

Г.Г. РАННЕВ, А.П. ТАРАСЕНКО

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

**Учебник**

*Рекомендовано*

*Учебно-методическим объединением по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 653700 «Приборостроение» специальности 190900 «Информационно-измерительная техника и технологии»*

2-е издание, стереотипное

УДК 681.518.3 (075.8)

ББК 32.965

P22

**Р е ц е н з е н т ы:**

зав. кафедрой информационно-измерительной техники Рязанской государственной радиотехнической академии д-р техн. наук, проф. *А. М. Беркутов*;  
зав. кафедрой «Кибернетика» МИРЭА д-р техн. наук, проф. *В. К. Батоврин*

**Раннев Г. Г.**

P22 **Методы и средства измерений: Учебник для вузов /**  
**Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. — 2-е изд., стереотип. — М.:**  
**Издательский центр «Академия», 2004. — 336 с.**

ISBN 5-7695-1914-2

Приведены основные понятия метрологии, рассмотрены методы и средства измерительной техники, а также особенности измерений различных электрических и неэлектрических величин. Рассмотрены устройства, метрологические характеристики, параметрические и генераторные преобразователи. Даны примеры создания многофункциональных информационно-измерительных приборов на базе микропроцессорной техники и ЭВМ. Изложены принципы построения измерительных информационных систем и особенности их проектирования.

Для студентов высших учебных заведений. Может быть полезен аспирантам, специализирующимся в области информационно-измерительной техники и технологий.

УДК 681.518.3 (075.8)

ББК 32.965

© Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко, 2003

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2003

© Оформление. Издательский центр «Академия». 2004

ISBN 5-7695-1914-2

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Содержание предлагаемого учебника соответствует программе дисциплины «Методы и средства измерений», изучаемой студентами энергетических и приборостроительных специальностей высших учебных заведений.

В главе 1 кратко изложены основные понятия метрологии, приведены общепринятые классификации методов, средств и погрешностей измерений, рассмотрены вопросы оценки результатов измерений. В главе 2 представлены основные электромеханические и электронные измерительные приборы, их устройства, метрологические характеристики и применение. В главе 3 рассмотрены прямые и косвенные измерения таких физических величин, как ток, напряжение, мощность, энергия, фаза, частота, а также особенности этих измерений в различном диапазоне измеряемых величин и погрешности; в главе 4 — метрологическая основа магнитных измерений, средства измерений магнитного потока, магнитной индукции и напряженности магнитного поля, особенности этих измерений и погрешности; приведены статические и динамические характеристики магнитных материалов, методы и средства их измерений. В главе 5 представлены методы и средства измерений важных параметров цепей постоянного и переменного тока (сопротивления, емкости, индуктивности, добротности, тангенса угла диэлектрических потерь). Показано, что выбор технических средств осуществляется в зависимости от диапазона и погрешности измерений. В главе 6 рассмотрены принципы построения приборов для измерения различных неэлектрических величин, вопросы согласования параметров преобразователей при различных схемах их включения, погрешности системы преобразования; в главах 7 и 8 — различные параметрические и генераторные преобразователи, устройство и принципы их работы, основные метрологические характеристики, даны рекомендации по их применению. В главе 9 приведены примеры создания многофункциональных информационно-измерительных приборов, построенных на основе микропроцессорной техники и персональных ЭВМ; в главе 10 — прин-

цпы построения измерительных информационных систем (ИИС), особенности их проектирования, классификация, устройство и основные характеристики.

Предисловие, введение и главы 7 (7.4, 7.10, 7.11), 9, 10 написаны д-ром техн. наук, проф. Г. Г. Ранневым, главы 1—6, 7 (7.1—7.3, 7.5—7.9), 8 — доц., канд. техн. наук А. П. Тарасенко.

Подбор и изложение материала базируется на многолетнем опыте чтения лекций преподавателями кафедры информационных систем и измерительных технологий Московского ордена Трудового Красного знамени государственного открытого университета. Авторы выражают глубокую благодарность проф. В. И. Нефедову, доц. А. Ф. Агеевой и ст. преподавателю Е. А. Тишковской за активное участие в работе над учебником, а также проф. В. Н. Малиновскому за критические замечания и ценные советы при подготовке рукописи к изданию.



## ВВЕДЕНИЕ

В различные исторические периоды состояние мер и измерительной техники находилось в прямой зависимости от хозяйственной деятельности, общественных, религиозных и других факторов жизни общества.

В Библии говорится: «Да будут у вас весы верные, гири верные, ефа верная и гин верный»... «В доме твоём не должна быть двойная ефа, большая и меньшая»... «Гиря у тебя должна быть точная и правильная, чтобы продлились дни твои на Земле».

В Уставе князя Владимира о церковных судах 996 г. перечислены виды мер, порученных верховному надзору епископа с обязательствами «блюсти... городския и торговыя всяческия мерила (меры длины) и спуды (меры объёма) и завесы (весы) и ставила (меры веса)». В «Уставе о церковных судах и о людях и о миерилах торговых» (1134—1135) великого князя Всеволода Мстиславовича указывались меры, подлежащие надзору Киевского митрополита и Новгородского епископа. Так, в Великом Новгороде непосредственно осуществляющими надзор являлись староста церкви Иоанна Предтечи на Опоках и двое «пошлых», т. е. зажиточных купцов корпорации, отсюда и «локоть Ивановский» и т. д.

О Иване Грозном немец-опричник Истаден писал: «Нынешний великий князь достиг того, что по всей Русской земле, по всей державе — одна вера, один вес, одна мера».

Наиболее ранняя попытка создания узаконенных мер имела место в Греции (VI век до н. э.), где мерой длины в то время был фут, равный приблизительно 297 мм.

В более позднее время попытки введения мер, обязательных и одинаковых для всей страны, имели место в Англии в 1001, 1215 и в 1494 гг., во Франции в 1321 г., в Австрии в 1438 г.

В начале XVIII в. по указу Петра I наблюдение за правильностью торговых весов и мер было возложено на Департамент торговли и мануфактур Министерства финансов, а также на чинов полиции.

В статье 1 §8 Конституции США (1778) было записано: «Конгресс имеет власть чеканить монеты, регулируя их соотношение к иностранным монетам, и утверждать эталоны весов и мер».

В 1790 г. Учредительным собранием Франции был поставлен вопрос о создании и узаконении единой и обязательной для всех контролируемой государственной системы мер. В 1799 г. на хранение в архив Французской республики были переданы платиновые эталоны метра и килограмма. Вся совокупность метрических мер, созданных и узаконенных во Франции в конце XVIII в., легла в основу метрической системы мер, некоторые единицы вошли в качестве основных в Международную систему единиц (СИ).

Механика была первой из наук, где применялись единицы измерения. В прошлом существовало несколько вариантов систем единиц, но постепенно общепринятой стала система СГС (сантиметр, грамм, секунда). Затем была разработана система МКС (метр, килограмм, секунда). Понятие системы единиц как совокупности основных и производных впервые было предложено немецким ученым К. Гауссом в 1832 г. Он измерил напряженность магнитного поля Земли, выразив ее через длину, силу, массