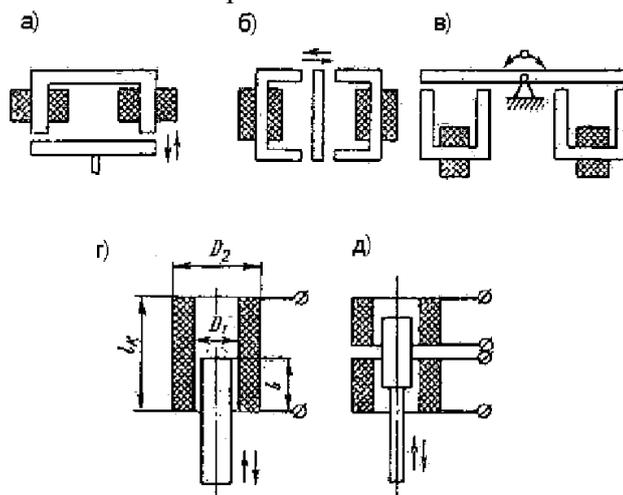


Рис. 46. Схематическое изображение индуктивных датчиков

Преобразователь включается в измерительные схемы таким образом, что изменение его индуктивности приводит к неуравновешенности измерительной системы.

Индуктивность преобразователя, состоящего из сердечника и якоря, определяется по выражению

$$L = \frac{w^2}{\sqrt{(R_{жс} + R_{\delta})^2 + x_m^2}} [\Gamma H], \quad (189)$$

где  $w$  — число витков катушки на статоре,

$R_{жс}$  — активное сопротивление сердечника  $I/Ом \cdot с$

$L$  и  $S_{жс}$  — длина (см) и площадь поперечного сечения сердечника (см<sup>2</sup>);

$\mu$  — магнитная проницаемость сердечника,  $Ом·с/см$ ;  
 $R_\delta$  — магнитное сопротивление воздушного зазора,  
 $1/Ом·с$

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta}; \quad (190)$$

$\delta$  — величина воздушного зазора,  $см$ ;

$S_\delta$  — площадь поперечного сечения воздушного зазора,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха, равная  $1,256 \cdot 10^{-8} Ом·с/см$ ;

$x_m$  — реактивное магнитное сопротивление, обусловленное вихревыми токами и потерями на гистерезис,  $1/Ом·с$

$$x_m = \frac{P_{жс}}{\omega \Phi^2}; \quad (191)$$

$P_{жс}$  — потери в сердечнике,  $Вт$ ;

$\omega$  — угловая частота,  $рад/сек$ ;

$\Phi$  — эффективное значение магнитного потока,  $Вб$ .

Из выражения (59) видно, что индуктивность меняется при изменении активного магнитного сопротивления сердечника, числа витков и величины воздушного зазора.

Индуктивные преобразователи, схематически изображенные на рис. 46а — в, применяются для измерения линейных (рис. 46а, б) и угловых (рис. 46в) перемещений.

Индуктивные преобразователи с переменным воздушным зазором благодаря своей высокой чувствительности находят широкое применение в технике вибрационных измерений. Чувствительность такого преобразователя определяется выражением

$$s = \frac{dL}{d\delta} = -\frac{w^2 S_\delta \mu_0}{\delta^2} [\Gamma_H / см]. \quad (192)$$

Величина тока, возникающего в обмотке при изменении зазора, определяется выражением

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad (193)$$

где  $U$  — напряжение,  $В$ ;

$R$  — активное сопротивление,  $Ом$ ;

$L$  — индуктивность,  $Гн$ .

При измерении больших перемещений возникает погрешность из-за нелинейности изменения индуктивности от зазора между якорем и сердечником. Необходимую линейность можно обеспечить применением якоря специальной конфигурации.

Индуктивные преобразователи с подвижным якорем (рис. 17г, д) имеют открытый соленоид. При перемещении якоря внутри катушки ее индуктивность изменяется по следующему закону:

$$L = \frac{w^2}{l_k} (D_2 - D_1) l \mu_\kappa [\Gamma_H], \quad (194)$$

где  $w$ ,  $l_k$ ,  $D_2$ ,  $D_1$  — число витков, длина и диаметры поперечного сечения катушки,  $см$ ;

$l$  — величина вхождения якоря,  $см$ ;

$\mu_{я}$  — магнитная проницаемость материала якоря, Ом·с/см.

Индуктивные преобразователи с подвижным якорем используются для измерения больших линейных перемещений.

Меньшее распространение получили преобразователи, принцип действия которых основан на вихревых токах, и магнитоупругие преобразователи. Преобразователи первого типа используются для статических измерений; их работа основана на измерении магнитной цепи преобразователя при изменении толщины измеряемого немагнитного элемента, находящегося в магнитном поле.

Измерительные системы с магнитоупругими преобразователями используются для измерения малых перемещений, давлений и усилий. Их работа основана на способности ферромагнитных тел изменять магнитную проницаемость под воздействием создаваемых в них механических напряжений.

**Емкостные преобразователи** это чувствительные преобразователи, позволяющие измерять перемещения, исчисляемые сотыми и тысячными долями микрона. Линейное или угловое перемещение одной из пластин конденсатора в емкостном датчике преобразуется в изменение емкости преобразователя. Изменяя расстояние между пластинами, или величину перекрестия пластин, или диэлектрическую постоянную среды, можно изменять емкость конденсатора.

В практике виброизмерений используются три типа преобразователей: с переменным зазором (рис. 47а), с переменной площадью перекрытия пластин конденсатора (рис. 47б) и с изменением диэлектрической постоянной среды (рис. 47в).

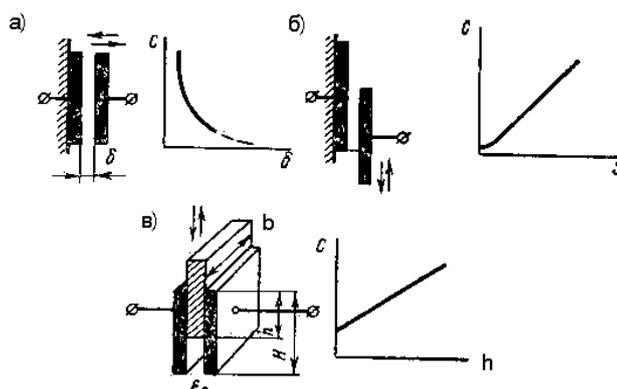


Рис.47. Схематическое изображение емкостных датчиков и их характеристики

Емкость преобразователя первого типа равняется

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi \delta} \quad (195)$$

Зависимость емкости от зазора между пластинами имеет нелинейную характеристику, поэтому преобразователи с переменным зазором нельзя использовать для измерения больших расстояний. При измерении малых расстояний на характеристической кривой можно найти небольшой участок, где зависимость  $C=a(\delta)$  будет приблизительно линейна.

Характеристика преобразователей второго типа определяется выражением

$$C = \frac{\varepsilon}{4\pi\delta} S$$

Емкость линейно зависит от изменения площади перекрытия пластин, поэтому эти преобразователи можно использовать для измерения перемещений большой величины.

Характеристика преобразователя третьего типа, определяемая выражением

$$C = b[H\varepsilon_0 + h(\varepsilon - \varepsilon_0)], \quad (196)$$

линейна.

Наибольшее распространение получили датчики с преобразователями первого типа. Эти датчики отличаются простотой конструкции и удобством применения.

Емкостные преобразователи в зависимости от конструкции могут быть простыми или дифференциальными. Первые имеют одну неподвижную и одну подвижную пластину; вторые — одну подвижную и две неподвижные пластины. Дифференциальные преобразователи чувствительнее простых.

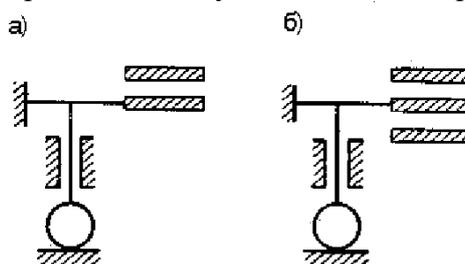


Рис.48. Принципиальные схемы простого(а) и дифференциального(б) емкостного датчика

На рис. 48 изображены принципиальные схемы простого и дифференциального преобразователя с переменным зазором. Емкость простого преобразователя определяется выражением

$$C = \frac{\varepsilon}{4\pi\delta} S \quad (197)$$

Зависимость емкости от изменения зазора нелинейна, однако при малых перемещениях пластик по сравнению с начальным расстоянием между ними изменение емкости можно считать приближенно линейным.

Изменять площадь перекрытия пластин конденсатора можно поворачивая их или перемещая цилиндрические пластины относительно друг друга, если преобразователь представляет собой два цилиндра, находящиеся один внутри другого.

Емкостные преобразователи обладают высокой чувствительностью, следовательно, для измерения их емкости необходимо применять многокаскадные электронные схемы. Для устранения утечек надо тщательно экранизировать преобразователь и соединительные провода.

На точность измерений электрическими схемами с емкостными преобразователями влияют также изменения температуры окружающей среды, посторонние электрические поля и другие факторы.

Преобразователи омического сопротивления представляют собой проводники, обладающие омическим сопротивлением, которое изменяется при изменении контролируемой величины.

При постоянном токе питания омическое сопротивление  $R$  проводника определяется выражением

$$R = \rho \frac{l}{S} [\text{Ом}], \quad (198)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника,  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$

$l$  — длина проводника;

$S$  — площадь поперечного сечения.

Контролируемая величина воздействует на датчик омического сопротивления, изменяя параметры проволоки, а следовательно, изменяется ее омическое сопротивление. Так как омическое сопротивление преобразователя изменяется с колебанием частоты источника питания, надо избегать измерительных схем, работающих на переменном токе.

Преобразователи омического сопротивления бывают потенциометрические, или реохордные, магнитоомические и другие.

Проводники, из которых изготавливаются преобразователи, должны обладать высокой механической прочностью, высоким удельным сопротивлением и относительной чувствительностью, иметь минимальный температурный коэффициент сопротивления и минимальную термоэлектродвижущую силу проволоки в паре с медью. Сопротивление преобразователя линейно зависит от изменения контролируемой величины, следовательно, его чувствительность не зависит от величины деформации.

Проволочные (омические) тензометры могут быть использованы в виде розеток, состоящих из трех тензометров, или одиночно.

Тензометрические преобразователи имеют ряд достоинств, благодаря которым они нашли широкое применение при статических и динамических исследованиях. К достоинствам датчиков с преобразователями омического сопротивления относятся их малые габариты, простота конструкции, возможность простого и надежного крепления к исследуемой детали с помощью клея и возможность создания виброизмерительных приборов для измерения вибраций с низкой частоты.

Тензометрические преобразователи нельзя использовать в цепях повышенной частоты, так как они имеют индуктивную составляющую сопротивления.

Электронные и ионные преобразователи. В практике измерения параметров вибраций и малых перемещений используются электронные и ионные преобразователи, принцип работы которых основан на изменении характеристик электронных и ионных ламп при изменении положения их электродов.

Погрешность этих датчиков невелика и зависит от нестабильности источников питания, механических сотрясений, старения электродов и т. д.

Эти датчики в большинстве случаев используются для измерения предельных ускорений.

## 2.5 Выбор вибрационных измерительных преобразователей

К выбору вибродатчика для производственных измерений надо подходить очень осторожно, так как различные по принципу действия датчики имеют разные фазовые, амплитудные и частотные погрешности.

В практике виброизмерений исследователю в большинстве случаев придется измерять вибросмещение, виброускорение и частоту колебаний. В зависимости от необходимой точности измерения диапазона колебания измеряемой величины рекомендуют тот или иной датчик.

Для измерения смещения колебания частотой меньше  $1 \text{ Гц}$  можно рекомендовать датчики с реостатными, электромагнитными и фотоэлектрическими преобразователями. Измерение производится относительно неподвижного основания, так как трудно создать подвес, работающий в таком частотном диапазоне.

Для измерения параметров вибраций в частотном диапазоне  $5 - 500 \text{ Гц}$  можно использовать акселерометры с проволочными тензоэлементами, индукционные, пьезоэлектрические, емкостные и электромеханические виброметры, но тогда в измерительную схему необходимо включать интегрирующие цепочки, позволяющие 1 или 2 раза интегрировать или дифференцировать сигнал, поступающий с датчика.

Для измерения смещений меньших  $1 \text{ мкм}$  можно рекомендовать датчики с емкостными преобразователями, а для измерения больших смещений ( $1-3 \text{ мм}$  и больше) служат датчики с электромагнитными и реостатными преобразователями.

Виброускорения измеряются акселерометрами с проволочными, пьезоэлектрическими и индуктивными преобразователями. При выборе датчика необходимо особое внимание обращать на диапазон частот измеряемых колебаний. Так, например, датчики с индукционным преобразователем хорошо работают в диапазоне  $12-1000 \text{ Гц}$ , а датчики с пьезоэлектрическими преобразователями — с  $5 \text{ Гц}$ .

## 2.6 Погрешности преобразователей

Основными условиями, определяющими выбор типа вибрационного измерительного преобразователя и его чувствительного элемента, являются диапазон измерения и величина суммарной погрешности. Последняя состоит из погрешностей, зависящих от способа преобразования перемещений чувствительного элемента, от воздействия боковых вибраций или вибраций, направленных под углом к измеряемым, от инерционных погрешностей, от изменения температуры и давления окружающей среды, от сухого трения, изменения режима электропитания, влияния внешних электрических и магнитных полей и от погрешностей, возникающих при расшифровке записи колебания.

Рассмотрим влияние наиболее важных из вышерассмотренных погрешностей на работу датчика.

Погрешность от способа преобразования перемещений чувствительного элемента. Преобразование колебаний инерционного элемента в перемещение указателя прибора возможно механическим, оптическим и электрическим способом.

При механическом способе преобразования перемещений возникают большие погрешности, которые зависят от кинематической схемы устройства, величины приведенной массы рычажной системы, наличия зазоров в сочленениях механизма, трения пера о бумагу и т. д.

При оптическом способе преобразования погрешности от трения о бумагу отсутствуют, так как перемещение инерционного элемента преобразуется в поворот зеркала, укрепленного на специальных растяжках. В приборах с низкой частотой собственного колебания инерционного элемента зеркальце закрепляется на маятнике таким образом, что ось вращения зеркала совпадает с осью вращения чувствительного элемента. В приборах, где чувствительные элементы имеют прямолинейные перемещения, поворот зеркала производят с помощью специальной рычажной системы. Такие устройства поворота зеркала непременно вносят новые погрешности.

Электромеханические преобразователи имеют ряд достоинств по сравнению с механическими и оптическими. Они позволяют получить высокую

чувствительность, большой диапазон измерения, малую инерционную погрешность и обеспечивают передачу сигнала на расстояние.

Неточная установка датчика на испытуемом объекте приводит к нарушению его кинематики. При больших углах отклонения оси датчика от направления действия вибрации может произойти заклинивание чувствительного элемента, а также могут появиться добавочные погрешности от боковых составляющих ускорения.

Погрешности от воздействия боковых вибраций. Боковые составляющие вибраций направленные перпендикулярно или под углом к измеряемым вибрациям, вносят погрешности в величину и направление измеряемых вибраций.

При проектировании датчиков стремятся введением специальных элементов уменьшить влияние боковых составляющих, либо ограничить их действие. Боковые составляющие вибраций в сильной степени сказываются на точности работы датчиков, в особенности датчиков с чувствительным элементом маятникового типа.

Предложено несколько конструкций чувствительных элементов, в которых погрешность от боковых составляющих полностью отсутствует. В некоторых из них инерционная масса скользит по двум вращающимся цилиндрическим направляющим. Такая схема чувствительного элемента допускает строгое поступательное движение инерционной массы.

Инерционные погрешности зависят от отношения частоты измеряемого колебания к частоте собственных колебаний инерционной массы и величины степени успокоения. Суммарная инерционная погрешность при известных  $q$  и  $D$  позволяет определить частоту собственных колебаний.

Погрешности от изменения температуры и давления окружающей среды могут быть учтены, так как это систематические погрешности. Для их определения записывают температурную или высотную характеристику, т. е. определяют зависимость чувствительности всей виброизмерительной аппаратуры или одного датчика от окружающей температуры или давления при постоянной частоте и амплитуде синусоидальной вибрации. Наиболее целесообразным способом устранения погрешности от изменения температуры является термостатирование прибора, установка его в помещении, где поддерживается постоянная температура.

Погрешность сухого трения. Непостоянство трения при перемещении инерционного элемента по направляющим стержням приводит к изменению амплитуды и фазы колебаний, т. е. вносится погрешность в результаты измерения. Уменьшая трение в опорах чувствительного элемента, можно значительно повысить чувствительность прибора, а следовательно, уменьшить погрешность измерения.

Проектируемые в настоящее время виброизмерительные приборы имеют подвесы с вращающимися направляющими, в которых при перемещении одной детали по другой возникают малые силы трения.

Погрешность от изменения режима электропитания. Так как измерительная аппаратура потребляет большую мощность, то выдержать постоянные режимы питания трудно. Для выяснения влияния изменения режима питания на работу виброизмерительной аппаратуры снимают частотные и амплитудные характеристики измерительного канала при различных напряжениях, затем строят графики зависимости чувствительности от напряжения. На этом же листе строят графические зависимости эталонной чувствительности при номинальном напряжении и, кроме того, откладывают вверх и вниз допустимые изменения чувствительности; после этого при сопоставлении графических зависимостей находят соответствующие допустимые колебания напряжения.

Для устранения влияния на точность работы вибрационной измерительной аппаратуры изменений в режиме питания необходимо подавать стабилизированное питание.

Погрешность от внешних электрических и магнитных полей. Если датчик работает в больших магнитных и электрических полях, то в его катушке может индуцироваться дополнительная э. д. е., вносящая погрешность в результат измерения. Эта погрешность является систематической, поэтому она легко может быть учтена при расшифровке кривой колебания. Для определения влияния посторонних магнитных и электрических полей проверяют величину э. д. с. датчика по осциллографу, перемещая его вокруг объекта. Датчик, имеющий металлический кожух с проводкой, выполненной кабелем с экранированным проводом, не подвергается влиянию магнитных и электрических полей.

## **2.7 Приборы для регистрации и измерения параметров вибрации**

Ниже рассмотрены принципы действия и конструктивные особенности виброизмерительной аппаратуры, часто используемой в практике виброизмерений.

При проектировании виброизмерительного прибора стремятся подбором параметров деталей и узлов чувствительного элемента или введением в схему интегрально-дифференциальных контуров найти область применения прибора, т. е. заранее указать, какой параметр вибрации будет измерять разработанный прибор. Предположим, что подвес чувствительного элемента предназначен для измерения амплитуды колебания. Если в датчике используется индуктивный преобразователь, индуктивность которого изменяется при изменении зазора между якорем и сердечником, то такой прибор будет измерять амплитуду колебания.

Для измерения скорости колебания этим прибором необходимо проинтегрировать сигнал, поступающий в измерительную схему, а для измерения ускорения сигнал надо проинтегрировать дважды.

В датчики с индукционным преобразователем, сигнал которого пропорционален скорости колебания, для измерения амплитуды колебания необходимо вводить интегральные контуры, служащие для интегрирования сигнала, поступающего с датчика. Для измерения ускорения колебания сигнал необходимо проинтегрировать.

Таким образом, тот или иной параметр вибрации можно измерить с помощью преобразователей, используя для этого в измерительной схеме интегральные и дифференциальные ячейки.

### **Виброметры и вибрографы**

Под виброметром понимают виброизмерительный прибор, позволяющий измерять амплитуду колебания. Если в приборе имеется устройство записи изменений амплитуды колебания во времени, то такой прибор называют вибрографом.

Вследствие простоты и надежности измерения для контроля амплитуды вибраций применялись и в настоящее время применяются механические виброизмерительные приборы. Рассмотрим в качестве примера принцип действия механического виброметра и вибрографа, служащих для измерения и записи амплитуды колебания.

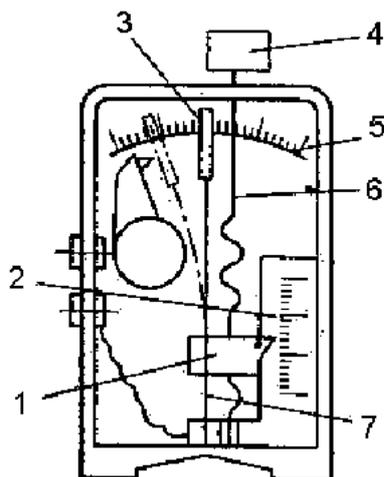


Рис.49.Схема резонансного виброметра

Резонансный виброметр Колесника (рис. 49) снабжен упругой пружиной 7, на конце которой закреплена инерционная масса, имеющая форму указателя 3. Частота собственных колебаний чувствительного элемента изменяется путем перемещения гайки 1 вдоль микрометрического винта 6. Гайка перемещается при вращении барабана 4. Отсчет частоты собственных колебаний инерционного элемента производят по шкале 2.

При производстве измерений виброметр закрепляется на исследуемом объекте. Затем вращением барабана 4 фиксируют по шкале 5 первое максимальное отклонение стрелки 3. Максимальное отклонение стрелки соответствует совпадению частоты собственных колебаний инерционного элемента и вынужденных колебаний, действующих на корпус датчика.

По шкале 5 фиксируют амплитуду колебания, а по шкале 2 — частоту вынужденных колебаний первой гармоники, равную частоте собственных колебаний при резонансе. При дальнейшем перемещении гайки вдоль винта можно зафиксировать частоту и амплитуду колебания второй, третьей гармоник и так далее. Таким образом, этот прибор позволяет определять амплитуду и частоту составляющих сложного колебательного процесса.

В резонансных виброизмерительных приборах величина амплитуды и частоты вынужденных колебаний в сильной мере зависит от сопротивления среды. Как известно, коэффициент сопротивления среды подвержен колебаниям при изменении температуры, возникновении зазоров в движущихся деталях, появлении грязи в перемещаемых деталях и т. д., поэтому резонансные приборы имеют большую и нестабильную во времени погрешность измерения.

Приборы, позволяющие измерять амплитуду колебаний при прижатии прибора к исследуемому объекту без закрепления на нем, называются ручными. Принципиальная схема ручного вибрографа представлена на рис. 50.

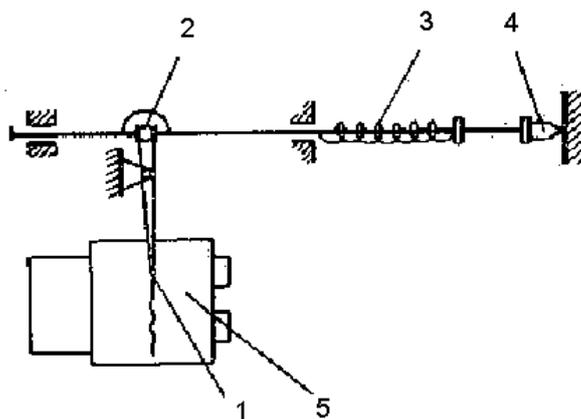


Рис.50. Схема ручного вибрографа

Усилие прижатия измерительного штифта 4 вибрографа к изделию выбирается таким, чтобы запись кривой изменения амплитуды смещения попадала на середину ленты 5. Запись производят пером 1, которое шарниром 2 соединено с измерительным штифтом. Величина измерительного давления обеспечивается пружиной 3. Лента протягивается часовым механизмом со скоростью 4 см/с. На приборе можно записывать колебания с амплитудой 0,05 – 4 мм в частотном диапазоне 15 – 100 Гц.

В современных приборах непосредственная запись изменения параметров колебательного процесса не производится; они, как правило, воспринимаются чувствительными элементами механического типа, затем преобразуются в электрические импульсы и записываются шлейфовым и катодным осциллографом или фиксируются указывающим электрическим прибором.

При создании электронной виброизмерительной аппаратуры необходимо уделять особое внимание чувствительности прибора, под которой понимают отношение амплитуд выходного и входного сигналов, измеренных каждый в своих единицах. Основными параметрами, характеризующими точность работы виброизмерительной аппаратуры, являются: частотная, амплитудная и фазовая характеристики.

Электронная виброизмерительная аппаратура состоит из датчика, усилителя с блоком питания и записывающего устройства. В комплект аппаратуры могут входить также интегрирующие, дифференцирующие устройства и фильтры.

Для измерения параметров вибраций применяется аппаратура, состоящая из индукционного датчика, измерительной системы и указывающего прибора.

В индукционном датчике при воздействии на него вибрации возникают электрические сигналы, пропорциональные скорости перемещения инерционного элемента. Принцип работы датчика основан на следующем. При пересечении полем постоянного магнита витков катушки в ней индуцируется э. д. с. Так как катушка жестко связана с корпусом датчика, то э. д. с. будет пропорциональна скорости относительного движения магнита и корпуса. Для обеспечения неподвижного положения магнита по отношению к неподвижной системе координат, собственная частота подвеса выбрана значительно ниже частоты исследуемых сигналов, так что практически магнит остается в покое.

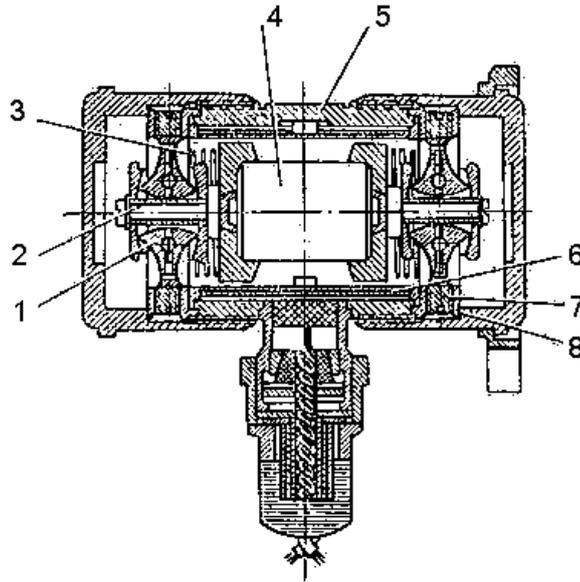


Рис.51. Общий вид индукционного датчика

Датчик представляет собой сбалансированную массу (постоянный магнит) 4, помещенную внутри корпуса 5, с которым жестко соединены катушки 6 (рис. 51). Постоянный магнит связан с корпусом датчика двумя обоймами; в наружной обойме 8 расположены три стальных подпятника 7, опирающиеся на оси сектора 1 для центрирования внутренней обоймы 2. Подпятник выполнен в виде стального винта, что позволяет регулировать зазор между секторами 1 и внутренней обоймой 2. Две цилиндрические пружины 3 обеспечивают среднее положение магнита.

При действии возмущающей силы в направлении оси датчика секторы, качаясь в подшипниках, дают возможность подвижной системе перемещаться относительно корпуса датчика. Магнитный поток постоянного магнита проходит через два воздушных зазора, замыкаясь через железный корпус датчика.

Для уменьшения влияния собственных колебаний системы на результаты измерения предусмотрено утолщение каркаса катушки, в которой при движении магнита возникают индукционные токи. Магнитные потоки индукционных токов, взаимодействуя с основным потоком, гасят собственные колебания подвижной системы. При движении корпуса датчика, а следовательно, и катушки относительно магнита, в ней индуцируется э. д. е., величина которой определяется по формуле

$$E = Bnlv \cdot 10^{-5} \text{ [мВ]}, \quad (199)$$

где  $B$  — индукция магнитного потока;

$n$  — число витков;

$l$  — средняя длина витка, см;

$v$  — скорость движения обмотки относительно магнита, см/с.

Основной величиной, характеризующей датчик, является его чувствительность  $S$ , определяемая формулой

$$S = \frac{E}{A}, \quad (200)$$

где  $E$  — э. д. е., индуцируемая в катушке датчика, мВ;

$A$  — амплитуда вибрации, мм.

Для точного измерения колебаний с малой амплитудой используют измерительные приборы с емкостными датчиками. К достоинствам емкостных датчиков относятся: простота конструкции; высокая точность и чувствительность; малые вес и геометрические размеры.

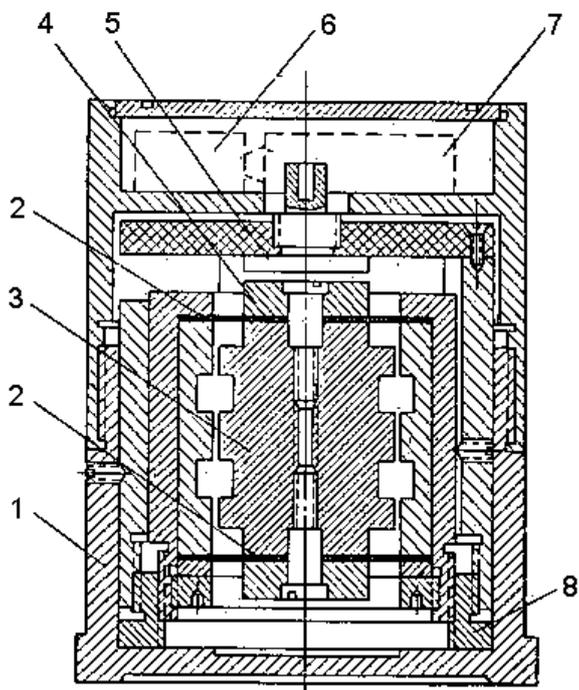


Рис. 51. Общий вид емкостного датчика

Датчик (рис. 51), емкость которого изменяется при изменении зазора между пластинами конденсатора, состоит из корпуса *1*, внутри которого на двух упругих пружинах *2* подвешена инерционная масса *3*; к ней прикреплена пластина *4* конденсатора. Другая пластина *5* площадью  $0,8 \text{ см}^2$  с помощью изоляционной планки закреплена на цилиндре. Для того чтобы пластины конденсатора были параллельны друг другу, их предварительно устанавливают перпендикулярно осям инерционной массы и цилиндра (проверка правильности установки производится автоколлиматором).

Чувствительность датчика зависит от начального зазора между пластинами, поэтому в датчике предусмотрено регулировочное приспособление, позволяющее изменять зазор между пластинами с высокой точностью. Гайка *8* имеет дифференциальную резьбу с разницей в шаге  $0,1 \text{ мм}$ . По окружности гайки нанесено 100 делений, так что поворот гайки на одно деление изменяет расстояние между пластинами конденсатора на  $1 \text{ мкм}$ . Изменение расстояния при тарировании датчика контролируют интерференционным методом. Для установки начального зазора пластины сводят до соприкосновения и момент соприкосновения проверяют пробником.

### Приборы для измерения и записи ускорений

Приборы, служащие для измерения и записи ускорений, получили название акселерометров и акселерографов. В практике измерения ускорений наибольшее распространение получили акселерометры с преобразователями индуктивными, тензометрическими и пьезоэлектрическими.

**Индуктивный акселерометр** состоит из датчика с индуктивным преобразователем, измерительного устройства и устройства записи. Индуктивный преобразователь параметрический, его переменным параметром, зависящим от измеряемого ускорения, является реактивное сопротивление катушек.

Датчик дифференциального типа (рис. 52) имеет магнитопровод состоящий из двух сердечников 1, собранный из Ш-образных пластинок, обращенных выступами друг к другу. На крайних стержнях сердечников магнитопровода насажены две пары катушек 2. Якорь изготовлен из мягкого железа. В воздушных зазорах между крайними стержнями сердечника магнитопровода передвигается подвижная система датчиков.

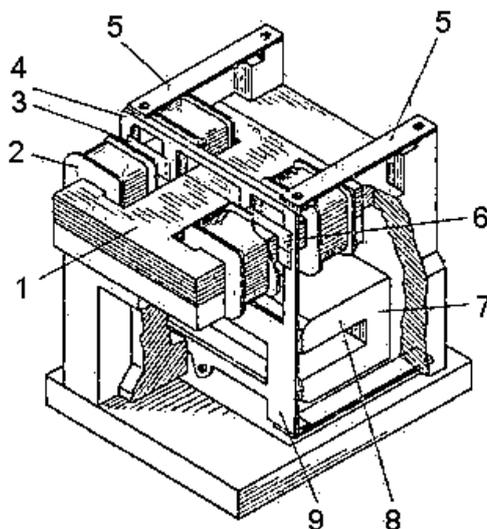


Рис.52. Общий вид индуктивного датчика

Она представляет собой легкую алюминиевую рамку 4, подвешенную на двух парах плоских пружин 5. На рамке укреплены две железные пластинки 3 и -6, перегораживающие воздушные зазоры магнитопровода. При отклонении рамки от среднего положения вследствие действия сил, в одном магнитопроводе магнитный поток и обусловленное им реактивное сопротивление катушек увеличиваются, в то время как в другом магнитопроводе они уменьшаются. Поэтому в измерительной диагонали входного моста, двумя плечами которого являются катушки преобразователя, появляется напряжение разбаланса.

В датчике применено сильное электромагнитное демпфирование. Демпфирующая система, собранная в нижней части датчика, состоит из двух сильных постоянных магнитов 7, имеющих полюсные наконечники 8 и рамки 9. В зазорах постоянных магнитов движется рамка; взаимодействие возникающих в ней вихревых токов с магнитным полем постоянных магнитов вызывает затухание колебаний подвижной системы.

Для крепления датчика к исследуемому объекту в корпусе имеются отверстия. Герметизация корпуса осуществляется резиновым ободком, расположенным в специальных пазах.

**Тензометрический акселерометр** состоит из датчика с преобразователем омического сопротивления, измерительного устройства и устройства фиксации результатов измерения.

Принцип работы тензометрических датчиков основан на измерении деформаций упругого звена инерционной подвески при движении инерционной массы относительно корпуса датчика. Лучшими считаются датчики, в которых упругий элемент испытывает деформацию растяжения. Если же упругий элемент испытывает растяжение, возможна высокая собственная частота колебаний чувствительного элемента.

В датчике (рис.53) роль упругого звена играют цилиндрические стаканы 4. Величина инерционной массы определяется суммой масс болта 7, гайки 11, днищ стаканов и массой центральной утолщенной части мембраны 10. Трехлучевая мембрана, к которой прижаты доньшки стаканов, своими лучами с некоторым натягом крепится винтами 8 и кольцом 9 к корпусу.

Ввиду того, что проволочные решетки наклеены на стаканы в диаметрально противоположных точках, а стаканы подвешены на мембранах, можно считать, что чувствительный элемент не будет реагировать на поперечные ускорения.

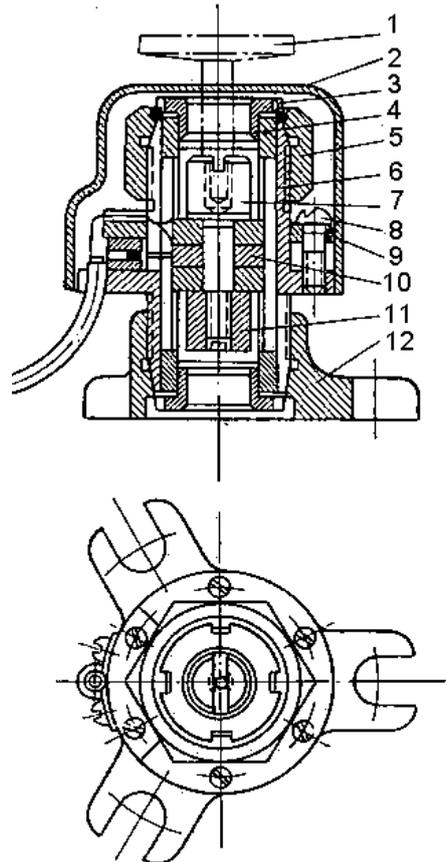


Рис.53. Общий вид тензометрического датчика

Свободные концы стаканов притягиваются к корпусу 6 датчика с помощью гаек 5 и 12, имеющих, как и корпус, конические поверхности. Нижняя гайка 12 имеет лапы для крепления корпуса к объекту. Сверху корпус закрывается крышкой 2. Поворотом гайки 3 можно создать необходимое начальное натяжение упругого элемента, поэтому стаканы работают не только на растяжение, но и на сжатие.

Частота собственных колебаний инерционного элемента определяется выражением

$$\omega_{01} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2E_{cm}F}{lM}}, \quad (201)$$

где  $E_{cm}$  — модуль упругости материала стаканов,  $кг/см^2$ ;

$F$  — площадь поперечного сечения стаканов,  $см^2$ ;

$l$  — длина каждого стакана,  $см$ ;

$M$  — масса инерционного груза,  $кг \cdot с/см^2$ .

Частота собственных колебаний инерционного элемента (стаканы изготовлены из дюралюминия) равна 6500—7000  $Гц$ .

Датчиком можно измерять ускорения, изменяемые в частотном диапазоне до 1200  $Гц$ . На стакане 4 наклеены две проволочные решетки, составляющие мост, сигнал с которого подается на усилитель, имеющий крутизну, равную  $4 \mu В/мВ$ . При измерении ускорений до  $15g$  к инертной массе крепится добавочный груз в 100 г.

При тарировании датчика на его столик  $l$  устанавливаются грузы.

Тензометрические преобразователи с непосредственной подвеской инерционного элемента на тензочувствительной проволоке имеют повышенную чувствительность. Конструкция такого датчика представлена на рис.54.

Роль инерционной массы играют детали 4, 5 и 6 и скрепляющие их винты 3. Упругим элементом является тензочувствительная проволока, соединяющая с некоторым натягом основание прибора и подвижную массу 5. Консольные пружины 2 из бериллиевой бронзы, имеющие весьма малую жесткость на изгиб, служат для направления перемещения инерционной массы.

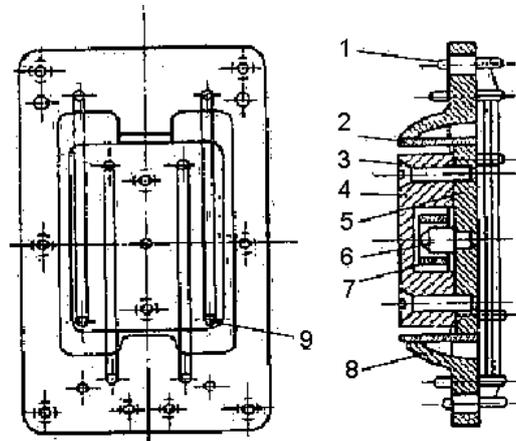


Рис.54. Общий вид датчика с непосредственной подвеской инерционной массы

Из четырех тензопроволочек собрана цепь моста. Проволока несколькими рядами наматывается на стерженьки 1, запрессованные в корпус 8, и на стерженьки 9, закрепленные на подвижной массе. При измерении больших ускорений палец 6 и деталь 7 скрепляются с основанием, что предохраняет тензопроволочки от разрыва. Чувствительный элемент датчика закрепляется в корпусе и заливается силиконовым маслом.

Частота собственных колебаний инерционного элемента определяется по формуле

$$\omega_{01} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8E_n F_n}{lM}} \quad (202)$$

где  $E_n$  — модуль упругости проволоки,  $кг/см^2$ ,

$F_n$  — площадь поперечного сечения проволоки,  $см^2$ ,

$n$  — число витков в одной решетке,

$l$  — база тензоэлемента,  $см$ ,

$M$  — масса подвижных частей датчика,  $кг \cdot с^2/см$ .

Для датчика, показанного на рис. 54, частота собственных колебаний инерционного элемента равняется 300—400 Гц. Прибор позволяет регистрировать параметры вибраций на ламповом вольтметре.

**Пьезоэлектрический акселерометр** вследствие своей простоты и высокой чувствительности находит широкое применение при измерении ускорений и ударных нагрузок. В корпусе датчика укрепляется кристалл, на поверхностях которого при воздействии внешних сил появляются электродвижущие силы, пропорциональные величине ускорения, действующего на датчик. Пьезоэлектрические акселерометры состоят из датчика, корректирующих устройств, усилителей и записывающих приспособлений.

При проектировании акселерометрической аппаратуры необходимо уделять особое внимание ее чувствительности.

Чувствительность акселерометра по ускорению определяется по формуле

$$s = \frac{E}{\ddot{\varepsilon}_0} = \frac{9810E}{(2\pi f)^2 \xi_0} \quad (203)$$

чувствительность акселерографа определяется по ускорению:

$$s_y = \frac{kA}{\ddot{\varepsilon}_0} = \frac{9810kA}{(2\pi f)^2 \xi_0} \quad (204)$$

где  $E$  — выходное напряжение.

$\varepsilon$  — измеряемое ускорение колебания,  $f$  — частота измеряемого колебания,

$k$  — коэффициент ослабления поступающего сигнала.

## 2.8. Приборы и методы тарирования, записи и анализа колебаний

Приборы, служащие для тарирования, анализа и записи колебательных процессов, несмотря на их большое значение, иногда относят к группе вспомогательных приборов.

Под тарированием понимают испытания, при которых находят количественные характеристики прибора, необходимые для преобразования выходной величины в исследуемый параметр вибраций.

При тарировании находят частотные, амплитудные, температурные и другие характеристики, а иногда характеристики фазовые, высотные и электропитания. Тарировочные испытания производят в помещениях, имеющих специальное оборудование для создания искусственных колебаний. По видам создаваемой вибрации вибраторы делятся на однокомпонентные, двухкомпонентные и трехкомпонентные.

В зависимости от формы создаваемой вибрации вибраторы могут быть гармоническими, бигармоническими, импульсными и имитационными. По виду энергетического привода вибраторы разделяются на механические, электродинамические, пьезоэлектрические, пневматические, гидравлические и т. д.

При тарировании виброизмерительных приборов производят контроль всего измерительного канала или отдельных элементов измерительного прибора, а общий градуировочный коэффициент получают расчетом.

Первый метод позволяет получить более точное значение градуировочного коэффициента, пользуясь формулой:

$$5. \quad N = px,$$

где  $N$  — измеряемая величина,

$p$  — градуировочный коэффициент,  
 $x$  — показание регистрирующего устройства.

При втором методе тарирования определяют ряд частотных тарировочных коэффициентов  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$  а затем общий коэффициент

$$p = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_n.$$

При втором методе тарирования возникает большое число разнообразных погрешностей.

## 2.9 Приборы для искусственного создания колебаний (вибростенды)

К вибростендам предъявляются следующие требования:

- 1) высокая точность имитирования колебания в пределах заданных амплитуд и частот;
- 2) необходимость иметь специальные устройства, позволяющие производить отсчет амплитуды и частоты с необходимой точностью;
- 3) постоянство амплитуды колебания платформы при изменении частоты колебания;
- 4) возможность градуировать вибродатчики, работающие в горизонтальном и в вертикальном положении (платформа должна поворачиваться на угол  $90^\circ$ );
- 5) хорошая синусоидальная форма амплитуды колебания и удовлетворительная синусоидальная форма изменения скоростей и ускорений (то и другое достигается устранением люфтов, зубчатых передач, плавностью хода платформы и т. п.). Необходимо отметить, что в вибростендах с зубчатыми передачами возникают вибрации из-за дефектов изготовления зубчатых передач, которые могут исказить кривую колебания виброплатформы.

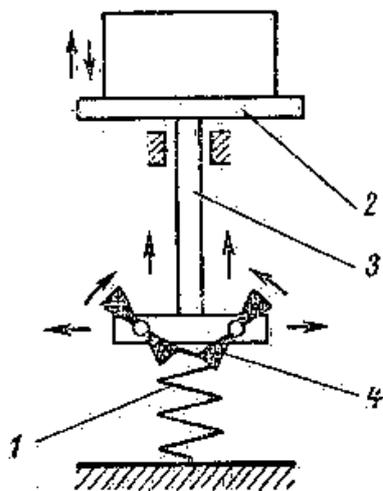


Рис.55. Принципиальная схема центробежного вибратора

При тарировании чаще всего применяют центробежные и эксцентровые механические вибраторы. Колебательная система центробежного вибратора (рис. 55) состоит из пружины 1 массивной подвижной части (объединяющей платформу 2 с испытуемым объемом, шток 3) и собственно вибратора I. Последний имеет два вала, вращающихся в разные стороны, на концах которых находится по два стальных сектора. При вращении несимметрично расположенных секторов возникают центробежные силы. Составляющие центробежной силы в направлении оси штока складываются, а в перпендикулярном направлении вычитаются. Амплитуду вибрации регулируют изменением угла между секторами.

56. Принципиальная схема станда с эксцентриковым приводом представлена на рис.

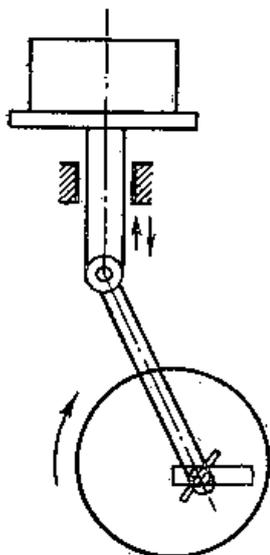


Рис. 56. Принципиальная схема эксцентрикового вибростенда

На эксцентриковых вибраторах с подвижными секторами трудно обеспечить постоянство амплитуды колебания платформы, так как точность установки подвижных секторов низкая. При большом количестве подвижных секторов платформа вибростенда может испытывать поперечные колебания, вызванные аэродинамическими воздействиями. При сближении секторов во время вращения эксцентриков возбуждаемые ими воздушные потоки складываются, а при удалении уменьшаются. Из-за аэродинамических сил боковые составляющие колебания платформы могут достигать 3—5% от основного перемещения, что увеличивает коэффициент искажений линейных колебаний до 5—10%.

В вибростендах роторного типа указанные недостатки устранены. Эксцентрики вибростенда изготовлены в виде двух барабанов с расположенными по окружности, равномерно удаленными от оси вращения и друг от друга отверстиями, в которые вставляются валики одинакового веса. При удалении одного или двух валиков барабаны становятся неуравновешенными. При вращении барабанов возникают возмущающие силы.

Наибольшее распространение получили вибростенды с электродинамическим приводом. Принципиальная схема электродинамического вибростенда представлена на рис. 57.

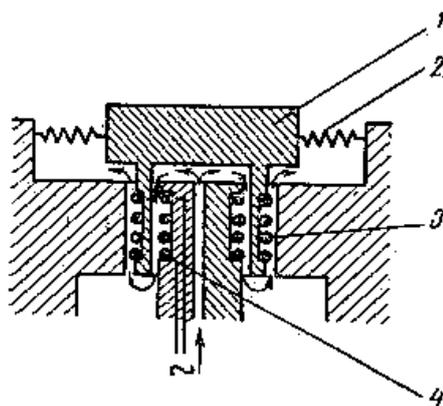


Рис. 57. Принципиальная схема электродинамического вибростенда

В силовую катушку 3 подается переменный ток от звукового генератора. Взаимодействуя с магнитным полем электромагнита 4, катушка вместе со столом 1 приходит в колебание в направлении продольной оси с частотой переменного тока. В вибраторах данного типа можно получить высокие частоты (до 10 000 Гц) и микроскопические амплитуды. На электродинамических вибростендах трудно получить на высоких частотах большие амплитуды колебания стола. Стол вибростенда закрепляется на пружинах 2.

Общий вид электродинамического вибростенда типа ВС 300-П показан на рис. 58.

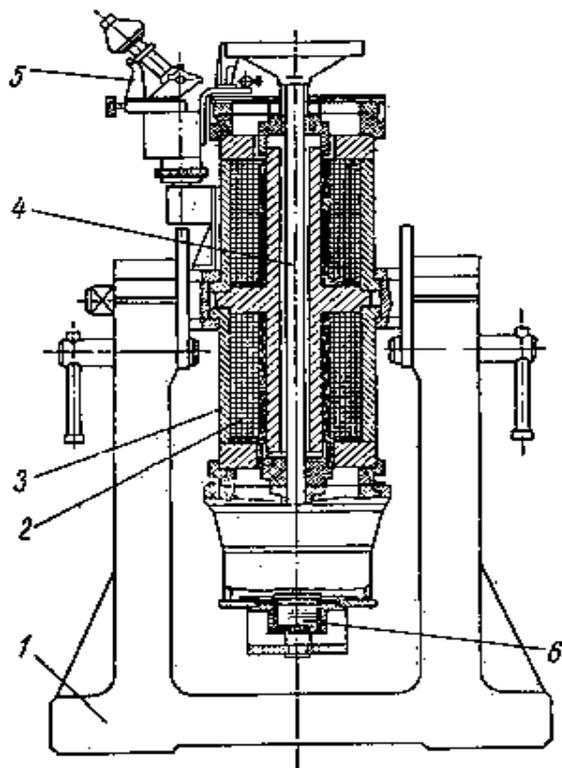


Рис. 58. Схема вибростенда типа ВС-300-П

Платформа вибростенда может совершать гармонические колебания в частотном диапазоне 50—1000 Гц и 1000—10 000 Гц с максимальной амплитудой на низких частотах не более 0,5 мм. Грузоподъемность вибростенда до 5 кг.

Электродинамический вибростенд состоит из следующих частей: станины 1; катушки возбуждения 2, магнитопровода 3; железного стержня 4; измерительного микро-

скопа 5; датчика 6.

При взаимодействии двух электромагнитных полей, управляемых генераторами звуковой частоты, приводится в движение платформа вибростенда. Сигналы генератора через мощный усилитель подаются на катушки. Одно магнитное поле создается неподвижной катушкой (катушкой возбуждения) при питании ее постоянным током напряжением 240 В, а другое подвижными катушками. Для этого в подвижные катушки подается переменный ток, величина которого регулируется звуковым генератором с частотой до 10 000 Гц. При взаимодействии магнитных полей цилиндрические катушки подвижной системы совершают колебательные движения, обеспечивая гармонический характер движения всей колебательной системы вместе с поверяемым виброметром.

На электродинамических вибростендах трудно получить амплитуду колебания более 10 мкм на частотах более 1000 Гц из-за малой мощности усилительных устройств. Поэтому в вибростенде применяется система, работающая на резонансах продольных колебаний стержня. Вибростенд работает как обычный электродинамический громкоговоритель только до определенных пределов, а затем взаимодействие электромагнитных полей приводит к деформации стержня смещения его элементарных частиц, распространяясь по длине стержня, накладываются друг на друга, создавая колебательный процесс.

Вибростенд для тарирования малогабаритных датчиков показан на рис. 59. Вибростенд изготовлен на базе динамического громкоговорителя. На катушке вибратора укреплена площадка 2, служащая для установки исследуемых датчиков 4. Катушка подвешена на трех пружинах (струнах), обвитых медной проволокой для гашения собственных колебаний.

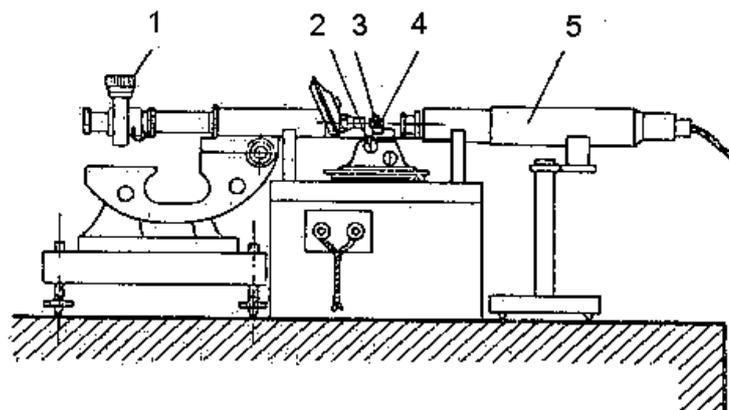


Рис.59. Принципиальная схема вибростенда для тарировки малогабаритных датчиков

Такая подвеска позволяет площадке совершать правильные синусоидальные колебания, не сопровождающиеся крутильными колебаниями. Под площадкой 2 закреплена маленькая катушка. Ее колебания в кольцевом зазоре постоянного магнита позволяют контролировать амплитуду колебания площадки. Измерение амплитуды колебания вибростенда производится оптической системой. Для этого на площадку устанавливается черный экран 3 с отверстием 2 мкм. Экран освещается коллиматором 5. При колебании площадки пятно размывается в линию, длина которой измеряется окулярным микроскопом 1.

При тарировании напряжение с датчика через катодный повторитель и усилитель подается к стрелочному прибору. Напряжение с датчика измеряется методом сравнения с известным напряжением, подаваемым на катодный повторитель через делитель напряжения. Измерения производят ламповым вольтметром. По полученным данным строят частотные характеристики виброизмерительного прибора.

Сигнал от исследуемого датчика подается на электронный осциллограф, на экране которого проверяют качество синусоидального колебания. Погрешность тарирования за-

висит от погрешности лампового вольтметра и может достигать 3—5%. Тарировать на этом вибростенде можно в частотном диапазоне 10—1500 Гц.

Довольно часто приходится проверять виброизмерительные приборы непосредственно перед испытаниями, так как по время транспортирования аппаратуры, при ее закреплении и настройке градуировочный коэффициент может измениться. Для тарирования на месте испытания предложен переносный вибростенд со следующими характеристиками: частота колебания столика 1—40 Гц; амплитуда колебания 0 — 2 мм; наибольший вес испытываемого объекта до 3,5 кг.

Отсутствие зубчатых зацеплений, строгая подгонка вращающихся и перемещающихся деталей позволяют получить чисто гармоническую форму колебаний стола вибростенда. Жесткие кинематические связи полностью воспринимают силы инерции столика и препятствуют изменению амплитуд перемещения при изменении частоты колебания виброплатформы.

Кинематическая схема переносного вибростенда типа ВП-2 показана на рис. 60. Вращение от универсального электродвигателя 1 поступает на вариатор 2, служащий для изменения скорости вращения шпинделя 3. Вариатор состоит из двух шкивов, связанных между собой системой осей и втулок. Для изменения чисел оборотов шпинделя надо переместить шкивы вдоль оси вариатора. Перемещение 1 шкивов осуществляется червяком.

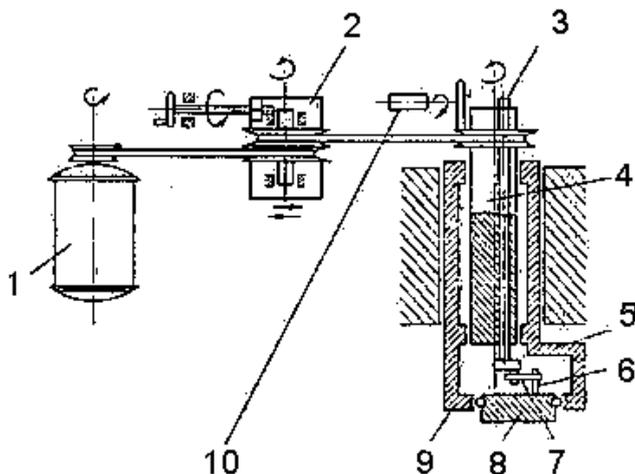


Рис. 60. Кинематическая схема переносного вибростенда

Шпиндель с эксцентриковым приводом позволяет получить амплитуду колебания поворотного столика 8 в пределах 0 — 2 мм. Для этого в вибростенде предусмотрено специальное устройство, состоящее из кольца 6, оси 4, обоймы 5 и тяги 7. Обойма 9 со шпинделем может поворачиваться относительно корпуса и закрепляться в трех фиксированных положениях: вертикальном, горизонтальном и под углом 45° относительно горизонтали. В приборе предусмотрено устройство 10 для измерения частоты колебаний столика, состоящее из индукционного датчика, выпрямителя и миллиамперметра, шкала которого отградуирована в герцах.

Проверяемый датчик устанавливается на столе вибростенда, а затем при различных частотах и амплитудах колебания платформы измеряют э.д. с. датчика, определяют градуировочные коэффициенты отдельных узлов или всего измерительного тракта.

## 2.10 Приборы для анализа и записи колебательных процессов

Для анализа и записи параметров вибраций служат анализаторы и осциллографы.

**Анализаторы.** Под анализом колебаний понимают разложение заданной периодической функции  $s=f(t)$  на гармонические составляющие. В практике виброизмерений находят применение механические и электромеханические анализаторы, которые позволяют анализировать периодические колебательные процессы. В случае непериодических процессов используется приближенный метод анализа, заключающийся в визуальном отыскании основных составляющих на различных участках виброграмм.

При анализе часто используют приборы, с помощью которых исследуемый сигнал раскладывается в частотный ряд специальными фильтрами. Если исследуемый сигнал стационарен, то для анализа используются анализаторы: гетеродинный с постоянной относительной шириной полосы пропускания, со смежными полосами и т. д.

Для анализа нестационарных сигналов широкое применение нашел  $1/3$ -октавный анализатор. В этом анализаторе при исследовании сигналов автоматически, последовательно, подключаются фильтры, ширина полосы пропускания которых составляет  $1/3$  октавы.

**Осциллографы.** Анализ колебательного процесса будет правилен лишь в том случае, если процесс существенно не изменяется за время анализа. Поэтому естественно стремление максимально сократить время анализа. Хорошие результаты в этом отношении дает применение приборов с автоматической записью; одновременно увеличивается точность измерения.

Для записи параметров вибраций во времени можно использовать быстродействующий самописец «Нейман». Запись электрического напряжения производится резцом на покрытой воском цветной бумажной ленте.

Для визуального наблюдения формы электрических колебаний инфра- и звуковой частоты, а также для рассмотрения формы и измерения основных параметров импульсных процессов большой длительности можно использовать электронный осциллограф.

В электронном осциллографе ЭНО-1 исследуемый сигнал от виброизмерительной аппаратуры поступает на вход усилителя, а оттуда на переключатель входа, который позволяет подключать различные входные сопротивления усилителя, а следовательно, устанавливать нужный размах изображения на экране. Затем сигнал поступает на усилитель вертикального отклонения, который усиливает его до величины, удобной для рассмотрения. Выходной усилитель связан с вертикально-отклоняющими пластинами электронно-лучевой трубки.

В усилителе имеются устройства, позволяющие регулировать чувствительность, проводить коррекцию нуля и регулировать смещение луча по вертикали.

Для калибрования чувствительности канала и для отклонения луча по вертикали служит специальный калибратор амплитуды.

Для получения линейно-отклоняющего напряжения, частота которого может регулироваться плавно и скачкообразно, служит генератор развертки, работающий в режиме непрерывных колебаний, ждущем режиме или режиме запуска от внутреннего генератора. С выхода генератора развертки отклоняющее напряжение подается на усилитель горизонтального отклонения луча. В усилителе поступающее напряжение возрастает по величине и приобретает симметричную форму.

Для согласования работы генератора развертки с исследуемым сигналом в осциллографе предусмотрен усилитель синхронизации, который, кроме того, осуществляет внутреннюю и внешнюю синхронизацию. При внутреннем запуске развертки включается генератор импульсов, который вырабатывает импульс, запускающий развертку.

Для вырабатывания синусоидального напряжения, которым луч модулируется по яркости, и для создания электрического масштаба времени служит калибратор длитель-

ности, работающий синхронно со ждущей разверткой.

Все блоки прибора связаны с электронно-лучевой трубкой, служащей для наблюдения исследуемых сигналов.

Блок питания с электронным стабилизатором служит для получения постоянных и переменных напряжений, необходимых для питания прибора.

## 2.11 Определение характеристик, представление и обработка экспериментальных данных

Для снятия частотных, амплитудных и фазовых характеристик виброизмерительных приборов датчик устанавливают на вибростенд.

Частотные характеристики определяют путем измерения напряжения на выходе усилителя при изменении частоты колебания платформы. По полученным данным строят графическую зависимость  $E=f(\omega)$ . Допускается отклонение ординат точек от прямой, соединяющей крайние точки характеристики, не более 10%.

При снятии амплитудной характеристики изменяют амплитуду колебания виброплатформы при строго фиксированной частоте колебания. По полученным результатам строят графическую зависимость

$$E = f(A). \quad (205)$$

При снятии фазовых характеристик виброизмерительной аппаратуры сигнал с исследуемого и эталонного датчиков, укрепленных на виброплатформе, подают на горизонтальные и вертикальные пластины осциллографа. Сдвиг фаз определяется по изменению геометрической формы кривой на трубке осциллографа.

Определение основных параметров вибродатчиков. Любой датчик характеризуется следующими основными параметрами: частотой собственных колебаний чувствительного элемента  $f_0$ , степенью успокоения  $D$  и чувствительностью  $s$ .

Для определения частоты собственных колебаний чувствительный элемент отсоединяется от успокоителя и приводится в колебание с помощью нитки или тонкой проволоки. Эти колебания чувствительного элемента записывают на фотопленке или бумаге. При записи собственных колебаний параметрического датчика необходимо на его чувствительном элементе закрепить маленькое зеркальце, а отраженный от него световой поток, при колебании чувствительного элемента записать на фотопленке, перемещаемой с постоянной скоростью. В энергетических датчиках для записи колебаний чувствительного элемента необходимо непосредственно подключать к преобразователю высокочувствительные вибраторы. Запись колебания чувствительного элемента должна сопровождаться записью отметчика времени.

Отсчитав на записи 10—15 полных колебаний за время  $t$ , определяют частоты собственных колебаний  $f_0$  по формуле

$$f_0 = 10 : t. \quad (206)$$

При определении степени успокоения предполагают, что демпфирующее устройство создает сопротивление, пропорциональное первой степени скорости. Если вершины записанной кривой колебания лежат на одной прямой линии, то в системе имеется сухое трение. Если же вершины располагаются по экспоненте, то отношением двух соседних амплитуд определяют декремент затухания

$$\Delta = \ln \frac{y_i}{y_{i+1}}. \quad (207)$$

Зная значение логарифмического декремента, можно определить степень успокоения по формуле

$$D = \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + 4\pi^2}} = \frac{\Delta}{2\pi \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta}{2\pi}\right)^2}}. \quad (208)$$

По величине степени успокоения определяют диапазон изменения параметров вибраций, которые измеряет данный датчик.

Определяя чувствительность прибора, необходимо учитывать конструктивные особенности и принцип действия датчика. У датчиков без преобразователей чувствительность определяется в зависимости от величины динамического коэффициента, который определяется выражением

$$\beta = \frac{y}{y_{cm}} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} D^2}}. \quad (209)$$

Для датчиков, в которых возникает э. д. с. при перемещении чувствительного элемента, чувствительность по амплитуде смещения определяется по формуле

$$s_y = \frac{U}{y} [мВ / мм], \quad (210)$$

где  $U$  — напряжение на выходе датчика,  $y$  — амплитуда колебания.

Чувствительность по амплитуде скорости

$$s_{\dot{y}} = \frac{U}{\dot{y}} = \frac{U}{2\pi f y} \cdot \frac{1}{2\pi} [мВ / мм \cdot Гц], \quad (211)$$

где  $\dot{y}$  — амплитуда скорости колебания,

$f$  — частота исследуемых колебаний.

Чувствительность по амплитуде ускорения

$$s_{\ddot{y}} = \frac{U}{\ddot{y}} = \frac{U}{(2\pi f)^2 y} \cdot \frac{9810}{g} [мВ], \quad (212)$$

где  $\ddot{y}$  — амплитуда ускорения.

При измерении чувствительности датчик закрепляют на платформе вибростенда. Задавая ей различные амплитуды смещения, скорости и ускорения, высокочувствительным прибором измеряют напряжение на выходе датчика.

Чувствительность параметрического датчика проверяется совместно со схемой, в которую он включается. К выходу измерительной системы подключается осциллограф.

Таким образом, при калибровании индуктивных, емкостных, тензометрических датчиков измеряют частоту собственных колебаний чувствительного элемента по осциллограмме с помощью отметчика времени, а амплитуду колебаний определяют оптически и интерференционными приборами. Амплитуду колебания можно определить также образцовым датчиком, предварительно тарированным на интерференционном приборе.

Представление и обработка экспериментальных данных. Экспериментальные данные, получаемые при исследовании колебательных процессов, можно представлять в виде таблиц, формул или графиков.

Чаще всего результаты исследования получают в виде виброграмм и фигур Лиссажу. Виброграммы, получаемые при помощи шлейфовых осциллографов на фотографической пленке или бумаге, подвергают анализу для определения амплитуды (смещения, скорости и ускорения), частоты и фазы колебания. Периодические колебательные процессы анали-

зируются довольно просто, для анализа непериодических колебательных процессов необходимо применять статистические методы обработки.

При большом количестве виброграмм их надо пронумеровать во избежание путаницы, указав на каждой виброграмме ее номер, дату снятия, номер заказа и фамилию экспериментатора.

При определении частоты, амплитуды и начальных фазовых углов составляющих периодического процесса можно пользоваться гармоническим анализом. Последний можно производить с помощью механических, электромеханических анализаторов или используя численный метод.

Для определения частоты колебания на виброграмме необходимы отметки времени. Иногда для определения основной частоты колебания делают дополнительные отметки, например, кратные скорости вращения рабочего органа.

Определяя частоту колебания, прежде всего устанавливают скорость движения ленты

$$v_{л} = \frac{l}{t} \text{ [мм/с]}, \quad (213)$$

где  $l$  — расстояние (мм) между отметками времени в соответствующие промежутки времени  $t$ .

Длину периода определяют по формуле

$$\lambda = \frac{L}{p} \text{ [мм]}, \quad (214)$$

где  $L$  — длина записи (мм), на которой помещается  $p$  полных периодов.

Период колебания определяют по формуле

$$T = \frac{\lambda}{v_{л}} \text{ [с]} \quad (215)$$

Частота колебания определяется выражением

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v_{л}}{\lambda} = \frac{l}{\lambda t} \text{ [Гц]}. \quad (216)$$

Точность определения частоты зависит в основном от длины исследуемой записи и от четкости отметки времени.

Амплитуда колебания определяется как половина размаха. Основные погрешности при определении амплитуды возникают из-за того, что трудно определить истинное положение вершины или впадины кривой. При определении амплитуды стремятся найти среднее положение между вершиной и впадиной, а затем относительно среднего положения кривой определяют размах колебания.

Определяя фазовый угол, сложное колебание раскладывают на простые, а затем находят положение вершины или впадины кривой по отношению к отметке времени.

### 3 СТАНДАРТИЗАЦИЯ

### 3.1 Положения и принципы стандартизации

Стандартизация – деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного и многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышения конкурентоспособности продукции, работ и услуг.

Стандартизация является эффективным средством:

1. Управления экономикой.
2. Установления рациональной номенклатуры выпускаемой продукции.
3. Влияния на качество, конкурентоспособность, эффективность продукции, на размещение её на рынках сбыта.
4. Повышения рентабельности предприятий.
5. Повышения уровня обороноспособности страны.

В сферу деятельности по стандартизации входят разработка, опубликование и применение стандартов. Важнейшими ее результатами являются повышение степени соответствия продукции, процессов и услуг их функциональному назначению, устранение барьеров в торговле и содействие научно-техническому сотрудничеству.

Отношения в области стандартизации в России регламентирует Федеральный закон № 184-ФЗ «О техническом регулировании», который введен в действие с 1 июля 2003 года. Рассмотрим статьи Федерального закона № 184-ФЗ «О техническом регулировании», касающиеся положений технического регулирования в области стандартизации.

Техническое регулирование (статья 2 этого закона) – представляет собой правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции или к продукции и связанным с требованиями к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации. А также в области установления и применения на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг и правовое регулирование отношений в области оценки соответствия. При этом продукция определена как результат деятельности, представленный в материально-вещественной форме и предназначенный для дальнейшего использования в хозяйственных и иных целях.

Основным документом в сфере технического регулирования является технический регламент. Технический регламент - документ, который принимается:

- международным договором Российской Федерации, подлежащим ратификации в порядке, установленном законодательством Российской Федерации;
- федеральным законом;
- указом Президента Российской Федерации;
- постановлением Правительства Российской Федерации;
- нормативным правовым актом федерального органа исполнительной власти по техническому регулированию. Технический регламент устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции или к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации).

В ст. 11 (глава 3) Федерального закона установлено, что целями стандартизации являются:

- повышение уровня безопасности жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного и муниципального имущества, объектов с уче-

том риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера; повышение уровня экологической безопасности, безопасности жизни и здоровья животных и растений;

- обеспечение конкурентоспособности и качества продукции (работ, услуг), единства измерений, рационального использования ресурсов;
- обеспечение взаимозаменяемости технических средств (машин и оборудования, их составных частей, комплектующих изделий и материалов), технической и информационной совместимости, сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-статистических данных, проведения анализа характеристик продукции (работ, услуг), исполнения государственных заказов, планирования и осуществления закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд;
- содействие соблюдению требований технических регламентов;
- создание систем классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации, систем каталогизации продукции (работ, услуг), систем обеспечения качества продукции (работ, услуг), систем поиска и передачи данных, содействие проведению работ по унификации.

Федеральный закон (ст.12) определяет следующие принципы стандартизации:

- добровольного применения документов в области стандартизации;
- максимального учета при разработке стандартов законных интересов заинтересованных лиц;
- применения международного стандарта как основы разработки национального стандарта, за исключением случаев, если такое применение признано невозможным вследствие несоответствия требований международных стандартов климатическим и географическим особенностям Российской Федерации, техническим и (или) технологическим особенностям или Российская Федерация в соответствии с установленными процедурами выступала против принятия международного стандарта или отдельного его положения;
- недопустимости создания препятствий производству и обращению продукции, выполнению работ и оказанию услуг в большей степени, чем это минимально необходимо для выполнения целей;
- недопустимости установления таких стандартов, которые противоречат техническим регламентам;
- обеспечения условий для единообразного применения стандартов.

Стандарт трактуется как документ, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг. Стандарт также может содержать правила и методы исследований (испытаний) и измерений, правила отбора образцов, требования к терминологии, символике, упаковке, маркировке или этикеткам и правилам их нанесения.

Документы в области стандартизации, используемые на территории Российской Федерации:

- национальные стандарты;
- правила стандартизации, нормы и рекомендации в области стандартизации;
- применяемые в установленном порядке классификации, общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации;
- стандарты организаций;
- своды правил;
- международные стандарты, региональные стандарты, региональные своды правил, стандарты и своды правил иностранных государств, зарегистрированных в Федеральном ин-

формационном фонде.

Совокупность национальных стандартов, общероссийских классификаторов технико-экономической и социальной информации, в том числе правил их разработки и применения, и своды правил представляют собой национальную систему стандартизации. Руководство работами по стандартизации в Российской Федерации осуществляет Национальный орган Российской Федерации по стандартизации, исполнение функций которого Правительством РФ возложено на Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование).

### **Основополагающие принципы построения стандартов**

**Принцип системности** заключается в том, что стандарт можно рассматривать как элемент системы взаимосвязанных стандартов, что позволяет исключить дублирование норм и требований и существенно упростить координацию работ по созданию и применению стандартов.

**Принцип оптимальности** требований, включаемых в стандарты, заключается в том, что в стандартах необходимо устанавливать уровень норм и требований, соответствующий современному уровню развития науки, техники и производства. Нахождение оптимальных решений достигается на основе применения математических методов оптимизации.

**Принцип предпочтительности** заключается в том, что для повышения уровня взаимозаменяемости и уменьшения номенклатуры изделий, их элементов, а также других объектов устанавливаются ряды значений стандартизуемых параметров на основе системы предпочтительных чисел.

**Принцип комплексности** проведения работ по стандартизации заключается в обеспечении всесторонности и полноты охвата работами по стандартизации объектов или групп взаимосвязанных объектов. Вследствие того, что показатели качества определенного вида продукции зависят от качества исходных элементов, возникает необходимость взаимной увязки стандартов на сырье, материалы, комплектующие и готовые изделия.

**Принцип перспективности** и установления опережающих требований заключается в установлении повышенных по отношению к достигнутому на практике уровню норм и требований к объектам стандартизации, которые согласно прогнозам будут оптимальными в последующее время. Этот принцип реализуется в рамках работ по одному из основных направлений стандартизации - опережающей стандартизации.

**Принцип унификации** (принцип управления многообразием) - это принцип сведения к единообразию предметов, процессов и устанавливаемых к ним требований. При проведении работ по стандартизации использование этого принципа выражается в том, что обеспечивается максимально возможная степень обобщения требований к продукции (услугам), к процессам ее проектирования, производства и эксплуатации; исключение повторений одинаковых или близких по смыслу требований; ограничение неоправданного многообразия продукции.

**Принцип динамичности** заключается в том, что для повышения эффективности стандартизации необходимо систематически обновлять требования путем периодического пересмотра стандартов и приведения уровня норм в соответствие с достижениями технического прогресса. Данный принцип реализуется введением системы периодической проверки; системы внесения изменений, пересмотра и отмены стандартов.

**Принцип обязательности** заключается в том, что придание нормам стандарта обязательной юридической силы должно осуществляться на основе законодательных актов, гармонизированных с соответствующими законодательными актами, принятыми в большинстве промышленно развитых стран.

**Принцип добровольного применения стандартов** и необходимости исполнения их требований. Добровольное применение стандартов означает право субъекта хозяйственной деятельности либо применять и исполнять тот или иной стандарт или не применять и не исполнять требования этого стандарта, и, таким образом, обязательное выполнение требований стандарта - это выполнение добровольно принятых обязательств.

**Принцип обеспечения функциональной взаимозаменяемости** стандартизуемых изделий заключается в том, что в стандартах должна быть обеспечена взаимозаменяемость изделий по эксплуатационным показателям. Взаимозаменяемость заключается в способности объекта быть использованным без модификации вместо другого объекта в целях выполнения одних и тех же требований. Данный принцип реализуется на основе использования стандартов Единой системы допусков и посадок и общетехнических норм взаимозаменяемости (ЕСДП и ОНВ).

## **3.2 Направления стандартизации**

### **3.2.1 Параметрическая стандартизация**

Научно-технический прогресс сопровождается совершенствованием и созданием новых машин, приборов, оборудования; использованием новых деталей, сборочных единиц, материалов и полуфабрикатов. Непрерывно растет многообразие выпускаемой продукции (в том числе машин, механизмов, приборов, измерительных и режущих инструментов); увеличивается номенклатура изделий промышленного и бытового назначения, средств метрологического и технического обеспечения.

Рост видов и типов выпускаемой продукции является закономерным следствием научно-технического прогресса. При этом могут выпускаться изделия, сходные по функциональному назначению, но незначительно отличающиеся по конструкции и размерам. Возникает вопрос, насколько необходим и оправдан с экономической точки зрения выпуск изделий, близких по конструкции и по функциональному назначению. Каждое изделие характеризуется конструктивными параметрами. Параметры характеризуют свойства, эксплуатационные характеристики и в конечном итоге качество изделия. Поэтому широкое применение получили параметрические ряды представления размеров.

Параметрический ряд – это ряд, построенный по значениям (размерам) того или иного параметра изделия. Наибольшее распространение при построении параметрических рядов получили ряды предпочтительных чисел, построенные по геометрической прогрессии. Различают параметры условий и параметры изделий.

Например, параметры, которые характеризуют свойства среды, влияющие на состояние стандартизуемого изделия (атмосферное давление, термодинамическая температура, относительная влажность, запыленность и задымленность воздуха, содержание серы, кислот, смол и других компонентов в топливе и в смазочных материалах).

К параметрам изделия относятся параметры, характеризующие геометрические размеры, зазоры и натяги, работу, мощность, число оборотов, скорость резания, ресурс и др.

### **3.2.2 Система предпочтительных чисел**

Устанавливаемые параметры конструктивных объектов технических систем (машин, агрегатов, приборов), которые фиксируются в нормативно - технической документации, могут образовывать определенные ряды (параметрические, размерные). Ряды, построенные по определенным математическим закономерностям, могут устанавливаться в стандартах, которые определяются как параметрические стандарты. Такие стандарты устанавливают параметрические или размерные ряды продукции по основным потребительским (эксплуатационным) характеристикам, на базе которых следует проектировать продукцию конкретных типов, моделей, марок, изготавливаемую в промышленности.

Разработка параметрических рядов требует прежде всего установления единой закономерности в системе стандартизуемых величин, к числу которых относятся геометрические характеристики, мощность, производительность, грузоподъемность, скорость, прочность и другие параметры изделий и их составных частей. Ряды предпочтительных чисел должны удовлетворять следующим требованиям:

- представлять рациональную систему градации чисел, удовлетворяющую потребностям производства и эксплуатации;
- быть бесконечными как в сторону малых, так и в сторону больших величин;
- включать все десятикратные значения любого числа и единицу;
- быть простыми и легко запоминающимися.

Выбор размеров машин, узлов, деталей и характеристик материалов по рядам предпочтительных чисел создает условия для широкого развития унификации и стандартизации.

В соответствии с рекомендацией ИСО Госстандарт СССР утвердил ГОСТ 8032- 56 "Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел" со сроком введения с 1 января 1957 года. Вместо ГОСТ 8032-56 был утвержден СТ СЭВ 3961-83 "Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел" путем его введения в ГОСТ 8032-84 с сохранением наименования и со сроком введения 01. 07. 85.

Установление по геометрическому ряду сортамента материалов позволяет выбрать наиболее рациональные характеристики металлургического и прокатного оборудования, металлорежущих станков, технологической оснастки. Арифметическая прогрессия характеризуется тем, что разность между значениями двух соседних членов ряда постоянна во всем диапазоне ряда. Недостаток арифметической прогрессии - разреженность значений в зоне малых величин и сгущенность в зоне больших величин (увеличение количества больших типоразмеров по сравнению с количеством малых значений).

Геометрическая прогрессия представляет собой ряд чисел с постоянной относительной разностью во всем диапазоне ряда. В этом и заключается преимущество ряда, построенного по геометрической прогрессии, перед рядом, построенным по арифметической прогрессии.

Многолетним производственным опытом было установлено, что для удовлетворения нужд производства достаточно положить в основу построения рядов предпочтительных чисел геометрические прогрессии со знаменателями  $Q = \sqrt[R]{10}$ , где  $R = 5, 10, 20, 40, 80, 160$ . Ряды  $R5, R10, R20, R40$  называются основными рядами, а ряды  $R80, R160$  - дополнительными. ГОСТ 8032-84 регламентирует систему предпочтительных чисел в соответствии с этими рядами в диапазоне от 1 до 10 (табл. 12). Числа более 10 получаются умножением на  $10^n$ , менее 1 - умножением на  $10^{-n}$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$

ГОСТ 8032-84 содержит порядковые номера предпочтительных чисел по ряду  $R40$ , что облегчает умножение, деление, возведение в степень, извлечение корня из предпочтительных чисел (если при умножении и делении порядковых номеров получаются целые числа).

Номер предпочтительного числа определяется по формуле

$$N_n = N_{n1} + m \cdot 40, \quad (217)$$

где  $n$  - любое предпочтительное число;

$n_1$  - предпочтительное число в пределах от 1 до 10;

$N_n$  - порядковый номер предпочтительного числа  $n$ ;

$N_{n1}$  - порядковый номер предпочтительного числа  $n_1$ ;

$m$  - целое число, представляющее собой степень 10, получающееся в результате деления числа  $n$  на число  $n_1$ .

Для примера определим порядковый номер предпочтительного числа 47500. Этому числу соответствует число 4,75 в диапазоне от 1 до 10. При делении числа 47500 на 4,75 получаем результат  $10^4$  следовательно,  $m = 4$ , откуда следует

$$N_{47500} = N_{4,75} + 4 * 40 = 27 + 160 = 187. \quad (218)$$

Определим номер предпочтительного числа 0,0212. Этому числу в диапазоне от 1 до 10 соответствует число 2,12. При делении числа 0,0212 на 2,12 получаем  $10^{-2}$ , следовательно,  $m = -2$ , откуда

$$N_{0,0212} = N_{2,12} - 2 * 40 = -67. \quad (219)$$

Ряды предпочтительных чисел обозначаются следующим образом:

- ряды, не ограниченные пределами - R5, R10, R160;
- ряды с ограниченными пределами R10( 1,25...), R20(... ,45), R40(75.. .300);
- ряды с обязательным включением числа - R5 (...40...).

Таблица 16

6. Основные ряды				7. Номер предпочтительного числа	8. Мантиссы логарифмов	9. Расчетные величины чисел	11. Разность между числами основного ряда и расчетными величинами, %
12. R5	13. R10	14. R20	15. R40				
16. 1,00	17. 1,00	18. 1,00	19. 1,00	20. 0	21. 000	22. 1,0000	23. 0
			24. 1,06	25. 1	26. 023	27. 1,0593	28. +0,07
		29. 1,12	30. 1,12	31. 2	32. 050	33. 1,1220	34. -0,18
			35. 1,18	36. 3	37. 075	38. 1,1885	39. -0,71
	40. 1,25	41. 1,25	42. 1,25	43. 4	44. 100	45. 1,2589	46. -0,71
			47. 1,32	48. 5	49. 125	50. 1,3335	51. -1,01
		52. 1,40	53. 1,40	54. 6	55. 150	56. 1,4125	57. -0,88
			58. 1,50	59. 7	60. 175	61. 1,4962	62. +0,25
63. 1,60	64. 1,60	65. 1,60	66. 1,60	67. 8	68. 200	69. 1,5849	70. +0,95
			71. 1,70	72. 9	73. 225	74. 1,6788	75. +1,26
		76. 1,80	77. 1,80	78. 10	79. 250	80. 1,7783	81. + 1,22
			82. 1,90	83. 11	84. 275	85. 1,8836	86. -0,87
	87. 2,00	88. 2,00	89. 2,00	90. 12	91. 300	92. 1,9953	93. -0,24

Продолжение таблицы 16

94. Основные ряды				95. Номер	96. Манти-	97. Расчет-	99. Разность между чис-
100.R5	101. R10	102. 20	103. 40	предпочти- тельного числа	сы логариф- мов	ные вели- чины 98. чисел	лами основного ряда и расчетными величинами, %
			104. .12	2 105. 13	106. 325	107. 2,11 35	108. +0,31
		109. .24	110. .24	2 111. 14	112. 350	113. 2,23 87	114. +0,06
			115. .36	2 116. 15	117. 375	118. 2,37 14	119. -0,48
120.R5	121. R10	122. 20	123. 40				
124.2, 50	125. .50	126. .50	127. .50	2 128. 16	129. 400	130. 2,51 19	131. -0,47
			132. .65	2 133. 17	134. 425	135. 2,66 07	136. -0,40
		137. .80	138. .80	2 139. 18	140. 450	141. 2,81 84	142. -0,65
			143. .00	3 144. 19	145. 475	146. 2,98 54	147. +0,49
	3,15	3,15	3,15	20	500	3,1623	-0,39
			3,35	21	525	3,3497	+0,01
		3,55	3,55	22	550	3,5481	+0,05
			3,75	23	575	3,7584	-0,22
4,00	4,00	4,00	4,00	24	600	3,9811	+0,47
			4,25	25	625	4,2170	+0,78
		4,50	4,50	26	650	4,4668	+0,74
			4,75	27	675	4,7315	+0,39
	5,00	5,00	5,00	28	700	5,0119	-0,24
			5,30	29	725	5,3088	-0,17
		5,60	5,60	30	750	5,6234	-0,42
			6,00	31	775	5,9566	+0,73
6,30	6,30	6,30	6,30	32	800	6,3096	-0,15
			6,70	33	825	6,6834	+0,25
		7,10	7,10	34	850	7,0795	+0,29
			7,50	35	875	7,4989	+0,01
	8,00	8,00	8,00	36	900	7,9433	+0,71
			8,50	37	925	8,4140	+1,02
		9,00	9,00	38	950	9,9125	+0,98
			9,50	39	975	9,4406	+0,63
10,00	10,00	10,00	10,00	40	000	10,000	0

Кроме основных и дополнительных рядов, допускается применение выборочных рядов, получаемых из основного или дополнительного рядов путем отбора каждого 2, 3, 4, ... n-го члена основного или дополнительного ряда. ГОСТ 8032-84 предусматривает использование округленных значений предпочтительных чисел в технически обоснованных случаях. Ряды, составленные из рядов с различными знаменателями, называются составными.

Стандартом допускается применение производных рядов, полученных путем простейшего преобразования основных и дополнительных предпочтительных чисел. ГОСТ 8032-84 допускает применение арифметических предпочтительных рядов чисел. Арифметические предпочтительные ряды чисел применяют для установления параметров, харак-

теризующих, например, размеры обуви, одежды, температуру окружающего воздуха и т. д.

Ряды предпочтительных чисел, установленные ГОСТ 8032-84, просты и легко запоминаемы, безграничны в обоих направлениях, включают все десятичные значения любого члена и единицу. Произведение или частное двух любых членов ряда предпочтительных чисел является также членом этого ряда. Целые положительные или отрицательные степени любого члена ряда предпочтительных чисел также всегда являются членами этого ряда. При умножении или делении членов рядов предпочтительных чисел произведение или частное вычисляются суммированием или вычитанием их номеров с последующим нахождением по новому номеру соответствующего этому номеру предпочтительного числа.

Для выбора номинальных линейных размеров (длин, диаметров, уступов, глубин, расстояний между осями и т. д.) деталей, их элементов и соединений на основе рядов предпочтительных чисел разработан ГОСТ 6636-69. Данный стандарт устанавливает ряды линейных размеров в диапазоне от 0,001 до 2000 мм. ГОСТ 6636-69 является ограничительным стандартом по отношению к ГОСТ 8032, который устанавливает предпочтительные числа на всей числовой оси. В диапазоне от 0,001 до 0,009 нормальные линейные размеры построены по арифметической прогрессии с разностью 0,001. В остальном диапазоне вместо некоторых предпочтительных чисел, установленных ГОСТ 8032, приняты их округленные значения. Линейные размеры в соответствии с ГОСТ 6636-69 делятся на линейные размеры основного применения и дополнительные линейные размеры. Линейные размеры основного применения построены на базе рядов R5; R10; R20; R40 и обозначены соответственно Ra5; Ra10; Ra20; Ra40, где буква "a" означает, что ряд содержит округленные значения.

Дополнительные линейные размеры построены на основе ряда, начиная с числа 1,25. Их применение допускается в технически и экономически обоснованных случаях, когда применение основных рядов не позволяет обеспечить технические требования к изделиям. Допускается применение выборочных рядов, полученных путем отбора каждого n-го члена из основных рядов. Стандартные ряды линейных размеров не распространяются на технологические межоперационные размеры; на размеры, зависящие от других принятых величин, и на размеры, установленные в стандартах на конкретные изделия. В других случаях применять линейные размеры, не приведенные в ГОСТ 6636-69, не рекомендуется.

На основе рядов, установленных ГОСТ 6636-69, могут разрабатываться ограничительные стандарты отраслей и стандарты предприятий. Введение данного стандарта облегчает выбор линейных размеров, сокращает их номенклатуру и имеет большое экономическое значение.

В радиоэлектронике Международной электротехнической комиссией (МЭК) принята публикация 63 "Ряды предпочтительных величин для резисторов и конденсаторов", предусматривающая систему предпочтительных чисел в виде рядов: E3, E6, E12, E24, E48, E96, E192.

Таблица 17

148. Условное обозначение ряда	149. Знаменатель прогрессии	151. Количество членов в десятичном интервале
153. E3	154. $\sqrt[3]{10} = 2,2$	155. 3

Продолжение таблицы 17

156. Условное обозначение ряда	157. Знаменатель 158. прогрессии	159. Количество членов 160. в десятичном интервале
161. E6	162. $\sqrt[6]{10} = 1,5$	163. 6
164. E12	165. $\sqrt[12]{10} = 1,2$	166. 12
167. E24	168. $\sqrt[24]{10} = 1,1$	169. 24
170. E48	171. $\sqrt[48]{10} = 1,05$	172. 48
173. E96	174. $\sqrt[96]{10} = 1,02$	175. 96
176. E192	177. $\sqrt[192]{10} = 1,01$	178. 192

Ряды E3, E6, E12, E24 приведены в табл. 18.

Таблица 18

179. E3	180. E6	181. E12	182. E24
183. 1,0	184. 1,0	185. 1,0	186. 1,0 187. 1,1
		188. 1,2	189. 1,2 190. 1,3
	191. 1,5	192. 1,5	193. 1,5 194. 1,6
		195. 1,8	196. 1,8 197. 2,0
198. 2,2	199. 2,2	200. 2,2	201. 2,2 202. 2,4
		203. 2,7	204. 2,7 205. 3,0
	206. 3,3	207. 3,3	208. 3,3 209. 3,6
		210. 3,9	211. 3,9 212. 4,3
213. E3	214. E6	215. E12	216. E24
217. 4,7	218. 4,7	219. 4,7	220. 4,7 221. 5,1
		222. 5,6	223. 5,6 224. 6,2
	225. 6,8	226. 6,8	227. 6,8 228. 7,5
		229. 8,2	230. 8,2 231. 9,1
232. 10,0	233. 10,0	234. 10,0	235. 10,0

Ряды «E»: ГОСТ 2825-67 «Резисторы постоянные. Ряды номинальных сопротивлений»; ГОСТ 2519-67 «Конденсаторы электрические постоянные. Ряды номинальных емкостей».

В этих стандартах номинальные значения установлены по рядам E24, E12, E6. Основное назначение системы предпочтительных чисел заключается в том, что использование предпочтительных чисел позволяет научно обоснованно сокращать множество типоразмеров и количество наименований различных видов продукции, машин, приборов и оборудования.

### **3.2.3 Комплексная стандартизация**

Показатели качества и надежности любого изделия зависят от большого числа различных факторов: качества материалов, заготовок, полуфабрикатов, покупных изделий; тщательности выполнения технологических операций; объективности и точности контроля; упаковки; транспортировки; условий хранения и эксплуатации. Стандартизация всех указанных факторов на единой методической основе, на основе использования системного подхода к решению проблемы позволяет успешно решать задачи, связанные с повышением качества изделий.

Работы по комплексной стандартизации осуществляются в соответствии с принципом комплексности, начинаются с проведения исследований объекта стандартизации и всех его элементов и завершаются разработкой и реализацией программы комплексной стандартизации данного объекта.

В соответствии с определением, данным Постоянной комиссией по СЭВ по стандартизации, комплексной является стандартизация, при которой осуществляются целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимосвязанных требований, как к самому объекту комплексной стандартизации, так и к его основным элементам в целях обеспечения оптимального решения конкретной проблемы.

Основным преимуществом комплексной стандартизации является то, что требования при стандартизации каждого объекта подчинены общей задаче обеспечения технико-экономической эффективности всей группы (системы) в целом.

Комплексная стандартизация может осуществляться на международном (ИСО, МЭК), региональном, национальном, отраслевом уровнях.

Принцип системности в применении к комплексной стандартизации заключается в том, что при проведении комплексной стандартизации учитываются функциональные, конструктивные, технологические и эксплуатационные связи элементов объектов. Развитие комплексной стандартизации привело к созданию крупных межотраслевых систем стандартов, направленных на решение общегосударственных проблем.

Некоторые стандарты в ряде случаев могут не отражать динамику повышения качества изделий во времени и иногда теряют свою актуальность еще в процессе разработки. Проблема решается путем опережающей стандартизации, предусматривающей обоснование и разработку стандартов с опережающими требованиями.

### **3.2.4 Опережающая стандартизация**

Опережающая стандартизация - это стандартизация, заключающаяся в установлении повышенных по отношению к достигнутому уровню норм и требований к объекту стандартизации, которые согласно научно обоснованным прогнозам будут оптимальными и реализуемыми. Научно-технический прогноз развития является основой для создания опережающего стандарта. Под прогнозированием показателей качества изделий понимается научно обоснованное предсказание количественных значений этих показателей, которые могут быть достигнуты к определенному моменту времени.

Основные положения по применению методов обеспечения опережающей стандар-

тизации были установлены ГОСТ 18.301 - 76 «Методы опережающей стандартизации. Основные положения». Данным стандартом опережающая стандартизация определялась как важнейшее средство управления параметрами объектов стандартизации. При проведении работ по опережающей стандартизации устанавливаются оптимальные по выбранному критерию требования на срок действия стандартов. Объектами опережающей стандартизации могут быть параметры, нормы, правила и требования к продукции и процессам.

### 3.3 Основные методы стандартизации

Инструментами, реально влияющими на качество, конкурентоспособность, представление продукции на рынках сбыта являются методы стандартизации. Метод унификации - это рациональное сокращение видов, типов и размеров изделий одинакового функционального назначения. В более широком смысле унификация - это научно-технический метод определения и регламентации оптимальной и сокращенной номенклатуры объектов одинакового функционального назначения. Унифицированным является изделие (узел, деталь, конструктивный элемент, технологический процесс и т. п.), которое создано на базе некоторого количества ранее существовавших различных исполнений путем приведения их к единому исполнению, заменяющему любое из них.

Степень унификации оценивается степенью насыщенности нового или проектируемого изделия элементами освоенных изделий. Унификация дает возможность сократить сроки проектирования и изготовления изделий, повысить производительность труда, обеспечить эффективность выпуска новых видов продукции, повысить их качество, надежность и долговечность. Унификация позволяет снизить стоимость производства новых изделий, повысить уровень автоматизации производственных процессов.

Унификация предусматривает установление оптимального количества типоразмеров на основании ГОСТ 8032-84 и разрабатывается стандарт на унифицированный ряд деталей. Завершающим этапом работы по унификации является организация специализированного производства стандартных деталей.

Уровень унификации изделий или их составных частей в соответствии с РД-50-13-80 "МУ. Определение уровня стандартизации и унификации изделий" осуществляется с помощью системы следующих показателей:

1. Коэффициента применяемости - выраженного в процентах отношения количества заимствованных, покупных и стандартизованных типоразмеров к общему количеству типоразмеров изделия. Коэффициент применяемости  $K_{np}$  по типоразмерам вычисляют по формуле

$$K_{np} = \frac{n - n_0}{n} 100\% , \quad (220)$$

где  $n$  - общее количество типоразмеров изделия;  $n_0$  - количество оригинальных типоразмеров. К оригинальным типоразмерам относятся типоразмеры, разработанные для данного изделия.

2. Коэффициента повторяемости составных частей изделия  $K_n$  - отношения общего количества составных частей изделия к общему количеству типоразмеров составных частей изделия. Таким образом, коэффициент повторяемости - это среднее количество составных частей, приходящееся на один типоразмер. Коэффициент повторяемости определяют по формуле

$$K_n = \frac{N}{n} , \quad (221)$$

где  $N$  - общее количество составных частей изделия. Уровень унификации характеризуют также коэффициентом повторяемости составных частей в процентах  $K_{\Pi}$ , который определяет степень насыщенности изделий повторяющимися составными частями и находится по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{N-n}{N} 100\% . \quad (222)$$

Коэффициент повторяемости, таким образом, характеризует насыщенность изделия повторяющимися составными частями.

3. Коэффициента межпроектной унификации  $K_{\text{м.у}}$  - отношения количества сокращенных за счет взаимной унификации типоразмеров составных частей данной группы изделий к максимальному сокращению количества типоразмеров составных частей этой группы в процентах

$$K_{\text{м.у}} = \frac{\sum_{i=1}^H n_i - Q}{\sum_{i=1}^H n_i - n_{\text{max}}} 100\% , \quad (223)$$

где  $H$  - общее количество рассматриваемых изделий (проектов);

$n_i$  - количество типоразмеров составных частей в  $i$ -м проекте (изделии);

$Q = \sum_{j=1}^m q_j$  - общее количество типоразмеров составных частей в наименованиях, применяемых в группе из  $H$  изделий;

применяемых в группе из  $H$  изделий;

$q_j$  - количество типоразмеров составной части  $j$  - го наименования;

$m$  - общее количество наименований составных частей рассматриваемых проектов (изделий);

$n_{\text{max}}$  - максимальное количество типоразмеров составных частей одного из изделий (проектов), входящих в эту группу;

$\sum_{i=1}^H n_i$  - общее количество типоразмеров составных частей в изделиях;

$\sum_{i=1}^H n_i - n_{\text{max}}$  - максимальное сокращение типоразмеров, которое получилось бы при полной взаимной унификации, т.е. при  $n_{\text{max}} = Q$ .

При расчете этих коэффициентов крепежные детали, детали трубопроводов, шпонки, прокладки, ленточки и другие подобные детали учитываются отдельно.

Для обеспечения высокой степени унификации изделий необходимо создание определенных условий и проведение ряда мероприятий. К их числу относятся: наличие показателей, по которым оценивается уровень унификации; обязательность этих показателей; планирование уровня унификации; отчетность по достигнутым показателям; экспертиза проектов на уровень унификации; методика определения экономической эффективности унификации; материальное стимулирование за выполнение определенных показателей унификации.

### Пример 13

Определить коэффициент межпроектной унификации  $K_{м.у.}$  совокупности типоразмеров составных частей конечного изделия, указанных в табл. 19.

Таблица 19

Наименование составных частей	Номер изделия					Количество типоразмеров	
						Общее	Наименований
1.Тормозная система	+	+	+	*	*	5	3
2. Насос	*	*	+	*	*	5	1
3. ....	*	*	+	*	*	5	1
4. ....	*	-	+	+	-	3	2
5. ....	+	*	+	+	+	5	4
6. ....	-	+	+	+	*	4	3
7. ....	*	-	+	+	+	4	3
8. ....	*	*	+	*	*	5	1
Итого	7	6	8	8	7	36	18

Решение.

$$K_{м.у.} = \frac{\sum_{i=1}^H n_i - Q}{\sum_{i=1} n_i - n_{\max}} 100(\%) = \frac{36 - 18}{36 - 8} 100 = 64\% . \quad (224)$$

**Метод агрегатов.** Применение метода агрегатов связано с тем, что конструкции большинства изделий (машин, приборов и оборудования) могут быть расчленены на ряд автономных агрегатов (узлов). Автономные функциональные узлы могут быть выделены на основе структурного анализа их составных частей с таким расчетом, чтобы использовать их можно было в других изделиях. После расчленения изделий, полученные агрегаты унифицируют, стандартизируют и составляют для них конструктивно унифицированные ряды. Агрегаты изготавливаются независимо друг от друга, обладают взаимозаменяемостью по всем эксплуатационным показателям и присоединительным размерам. Они должны иметь оптимальную конструкцию, оптимальные показатели качества, состоять по возможности из наименьшего числа деталей, просто и надежно собираться за счет резьбовых, шлицевых и других соединений. Изделия, собранные из агрегатов, должны иметь оптимальные показатели качества, соответствующие их назначению. Таким образом, метод агрегатов - это метод компоновки машин, приборов и оборудования из взаимозаменяемых, унифицированных узлов или агрегатов, каждый из которых представляет законченное изделие, выполняет определенную функцию и может быть использован при создании различных изделий.

Агрегатное оборудование обладает конструктивной обратимостью, что дает возможность многократного применения стандартных агрегатов и узлов в новых компонов-

ках при изменении конструкций объекта производства и при необходимости быстрой переналадки производства на выпуск новых видов продукции.

Внедрение агрегатов позволяет перейти от конструирования и производства необоснованно дорогого оригинального оборудования, машин и приборов к их созданию на основе стандартных унифицированных агрегатов. Примером агрегатного оборудования в машиностроении является агрегатный станок, в котором на круглой станине устанавливаются несколько силовых головок, позволяющих присоединять различные насадки и выполнять сверлильно-расточные, фрезерные и другие операции.

**Типизация** – это метод стандартизации, заключающийся в установлении типовых объектов для данной совокупности и принимаемых за основу 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. Типизация как эффективный метод стандартизации развивается в трех основных направлениях: стандартизация типовых технологических процессов; стандартизация типовых изделий общего назначения; создание руководящих технических материалов, устанавливающих рекомендуемый порядок проведения каких-либо работ, расчетов, испытаний.

Эффективность типизации обусловлена ускорением и снижением стоимости подготовки производства изделий, облегчением условий эксплуатации типовых изделий и их модификаций. Внедрение типовых объектов и технологических процессов исключает неоправданно большое разнообразие существующих вариантов технологических процессов при изготовлении аналогичных деталей, что приводит к снижению себестоимости их изготовления. При смене конструкций изделий появляется возможность создания технологических процессов не для одного конкретного изделия, а для большинства деталей и узлов данного вида, т. е. на основе типизации.

Разработка типовых технологических процессов осуществляется на базе "Технологического классификатора деталей машиностроения и приборостроения", в соответствии с которым детали группируют по признакам, определяющим общность технологического процесса их изготовления. 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 базу для внедрения АСУП.

Технологический код деталей, сформулированный в соответствии с "Технологическим классификатором", служит для подбора деталей по технологическому подобию в группы, оптимальные по числу подобных деталей. Технологическое подобие деталей определяется совокупностью конструктивных признаков, главным из которых является геометрическая форма, а также технологическими характеристиками детали.

Направлением типизации является также стандартизация типовых изделий общего назначения. На этом направлении типизация как метод упорядочения широко используется при разработке изделий всех видов: деталей, сборочных единиц, комплексов и комплектов. Типизация конструктивных исполнений деталей позволяет существенно упростить процессы их конструирования и изготовления.

На основе классификаторов деталей конструкторско-технологического назначения формируются группы однотипных деталей, осуществляется систематизация и таким образом облегчается конструирование и создаются предпосылки для разработки типовых и групповых технологических процессов их изготовления. В ГАП и в станках с ЧПУ возникает необходимость применения станочных приспособлений, различные исполнения которых образуются путем переналадки и перекомпоновки в унифицированные и стандарт-

ные исполнения.

### 3.4 Стандартизация в Российской Федерации

**Технические регламенты и их правовой статус.** После введения Федерального закона «О техническом регулировании» технический регламент в РФ является документом особого рода. В соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании» главная особенность технического регламента заключается в том, что он является исчерпывающим перечнем требований, которое государство предъявляет к определенному виду деятельности. Другие обязательные требования могут вноситься не другими документами, а только изменениями и дополнениями, вносимыми в данный регламент.

Эта особенность позволяет осуществлять системное регулирование определенных направлений деятельности в области технического регулирования с помощью технических регламентов. Основным базовым элементом нормирования становится не отдельный документ, а регламент на вид деятельности, который представляет исчерпывающий свод норм и правил.

Обязательными требованиями технического регламента к объектам технического регулирования являются:

- безопасность жизни или здоровья граждан;
- безопасность имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;
- охрану окружающей среды;
- охрану жизни или здоровья животных и растений;
- предупреждения действий, вводящих в заблуждение потребителей.

**Межотраслевые системы и комплексы стандартов.** В Российской Федерации действуют следующие основные межотраслевые системы и комплексы стандартов:

- Стандартизация в Российской Федерации (ГОСТ Р 1);
- Единая система конструкторской документации (ГОСТ 2 ЕСКД);
- Единая система технологической документации (ГОСТ 3 ЕСТД);
- Система показателей качества продукции (ГОСТ 4 СПКП);
- Унифицированные системы документации и Единая система классификации и кодирования технико-экономической информации (ГОСТ 6 УСД и ЕСКК ТЭИ);
- Система информационно-библиографической документации (ГОСТ 7 СИБИБД);
- Государственная система обеспечения единства измерений (ГОСТ 8 ГСИ);
- Единая система защиты от коррозии и старения (ГОСТ 9 ЕСЗКС);
- Система стандартов безопасности труда (ГОСТ 12 ССБТ);
- Репрография (ГОСТ 13);
- Единая система технологической подготовки производства (ГОСТ 14 ЕСТПП);
- Система разработки и постановки продукции на производство (ГОСТ 15 СРПП);
- Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов (ГОСТ 17 ССОП);
- Единая система программных документов (ГОСТ 19 ЕСПД);
- Система проектной документации по строительству (ГОСТ Р 21 СПДС);
- Система стандартов безопасности в чрезвычайных ситуациях (ГОСТ Р 22 БЧХ);
- Система стандартов "Надежность в технике" (ГОСТ 27 ССНТ);
- Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения (ССЭ-ТО ГОСТ 29);
- Информационная технология (ГОСТ Р 34);
- Система сертификации (ГОСТ Р 40);
- Система аккредитации в РФ (ГОСТ Р 51);

- Единая система допусков и посадок и общетехнические нормы взаимозаменяемости (ЕСДП и ОНВ) и другие.

С 1992 г. в соответствии с "Соглашением о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации", подписанным правительствами присоединившихся государств, стандарты, входящие в состав межотраслевых систем и комплексов, имеют статус межгосударственных стандартов.

С введением в действие федерального закона "О техническом регулировании" утратили силу законы "О стандартизации" и "О сертификации продукции и услуг". Государственная система по стандартизации РФ получила наименование «Стандартизация в Российской Федерации». В эту систему входят следующие документы:

- ГОСТ Р 1.0-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения."

- ГОСТ Р 1.2-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления и отмены".

- ГОСТ Р 1.4-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения".

- ГОСТ Р 1.5-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения".

- ГОСТ Р 1.6-2005 "Стандартизация в Российской Федерации. Проекты стандартов. Организация проведения экспертизы".

- ГОСТ Р 1.8-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты межгосударственные. Правила проведения в Российской Федерации работ по разработке, применению, обновлению и прекращению применения".

- ГОСТ Р 1.9-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Знак соответствия национальным стандартам Российской Федерации. Изображение. Порядок применения".

- ГОСТ Р 1.10-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Правила стандартизации и рекомендации по стандартизации. Порядок разработки, утверждения, изменения, пересмотра и отмены".

- ГОСТ Р 1.12-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Термины и определения".

- ГОСТ Р 1.13-2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Уведомления о проектах документов в области стандартизации. Общие требования".

Применение национальных стандартов является добровольным. Обязательные требования национальных стандартов, принятых до 1 июля 2003 года, сохраняются в отношении:

- защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;

- охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных или растений;

- предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей, и необходимости госконтроля (госнадзора) за их соблюдением.

Так как международные и региональные стандарты отражают передовой опыт экономически развитых стран мира, то их применение является предпочтительным, за исключением случаев, когда Российская Федерация в соответствии с процедурами принятия выступает против международного стандарта или его отдельного положения.

ГОСТ Р 1.0-2004 устанавливает, что на территории Российской Федерации действуют документы по стандартизации, указанные в Федеральном законе «О техническом регулировании», выделяя дополнительно военные национальные стандарты. В соответствии с ГОСТ Р 1.0-2004 национальные стандарты применяют добровольно но после принятия

стандарта к исполнению, все его требования становятся обязательными. Применение национального стандарта на продукцию, работы и услуги подтверждается знаком соответствия, который установлен ГОСТ Р 1.9-2004.

Международные, региональные и национальные стандарты других стран применяются на основе международных соглашений о сотрудничестве или с разрешения соответствующих региональных организаций и национальных органов по стандартизации. Обозначения и оформление национальных стандартов, подготовленных на основе международных, региональных или национальных стандартов других стран осуществляются в соответствии с ГОСТ Р 1.5-2004.

Межгосударственные стандарты, к которым присоединилась Российская Федерация, вводятся в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии и применяются без переоформления. Информация о введении их в действие публикуется в «Информационном указателе национальных стандартов Российской Федерации».

Изготовление и поставка на экспорт продукции, разработанной по международным, региональным и национальным стандартам других стран и стандартам зарубежных фирм могут быть осуществлены на договорной основе по предложению заказчика этих стран.

Государственным информационным ресурсом в области стандартизации является Федеральный информационный фонд технических регламентов и стандартов. В нем сосредоточены документы национальной системы стандартизации, международные стандарты, правила стандартизации, нормы стандартизации и рекомендации по стандартизации, национальные стандарты других стран, информация о междугородных договорах в области стандартизации.

В ГОСТ Р 1.0-2004 даны основные положения, касающиеся международного сотрудничества в области стандартизации. Деятельность в области международной стандартизации прежде всего направлена на гармонизацию системы стандартизации в Российской Федерации с международными, региональными и национальными системами стандартизации других стран.

**Категории нормативных документов по стандартизации.** В настоящее время Федеральным законом «О техническом регулировании» и системой стандартизации в РФ на территории России введены следующие документы в области стандартизации:

- национальные стандарты;
- национальные военные стандарты;
- межгосударственные стандарты, введенные в действие в Российской Федерации;
- правила стандартизации, нормы и рекомендации в области стандартизации;
- общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации, применяемые в установленном порядке;
- стандарты организаций;
- своды правил.

Национальные стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р) распространяются на субъекты хозяйственной деятельности, независимо от форм собственности и подчиненности, а также на граждан, занимающихся индивидуальной трудовой деятельностью. Объектами национальных стандартов являются:

- организационно-методические и общетехнические объекты, единый технический язык, размерные ряды и типовые конструкции изделий общего применения, информационные технологии, организация работ по метрологическому обеспечению, достоверные данные о свойствах веществ и материалов, классификация и кодирование ТЭИ.

Порядок разработки национальных стандартов устанавливает ГОСТ Р 1.2-2004, а порядок построения и изложения стандартов регламентирует ГОСТ Р 1.5-2004. Национальные стандарты утверждает Федеральное агентство по техническому регулированию и

метрологии. Государственная регистрация национальных стандартов Российской Федерации (ГОСТ Р) началась с июля 1992 г. (начиная с номера 5001). После регистрации национальные стандарты вводятся в действие. Обозначение национального стандарта состоит из индекса ГОСТ Р, регистрационного номера и отделенных тире двух (четырех) последних цифр, означающих год утверждения стандарта. Если стандарт входит в комплекс стандартов, то в его регистрационном номере первые цифры, отделенные точкой, определяют номер комплекса стандартов.

Рекомендации (Р) - документ в области стандартизации, метрологии, сертификации, аккредитации, содержащий добровольные для применения организационно-технические положения. Рекомендации разрабатывают для предварительной проверки на практике не устоявшихся, не ставших еще типовыми организационно-технических или общетехнических положений, порядков (правил процедуры), методов (способов, приемов) выполнения определенных видов работ и правил оформления результатов этих работ. Построение, изложение, оформление и содержание правил и рекомендаций осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 1.5-2002.

Правила (ПР) межотраслевого применения принимают и вводят в действие постановлением Ростехрегулирования и при необходимости регистрируют в Министерстве юстиции России. Проверку соблюдения обязательных требований правил осуществляют в порядке государственного контроля и надзора. Рекомендации принимают и вводят в действие решением Ростехрегулирования. Правила и рекомендации проходят государственную регистрацию во ВНИИКИ. Разработку изменений к правилам и рекомендациям, рассмотрение, принятие, регистрацию и информацию о них, а также отмену осуществляют в порядке, установленном ПР 50.1.039-2002.

Стандарты организаций (СТО) разрабатываются на создаваемые в данной организации продукцию, услуги, процессы. Объекты стандартизации, порядок разработки и применения СТО устанавливает ГОСТ Р 1.4-2004. Стандарты организации разрабатывают и утверждают самостоятельно организации и их объединения, в том числе союзы, ассоциации, концерны, акционерные общества, межотраслевые, региональные и другие объединения. В качестве стандартов организаций допускается применение международных, региональных и национальных стандартов других стран на основе международных соглашений о сотрудничестве или с разрешения соответствующих региональных организаций и национальных органов.

Общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации (ОКСТЭИ) - нормативные документы, распределяющие технико-экономическую и социальную информацию в соответствии с ее классификацией (классами, группами, видами) и являющиеся обязательными для применения при создании государственных информационных систем и информационных ресурсов. Основные положения и порядок проведения работ по порядку разработки и применения классификаторов устанавливают ПР 50.1.024-2005.

**Виды стандартов.** В зависимости от требований, устанавливаемых к объекту стандартизации, ГОСТ Р 1.0-2004 устанавливает следующие виды стандартов: стандарты на продукцию, стандарты на процессы, стандарты на услуги, основополагающие стандарты (организационно-методические и общетехнические), стандарты на термины и определения, стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа).

Стандарты на процессы устанавливают основные требования к методам (способам, приемам, режимам, нормам) выполнения различного рода работ в технологических процессах, связанных с разработкой, изготовлением, хранением, транспортированием, эксплуатацией, ремонтом и утилизацией продукции, и обеспечивают их техническое единство и оптимальность. Стандарты на процессы могут устанавливать требования к технологическим операциям, имеющим самостоятельное значение, а также к совокупности после-

довательно выполняемых технологических операций.

Стандарты на услуги устанавливают требования и методы их контроля для групп однородных услуг или для конкретной услуги в части состава, содержания и формы деятельности по оказанию помощи, принесению пользы потребителю услуги, а также требования к факторам, оказывающим существенное влияние на качество услуги.

Стандарты на термины и определения устанавливают наименования и содержание понятий, используемых в стандартизации и смежных видах деятельности.

Стандарты на методы контроля устанавливают методы (способы, режимы и др.) проведения испытаний, измерений, анализа продукции при ее создании, сертификации и использовании. Методы контроля, устанавливаемые в стандартах на продукцию и в стандартах на методы контроля, должны обеспечивать объективную проверку всех обязательных требований к качеству продукции, установленных в стандартах на данную продукцию.

**Правила разработки и утверждения национальных стандартов Российской Федерации.** Правила разработки и утверждения национальных стандартов, правила проведения работ по их обновлению путем внесения изменений, поправок или пересмотра, а также правила отмены действующих стандартов устанавливает ГОСТ Р 1.2 - 2004.

Разработку национальных стандартов организуют технические комитеты по стандартизации для достижения целей стандартизации в соответствии с принципами стандартизации, которые определены федеральным законом «О техническом регулировании», и в соответствии с программой разработки национальных стандартов, утверждаемой национальным органом по стандартизации Российской Федерации. С целью обеспечения организационно-методического единства при разработке стандартов ГОСТ Р 1.2-2004 устанавливает четыре стадии разработки стандартов. Заказчиками разработки национального стандарта могут быть национальный орган Российской Федерации по стандартизации; федеральный орган исполнительной власти; юридическое или физическое лицо, заинтересованное в его разработке.

Национальный орган Российской Федерации по стандартизации осуществляет официальное опубликование национального стандарта в соответствии с положением, утвержденным Правительством Российской Федерации.

ГОСТ Р 1.2 - 2004 устанавливает необходимость разработки изменений в зависимости от вида стандарта. Изменения к стандартам на методы контроля разрабатывают в том случае, если они не влияют на сопоставимость результатов испытаний (измерений, анализа, определений), полученных при использовании соответствующих методов.

Другим видом обновления является пересмотр национального стандарта. В соответствии с ГОСТ Р 1.2 -2004 пересмотр стандарта производится в том случае, если значительно изменяется его содержание, структура или наименование или если в нем устанавливаются новые, более прогрессивные требования, которые могут привести к нарушению взаимозаменяемости и совместимости с продукцией, изготовленной до введения новых требований или оказать влияние на сопоставимость результатов испытаний.

Заинтересованные федеральные органы и иные органы исполнительной власти, юридические и физические лица могут направить мотивированные предложения об отмене действующего национального стандарта в секретариат ТК, за которым закреплен данный объект стандартизации, а при его отсутствии - непосредственно в национальный орган Российской Федерации по стандартизации.

Правила построения, изложения, оформления и обозначения национальных стандартов. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению стандартов и изменений к ним устанавливает ГОСТ Р 1.5-2004.

#### **Органы службы стандартизации**

В соответствии с указом Президента Российской Федерации от 9-го марта 2004 г. № 314 «О системе и структуре федеральных органов исполнительной власти» федеральным

органом исполнительной власти, осуществляющим функции федерального органа по техническому регулированию и национального органа по стандартизации, является Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации. Оно осуществляет координацию и контроль деятельности находящегося в его ведении Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

Согласно постановлению Правительства РФ от 6-го апреля 2004 г. № 179 "Вопросы Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации" Министерство промышленности и энергетики РФ на основании и во исполнение Конституции Российской Федерации, федеральных конституционных законов, актов Президента Российской Федерации и Правительства РФ осуществляет правовое регулирование, а также разрабатывает и представляет в Правительство РФ проекты федеральных конституционных законов, федеральных законов и актов Президента РФ и Правительства РФ по ряду основных вопросов, и в том числе по вопросам государственной политики в области технического регулирования и метрологии, разработки технических регламентов, развития систем аккредитации и добровольной сертификации, обеспечения единства измерений.

Таким образом, в систему органов и служб стандартизации в Российской Федерации входят:

- Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации и находящееся в его ведении Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии;
- государственные органы и службы, находящиеся в ведении Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии;
- подразделения (отделы) стандартизации, группы специалистов по стандартизации в центральных аппаратах государственных органов управления (в федеральных министерствах и ведомствах Российской Федерации);
- технические комитеты (ТК) по стандартизации;
- подразделения стандартизации (отделы, бюро, группы) субъектов хозяйственной деятельности.

Структура основных органов и служб стандартизации приведена на рис.61

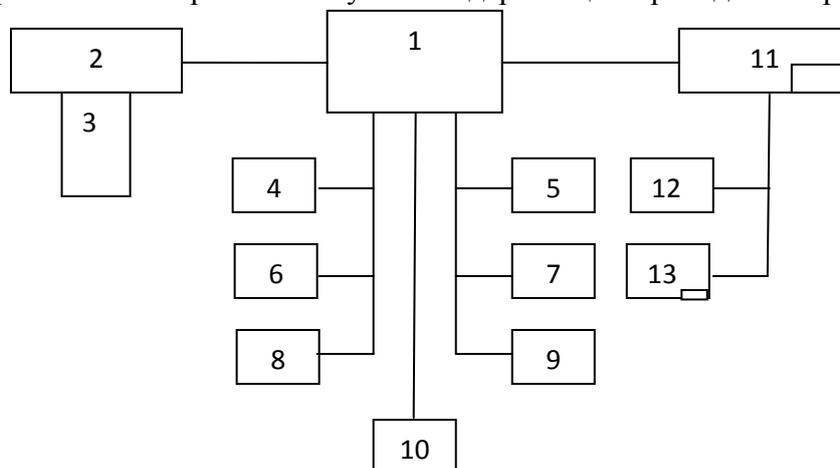


Рис. 61. Структура основных органов и служб стандартизации

- 1 - Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации и находящееся в его ведении Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии;
- 2 - технические комитеты (ТК) по стандартизации;
- 3 - участники разработки стандартов;
- 4 - научно-исследовательские институты, находящиеся в ведении Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии;
- 5 - государственные научные метрологические центры (ГМНЦ);

- 6 - научно-исследовательские центры, находящиеся в ведении Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии;
- 7 - территориальные органы государственной метрологической службы субъектов РФ;
- 8 - Федеральный фонд технических регламентов и стандартов;
- 9 - Академия стандартизации, метрологии и сертификации;
- 10 - Издательство стандартов;
- 11 - государственные органы управления, подчиненные Правительству РФ (федеральные министерства и ведомства РФ);
- 12 - головные организации по стандартизации;
- 13 - субъекты хозяйственной деятельности с отделами стандартизации.

Постановлением Правительства РФ от 17-го июня 2004 г. № 294 «О Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии» утверждено «Положение о Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии». В соответствии с этим положением Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии является федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в сфере технического регулирования. Оно находится в ведении Министерства промышленности и энергетики. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии осуществляет свою деятельность непосредственно через свои территориальные органы и через подведомственные организации во взаимодействии с другими федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления, общественными объединениями и иными организациями.

Свою деятельность Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии осуществляет как непосредственно, так и через подведомственные ему территориальные органы, федеральные государственные учреждения и федеральные предприятия, составляющие единую систему органов и служб стандартизации и метрологии.

Научно-исследовательские институты, находящиеся в ведении Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, являются головными организациями в области стандартизации, метрологии и сертификации в стране. Основными из них являются Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации (ВНИИ стандарт), Всероссийский научно-исследовательский институт нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ), Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации (ВНИИС), Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС), Всероссийский научно-исследовательский институт классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству (ВНИИКИ).

ВНИИстандарт является головной научно-исследовательской организацией в Российской Федерации по формированию и совершенствованию национальной системы стандартизации и системы межгосударственной стандартизации, по разработке нормативно-правовых основ национальной стандартизации, по совершенствованию и развитию общетехнических систем и комплексов стандартов.

ВНИИНМАШ является головной организацией по проблемам государственной, межгосударственной и международной стандартизации в закрепленных отраслях машиностроения и приборостроения в области разработки научных основ межотраслевой унификации и агрегатирования, осуществляет разработку и научно-методическое руководство внедрением межотраслевых систем стандартов в машиностроении. ВНИИМС является главным центром государственной метрологической службы, осуществляет научно-методическое руководство метрологической службой, координирует работу в области метрологического контроля и надзора и создания эталонной базы страны; разрабатывает научно-методические, технико-экономические, организационные и правовые основы мет-

рологического обеспечения.

ВНИИКИ осуществляет координацию работ по сбору и обработке информации в области стандартизации, метрологии и управления качеством, является головным институтом в области разработки и дальнейшего развития «Единой системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации и унифицированных систем документации Российской Федерации», координирует работы по созданию стандартов на все виды носителей информации.

### **Стандартизация технической документации**

Единая система конструкторской документации (ЕСКД.) ЕСКД - это комплекс стандартов, устанавливающих взаимосвязанные нормы и правила по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой на всех стадиях жизненного цикла изделия (при проектировании, изготовлении, эксплуатации, ремонте и др.); единые правила выполнения конструкторской документации. Основной комплекс стандартов ЕСКД внедрен с 1-го января 1971 года и в настоящее время содержит стандарты, устанавливающие единые стадии разработки конструкторской документации, способы выполнения чертежей, правила учета, хранения и обращения конструкторской документации, порядок разработки эксплуатационных и ремонтных документов.

Стандарты ЕСКД распространяются на все виды изделий и конструкторских документов машиностроения и приборостроения, разрабатываемых предприятиями и предпринимателями (субъектами хозяйственной деятельности) стран-участниц «Соглашения о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации», в том числе научно - техническими, инженерными обществами и другими общественными объединениями.

Правила и нормы ЕСКД, связанные с разработкой, оформлением и обращением документации распространяются:

- на все виды конструкторских документов;
- учетно-регистрационную документацию для конструкторских документов;
- документацию по внесению изменений в конструкторские документы;
- нормативно-техническую, технологическую, программную документацию, а также научно-техническую и учебную литературу в той части, в которой они могут быть для них применимы и не регламентируются другими стандартами и нормативами.

Технические условия в настоящее время имеют статус технического документа. Разрабатывает ТУ конструктор-разработчик в числе документов, необходимых для изготовления изделия в соответствии с ГОСТ 2.102-68 (изменения 2006, 2007 г.).

Таким образом, в технических условиях устанавливают требования к конкретной продукции (услуге, процессу). Требования технических условий не должны противоречить обязательным требованиям стандартов Российской Федерации (технических регламентов), распространяющихся на данную продукцию, но могут дополнять и ужесточать установленные в них требования.

Технические условия применяют на территории Российской Федерации предприятия, независимо от форм собственности и подчинения, и граждане, занимающиеся индивидуальной трудовой деятельностью в соответствии с договорными обязательствами и (или) лицензиями на право производства и реализации продукции или оказания услуг. Правила построения, изложения и оформления технических условий определяет ГОСТ 2.114-95.

Единая система технологической документации представляет комплекс государственных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения о порядке разработки, оформления, комплектации и обращения технологической документации, разрабатываемой и применяемой в производстве машиностроительными и приборостроительными организациями и предприятиями (за исключением полупроводникового произ-

водства и ему подобных).

Основными технологическими документами являются маршрутная карта и карта технологического процесса. Маршрутная карта - это технологический документ, содержащий описание технологического процесса изготовления или ремонта изделия (включая контроль или перемещение) по всем операциям различных видов в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, оснастке, материальных и трудовых нормативах.

Карта технологического процесса (КТП) - это технологический документ, содержащий описание техпроцессов изготовления или ремонта изделия по всем операциям одного вида работ, выполняемых в одном цехе в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, оснастке, материальных и трудовых нормативах.

Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). В целях упорядочения разработки и постановки новых изделий на производство и повышения ответственности разработчиков, изготовителей и потребителей разработана «Система разработки и постановки продукции на производство» (СРПП). СРПП относится к организационно-методическим стандартам и устанавливает порядок и правила выполнения работ при создании продукции; проведения испытаний продукции, опытных образцов (опытных партий) продукции; порядок постановки на производство новой (модернизированной) продукции и снятия продукции с производства.

В соответствии с ГОСТ Р 15.000-94 СРПП «Основные положения», СРПП - это комплекс основополагающих организационно-методических и общетехнических документов, устанавливающих основные положения, правила и требования, обеспечивающие техническое и организационное единство выполняемых работ на всех стадиях жизненного цикла продукции.

### **3.5 Международная стандартизация**

#### **3.5.1 Международные организации по стандартизации**

Деятельность по стандартизации создает существенные преимущества для развития национальных экономик отдельных стран и их внешнеторгового и научно-технического сотрудничества. В настоящее время в мире не существует ни одного государства, которое не использовало бы стандарты в своей национальной практике. Национальные организации по стандартизации созданы в подавляющем большинстве стран.

В первые послевоенные годы в мире действовало около 200 тысяч национальных стандартов, а в настоящее время их количество удвоилось и продолжает расти. Национальная стандартизация не может успешно развиваться, если она обособлена от работ по стандартизации, проводимых в других странах.

Требования, устанавливаемые в национальных стандартах, должны согласовываться с аналогичными требованиями стандартов других стран, и вследствие этого возникает необходимость в проведении работ по стандартизации в международном масштабе. Разработка единых международных стандартов, содержащих унифицированные показатели, соответствующие последним достижениям мировой науки и техники, позволяет упорядочить требования к качеству продукции, поступающей на международный рынок.

Международные стандарты позволяют ликвидировать технические барьеры, возникающие вследствие различия национальных стандартов, и являются средством передачи мирового опыта. Это повышает конкурентоспособность продукции, дает экономическую

эффективность и способствует развитию международных экономических и научно-технических связей.

Под региональной стандартизацией понимают деятельность ряда стран, объединенных тем или иным районом земного шара (регионом) в международные организации по стандартизации. Задачами региональных организаций по стандартизации являются: унификация национальных стандартов с целью развития международного разделения труда, специализации и кооперирования национальных предприятий, облегчение торговли между странами.

Деятельность международных организаций направлена на гармонизацию национальной системы стандартизации с международной, региональной и национальной системами стандартизации. Она обеспечивает содействие развитию международной торговли и сотрудничества между всеми странами мира. Примером такой организации является Международная организация по стандартизации (ИСО).

### **3.5.2 Международная организация по стандартизации (ИСО)**

Успешное развитие экономик стран мира в определенной мере зависит от эффективной работы международных организаций по стандартизации. Международные организации по стандартизации формируют политику по стандартизации и в тоже время находятся в творческом взаимодействии с национальными системами стандартизации. Крупной и авторитетной международной организацией в области стандартизации является Международная организация по стандартизации (ИСО). Она была создана 14 октября 1946 года на совещании представителей 25 стран, в том числе и СССР, состоявшемся в Лондоне. Членами ИСО в настоящее время являются 150 стран мира.

Принят устав и правила процедуры, определяющие все основные моменты деятельности ИСО. Статья 2 устава определяет основные задачи ИСО: «Целью организации 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».

ИСО состоит из Генеральной Ассамблеи, совета ИСО, центрального секретариата, технических комитетов, подкомитетов и рабочих групп. Между сессиями Генеральной Ассамблеи деятельностью ИСО руководит совет, в число членов которого входят: президент, вице-президент, казначей и генеральный секретарь.

Высшим органом ИСО - является Генеральная Ассамблея - полномочное собрание делегатов от всех комитетов-членов, которое собирается, по крайней мере, один раз в три года. Генеральная Ассамблея созывается генеральным секретарем по распоряжению президента ИСО и осуществляет руководство ИСО во время сессии. Резолюции принимаются большинством голосов, причем каждый комитет имеет только один голос.

Совет ИСО управляет организацией в период между сессиями Генеральной Ассамблеи и представляет ежегодный отчет о деятельности ИСО комитетам-членам и на каждую сессию Генеральной Ассамблеи. В совет ИСО входят представители 14 комитетов-членов. Президент ИСО председательствует в совете ИСО, на Генеральной Ассамблее, представляет её предложения и решения совета на рассмотрение. Президент избирается из числа граждан страны, являющейся членом ИСО, на Генеральной Ассамблее путем письменного голосования сроком на три года. В случае необходимости президента замещает вице-президент, избираемый из числа членов совета ИСО. Казначей избирается советом и является ответственным за фонды ИСО, участвует в составлении годового бюджета, в управлении финансами ИСО. Генеральный секретарь назначается советом и является главным адми-

нистративным лицом ИСО. Полномочия генерального секретаря устанавливаются советом. Генеральный секретарь ведет дела генерального секретариата, имеет право присутствовать на всех заседаниях, не участвует в голосовании. Генеральный секретариат направляет работу по соблюдению устава и правил процедуры ИСО, согласовывает всю техническую деятельность ИСО, получает экземпляры всех документов ТК, ежегодные отчеты ТК, информирует совет ИСО о технической деятельности ТК, представляет совету ежегодный отчет о деятельности ИСО.

Технические комитеты (ИСО ТК) разрабатывают, обсуждают и представляют на утверждение совета проекты международных стандартов. ТК создаются на основе предложений стран-участниц для работы в определенной области, объем которой определяется советом.

До 1972 года ИСО разрабатывала международные рекомендации. С 1972 года рекомендации ИСО имеют статус международных стандартов, которые могут быть использованы в неизменном виде либо внедрены через национальные стандарты.

В отличие от международной рекомендации (рекомендации ИСО), принимаемой большинством голосов, стандарт ИСО - это нормативный документ, принимаемый в том случае, если никто из членов организации не возражает против предложения преобразовать рекомендацию ИСО в стандарт ИСО.

### **3.5.3 Международная организация по стандартизации в области электротехники и радиоэлектроники**

В сфере международной стандартизации по электротехнике и радиоэлектронике ведущей организацией является Международная электротехническая комиссия (МЭК), организованная в 1906 году на конференции представителей 13 стран в Лондоне. МЭК - это международная организация, в которой принимают участие национальные организации по стандартизации. В настоящее время в МЭК сотрудничают 62 национальные организации. В 1947 году МЭК присоединилась к ИСО и является ее автономным отделом с собственным руководством, бюджетом, уставом и с собственными правилами работы.

Основная задача МЭК заключается в содействии, координации и унификации национальных стандартов в области электротехники и радиоэлектроники. Всей административной деятельностью МЭК руководит совет МЭК, который собирается не реже одного раза в год и в который входят представители всех национальных организаций. Основную техническую работу в МЭК так же, как и в ИСО, осуществляют технические комитеты (ТК), каждый из которых работает в строго определенной области. Если область работы ТК достаточно велика, то в его рамках создаются подкомитеты (ПК). В ТК и ПК непосредственно для разработки международных стандартов создаются рабочие группы (РГ). Каждая страна может участвовать в работе любого ТК, ПК, РГ. Россия является членом МЭК с 1911 г., и в настоящее время её представители входят в состав всех руководящих органов МЭК.

## **3.6 Межгосударственная стандартизация**

Важным шагом восстановления нарушенных связей и развития торговли в условиях рыночных отношений стало "Соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации", подписанное 13 марта 1992 г. в Москве главами правительств стран СНГ.

Основные цели межгосударственной стандартизации (МГС):

- защита интересов потребителей и каждого государства-участника соглашения в вопросах качества продукции, работ и услуг, обеспечивающих безопасность жизни, здоровья и имущества населения, охрану окружающей среды;
- обеспечение совместимости и взаимозаменяемости продукции и других требований, представляющих межгосударственный интерес;
- содействие экономии всех видов ресурсов и улучшению экономических показателей производства государств-участников соглашения;
- устранение технических барьеров в производстве и торговле, содействие повышению конкурентоспособности продукции государств-участников соглашения на мировых торговых рынках и эффективному участию государств в межгосударственном и международном разделении труда;
- содействию повышению безопасности хозяйственных объектов государств-участников соглашения при возникновении природных и техногенных катастроф, а также других чрезвычайных ситуаций.

Основные положения межгосударственной стандартизации направлены на обеспечение качества взаимопоставляемой продукции, гармонизацию межгосударственных стандартов с международными и региональными стандартами, обеспечение соответствия межгосударственных стандартов современным достижениям науки, техники и передового опыта, а также на обеспечение пригодности межгосударственных стандартов для сертификации продукции и услуг.

На четвертом заседании МГС в 1993 г. в качестве межгосударственных стандартов были приняты стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р). Также разрабатываются и принимаются новые межгосударственные стандарты, которые действуют в рамках СНГ и применение которых способствует развитию связей между странами содружества.

В 1995 г. ИСО признала МГС региональной организацией по стандартизации стран СНГ. МГС на основе обобщения предложений, поступающих от национальных организаций по стандартизации, составляет программы работ по межгосударственной стандартизации. Приняты основополагающие документы, в соответствии с которыми решаются организационные вопросы в области межгосударственной стандартизации. К ним, в частности, относятся:

ГОСТ 1.0-92 «Правила проведения работ по межгосударственной стандартизации. Общие положения».

ГОСТ 1.1-2002 «Межгосударственная система стандартизации. Термины и определения».

ГОСТ 1.2-97 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Порядок разработки, принятия, применения, обновления и замены».

ГОСТ 1.5-2001 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению». В развитие направлений данного стандарта приняты соглашения:

- Соглашение о взаимном признании результатов государственных испытаний и утверждении типа, метрологической аттестации, поверки и калибровки средств измерений, а также результатов аккредитации лабораторий, осуществляющих испытания, поверку или калибровку средств измерений;
- Соглашение о сотрудничестве по обеспечению единства измерений времени и частоты;
- Соглашение о сотрудничестве по созданию и использованию данных о физических константах и свойствах веществ и материалов;

- Соглашение о сотрудничестве по созданию и применению стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов.

Таким образом, реализуется межправительственное соглашение стран СНГ, в соответствии с которым предполагается сохранить единство измерений на основе использования имеющихся эталонов единиц физических величин, стандартных справочных данных, стандартных образцов, состава и свойств веществ и материалов.

### **Заключение**

В процессе изучения дисциплины «Стандартизация и метрология» студенты приоб-

ретают теоретические знания и практические навыки по вопросам овладения современными методами и средствами измерений и контроля, необходимыми для обеспечения качества и конкурентоспособности продукции, машин и оборудования на рынках сбыта. Знания по метрологии как основы единства измерений будут использованы ими в будущем для эффективного применения методов и средств измерений при оптимальной организации метрологической деятельности по правилам стандартизации.

Для измерения перемещений исполнительных органов машин и агрегатов необходимы электромеханические и вибрационные преобразователи перемещений и электромеханические индикаторы контакта, широко используемые в аналоговых и импульсных режимах, обусловленных спецификой технологических процессов и гибких производств.

Одним из основных направлений совершенствования конструкций контактных преобразователей связано с исследованиями их классических моделей, синтезом параметров и защищенность элементов прецизионных передач. Применение теории и практики измерений, на основе использования международных, региональных, национальных стандартов, позволит будущим инженерам внести достойный вклад в дело развития экономики страны.

## **Библиографический список**

Основной

1. Радкевич, Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов/

- Я.М. Радкевич, А.Г.Схиртладзе, Б.И. Лактионов. - М.: Высш. шк., 2004. - 790 с.
2. Федотов, А.И. Теория измерений /А.И. Федотов, С.К. Лисин, Г.С. Морокина. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. – 325 с.
3. Лифиц, И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: учебник для вузов/ И.М. Лифиц. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Юрайт, 2004.- 330 с.
4. Ким, К.К. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника / К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, В.Ю. Барбарович, Б.Я. Литвинов. - М.: Питер, 2006.- 369 с.
5. Алексеев, Г.А. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие / Г.А. Алексеев, В.М. Станякин, И.Ф. Шишкин. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009, - 251 с.

#### Дополнительный

6. Шишкин, И.Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством: учебник для вузов /И.Ф. Шишкин.- М.: Изд-во стандартов, 1990,- 341 с.
7. Федеральный закон от 27.12.2002г. № 184-РФ "О техническом регулировании".  
Федеральный закон "О техническом регулировании"  
<http://www.consultant.ru/popular/techreg/>.
8. Кушнир, Ф.В. Электрорадиоизмерения /Ф.В. Кушнир.- Л.:Энергоатомиздат, 1983,- 319 с.
9. Медякова, Э.И. Методы, средства и автоматизация измерений: учеб. пособие / Э.И. Медякова. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009, - 68 с.
10. Медякова, Э.И. Радиоизмерения: учеб. пособие/ Э.И. Медякова. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008,- 100 с.
11. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. - М.: Изд-во стандартов, 2001, - 25 с.
12. Шишкин, И.Ф. Практикум по метрологии. Основы теории измерений: метод, указ. к лабораторным работам (практическим занятиям) /И.Ф. Шишкин, Г.Ф. Сергушев. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2004, - 29 с.
13. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Метрология, стандартизация, сертификация. Радиоизмерения» /сост. Э.И. Медякова - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2004, - 52 с.
14. Якушев, Л.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения/ М.И.Якушев, Л.И. Воронцов, Н.М. Федотов - 6-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1987,- 352 с.

## ГЛОССАРИЙ

**Аббе принцип** – условие совмещения оси измерительного наконечника с направлением измерения.

**Аттестация прибора** - определение соответствия метрологическим характеристикам прибора, указанным в паспорте.

**Величина** - характерный признак (атрибут) явления, тела или вещества, который выделяется качественно и определяется количественно.

**Государственный первичный эталон единицы величины** - государственный эталон единицы величины, обеспечивающий воспроизведение, хранение и передачу единицы величины с наивысшей в Российской Федерации точностью.

**Государственный эталон единицы величины** - эталон единицы величины, находящийся в федеральной собственности.

**Единица величины** - фиксированное значение величины, которое принято за единицу данной величины и применяется для количественного выражения однородных с ней величин.

**Единство измерений** - состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

**Измерение** — совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины.

**Испытания стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа** - работы по определению метрологических и технических характеристик однотипных стандартных образцов или средств измерений.

**Калибровка средств измерений** - совокупность операций, выполняемых для определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений.

**Методика (метод) измерений** - совокупность конкретных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

**Метрологическая экспертиза** - анализ и оценка правильности установления и соблюдения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе.

**Метрологические требования** - требования к влияющим на результат и показатели точности измерений характеристикам (параметрам) измерений.

**Обязательные метрологические требования** - метрологические требования, установленные нормативными правовыми актами Российской Федерации и обязательные для соблюдения на территории Российской Федерации.

**Передача единицы величины** - приведение единицы величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой эталоном данной единицы величины или стандартным образцом.

**Поверка средств измерений** - совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

**Прослеживаемость** - свойство эталона единицы величины или средства измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном соответствующей единицы величины.

**Прямое измерение** - измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средств измерений.

**Сличение эталонов единиц величин** - совокупность операций, устанавливающих соотношение между единицами величин, воспроизводимых эталонами единиц величин одного уровня точности и в одинаковых условиях.

**Средство измерений** - техническое средство, предназначенное для измерений с нормированными метрологическими характеристиками.

**Стандартный образец** - образец вещества (материала) с установленными по результатам испытаний значениями одной и более величин.

**Тип средств измерений** - совокупность средств измерений, предназначенных для измерений одних и тех же величин, выраженных в одних и тех же единицах величин.

**Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений** - документально оформленное в установленном порядке решение о признании соответствия типа стандартных образцов или типа средств измерений метрологическим и техническим требованиям (характеристикам) на основании результатов испытаний в целях утверждения типа.

**Вибрационное перемещение** – значение амплитуды перемещения инерционной массы в режиме колебаний.

**Вибрационный преобразователь** – средство измерений для преобразования, хранения и передачи измерительной информации.

**Стандартизация** - деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышение конкурентоспособности продукции, работ или услуг.

**Стандарт** - документ, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг.

**Национальный стандарт** - стандарт, принятый национальным органом по стандартизации и доступный широкому кругу потребителей.

**Международный стандарт** - стандарт, принятый международной организацией по стандартизации и доступный широкому кругу потребителей.

**Нормативный документ** - документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.

**Техническое регулирование** - правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции или к связанным с ними процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также в области установления и применения на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг и правовое регулирование отношений в области оценки соответствия.

**Технический регламент** - документ, который принят международным договором Российской Федерации, ратифицированным в порядке, установленном законодательством Российской Федерации, или межправительственным соглашением, заключенным в порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

**Правила (ПР)** - это документ в области стандартизации, метрологии, сертификации, аккредитации и каталогизации, устанавливающий обязательные для применения организационно-технические и общетехнические положения, порядки (правила процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ по определенным направлениям, а также обязательные требования к оформлению их результатов.

**Рекомендации (Р)** - документ в области стандартизации, метрологии, аккредитации, содержащий добровольные для применения организационно-технические положения, порядки (правила процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ по определенным направлениям, а также рекомендуемые правила оформления их результатов.

**Унификация** - рациональное сокращение видов, типов и размеров изделий одинакового функционального назначения.

## Предметный указатель

### А

Аббе принцип  
Аккредитация  
Аккредитованная лаборатория  
Амплитуда колебаний  
Аттестация методик (методов) измерений

### В

Величина  
Вибрационное перемещение

### Г

Государственный метрологический надзор  
Государственный первичный эталон единицы величины  
Государственный эталон единицы величины

### Д

Двустороннее соглашение  
Декларация поставщика о соответствии  
Диапазон измерений  
Диапазон показаний  
Доверительная граница  
Доверительный интервал

### Е

Единица величины  
Единство измерений

### И

Измерение  
Инспекционный контроль  
Испытание  
Испытания на соответствие  
Испытания стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа  
Испытания типа  
Испытательная лаборатория

### К

Калибровка средств измерений  
Класс точности  
Контроль  
Контролирующий орган  
Косвенное измерение

### М

Международный стандарт  
Методика (метод) измерений  
Метод испытаний  
Метрологическая служба  
Метрологическая характеристика  
Метрологическая экспертиза  
Метрологические требования  
Многократное измерение

### Н

Национальный режим равного благоприятствования  
Национальный стандарт

Нормативный документ

**О**

Однократное измерение

Однозначная величина

**П**

Передача единицы величины

Поверка средств измерений

Погрешность измерений

Правила (ПР)

Пределы измерений

Преобразователь вибрационных перемещений

Прибор измерительный

Проведение испытаний

Проверка (лаборатории) на качество проведения испытаний

Протокол испытания

Прямое измерение

**Р**

Рекомендации (Р)

**С**

Сличение эталонов единиц величин

Совместное измерение

Совокупное измерение

Среднее арифметическое значение

Средство измерений

Стандартное отклонение

**Т**

Технические системы и устройства с измерительными функциями

Технические условия

Технический регламент

Техническое регулирование

Тип средств измерений

Тип стандартных образцов

**У**

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений

Унификация

Утверждение типа

### Построение доверительных интервалов

При многократном измерении одной и той же величины постоянного размера исследователю необходимо определить характер рассеяния значений измеряемой величины. Под рассеянием значений измеряемой величины понимают область её отклонений относительно среднего значения. На этой стадии анализа экспериментальных данных грубые результаты измерений должны быть исключены и внесены соответствующие поправки. Представляют интерес такие отклонения показаний результата измерения, которые являются следствием влияния незначительных отдельно взятых случайных факторов, но, тем не менее, суммарное действие влияющих факторов может быть значительным.

Центральная предельная теорема теории вероятностей утверждает, что результат измерения при этом подчиняется нормальному закону распределения вероятности со следующими числовыми характеристиками:  
плотности распределения вероятности

$$p(Q) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}}, \quad (225)$$

и функции распределения вероятности

$$F(Q_0) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_0} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}} dQ. \quad (226)$$

Известно, что закон распределения суммы независимых непрерывных и дискретных случайных отклонений (реализуемых в  $p(Q)$  и  $F(Q_0)$ ) при однородности их распределения относительно среднего значения уже при  $n \geq 10$  достаточно быстро приближается к нормальному закону распределения вероятности.

Если предположить, что условия центральной предельной теоремы выполняются, то весь массив экспериментальных данных при многократном измерении одной и той же величины постоянного размера должен группироваться около некоторого среднего значения, и выпадение какого-нибудь отдельного значения результата из этого массива позволяет предположить, что он ошибочный.

Вероятность, с которой любое значение результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, должно находиться в пределах от  $Q_1$  до  $Q_2$ :

$$\begin{aligned} P(Q_1 \leq Q_i \leq Q_2) &= F(Q_2) - F(Q_1) = \\ &= \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_2} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}} dQ - \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_1} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}} dQ. \end{aligned} \quad (227)$$

После замены переменной

$$\frac{Q - \bar{Q}}{\sigma_Q} = z; \quad \frac{Q_1 - \bar{Q}}{\sigma_Q} = z_1 \quad \frac{Q_2 - \bar{Q}}{\sigma_Q} = z_2. \quad (228)$$

Вероятность случайной величины в интервале

$$P(Q_1 \leq Q_i \leq Q_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_2} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_1} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz. \quad (229)$$

Таким образом, интересующая нас вероятность выражена в табулируемой форме через разность значений интегральной функции, но уже с плотностью распределения вероятности вида

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}, \quad (230)$$

характеризующей нормированный нормальный закон распределения вероятности.

Дифференциальная и интегральная функции нормированного нормального закона показаны на рис. 1 а, б.

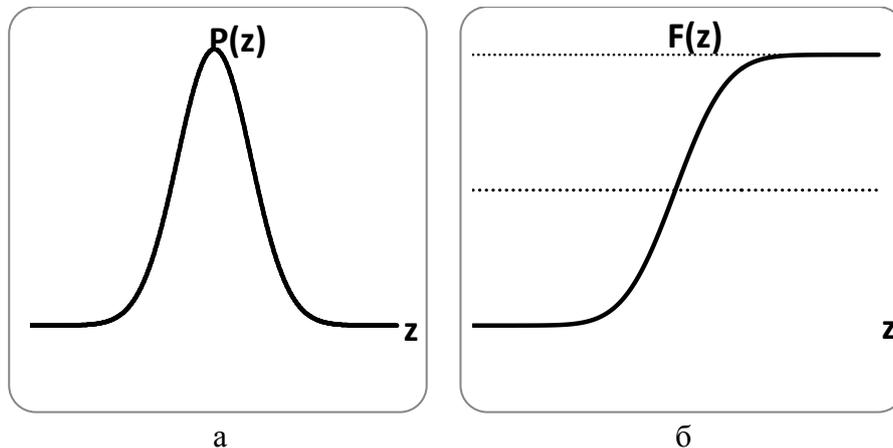


Рис. 1. Дифференциальная (а) и интегральная (б) функции нормированного нормального закона распределения вероятности

Числовые характеристики нормированного нормального закона распределения вероятности:

$$\bar{z} = 0; \quad \sigma_z^2 = 1. \quad (231)$$

На рис. 1, б видно, что

$$F(z) = 1 - F(-z). \quad (232)$$

Функция  $F(z) = 1 - F(-z)$  связана с интегралом вероятности (функцией Лапласа)  $L(z)$  соотношением

$$F(z) = \frac{1}{2} + L(z). \quad (233)$$

Функция  $F(z)$  табулирована в диапазоне значений  $z$  от 0 до 4, за пределами которого

в сторону больших  $z$  практически неотличима от 1. Учитывая симметрию функции  $F(z)$  можно выбрать  $z_2 = -z_1 = t$ , что соответствует выбору границ интервала  $[Q_1; Q_2]$ , равноотстоящих от среднего значения  $\bar{Q}$  на  $\pm t\sigma_Q$ , в соответствии с рис. 2.

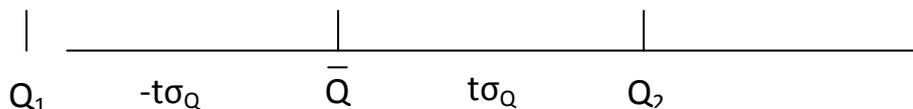


Рис. 2. Границы интервала

Функция Лапласа  $L(t)$  связана с заданной вероятностью соотношением

$$P(\bar{Q} - t\sigma_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + t\sigma_Q) = 2F(t) - 1 = 2L(t). \quad (234)$$

График функции Лапласа для табличных значений  $t$  (Приложение 2) приводится на рис.3.

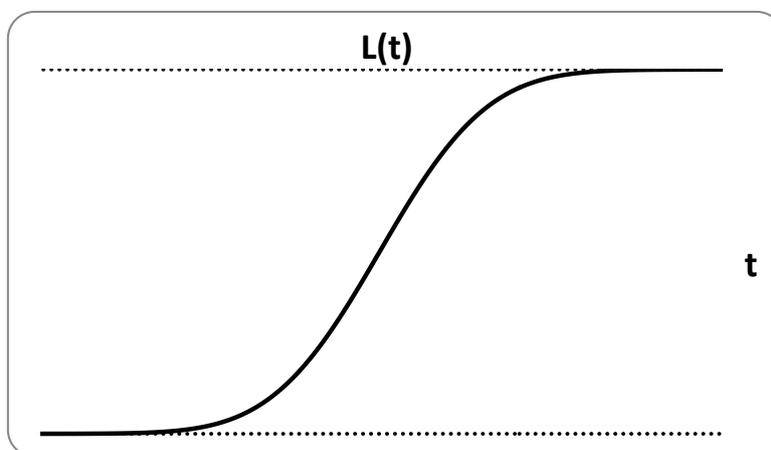


Рис.3. Функция Лапласа

При этом необходимо принимать во внимание то, что значения  $L(t)$  определяются с учетом знака  $t$  при  $L(-t) = -L(t)$ .

С учетом принятых обозначений  $P = 2L(t)$  параметр  $t$  (Приложение 4) показывает, на сколько величин  $\sigma_Q$  с заданной доверительной вероятностью может отличаться отдельное значение результата измерения, подчиняющегося нормальному закону распределения вероятности, от своего среднего значения. Например, с вероятностями:

$$P = 0,5 \rightarrow na \pm \frac{2}{3} \sigma_Q; \quad P = 0,68 \rightarrow na \pm \sigma_Q;$$

$$P = 0,95 \rightarrow na \pm 2\sigma_Q; \quad P = 0,99 \rightarrow na \pm 2,6\sigma_Q;$$

$$P = 0,997 \rightarrow na \pm 3\sigma_Q. \quad (235)$$

Вероятность  $P$  называется доверительной вероятностью.  
Интервал

$$[\bar{Q} - t\sigma_Q; \bar{Q} + t\sigma_Q] \quad (236)$$

называется доверительным интервалом.

Соответственно границы интервала

$$[Q_1 = \bar{Q} - t\sigma_Q; Q_2 = \bar{Q} + t\sigma_Q] \quad (237)$$

называются доверительными границами.

В приложении 2 приведены значения нормированной

функции

Лапласа

$$L(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}x^2} dx. \quad (238)$$

## Приложение 2

1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,00000	0,00399	0,0079	0,01197	0,01595	0,01994	0,02392	0,02790	0,03188	0,03586
0,1	03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	1517113
0,4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439	18793
0,5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	3389
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973	40147
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41309	41466	41621	41774
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45447
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169
2,1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574
2,2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158
2,4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361
2,5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506	49520
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807
2,9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861

Приложение 3

Число интервалов	Значения $\chi_0^2$ при доверительной вероятности								
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	0,97	0,99
5	1,15	1,35	2,12	2,88	3,65	4,62	6,35	6,92	9,23
10	6,35	7,12	8,08	9,62	10,58	12,12	14,23	15,38	18,46
15	11,54	12,88	14,23	15,96	16,92	18,46	20,77	22,69	25,77
20	16,53	18,27	20,01	21,73	23,08	24,81	27,31	29,04	31,54
25	21,92	23,85	25,96	29,81	29,23	30,96	33,65	35,77	39,98
30	26,92	29,23	31,35	33,65	35,02	36,92	40,03	42,31	46,92

Приложение 4

Функция  $P=2L(t)$

t	P	t	P	t	P	t	P
0,6	0,45	1,5	0,87	2,4	0,984	3,3	0,9990
0,7	0,51	1,6	0,89	2,5	0,988	3,4	0,9993
0,8	0,57	1,7	0,91	2,6	0,990	3,5	0,9995
0,9	0,63	1,8	0,93	2,7	0,993	3,6	0,9997
1,0	0,68	1,9	0,94	2,8	0,995	3,7	0,9998
1,1	0,73	2,0	0,95	2,9	0,996	3,8	0,99986
1,2	0,77	2,1	0,964	3,0	0,997	3,9	0,99990
1,3	0,80	2,2	0,972	3,1	0,9981	4,0	0,99993
1,4	0,84	2,3	0,978	3,2	0,9986		

Богданова Елена Леонардовна  
Лисин Сергей Кузьмич  
Соловейчик Кирилл Александрович  
Федотов Алексей Иванович

## **Стандартизация и метрология**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49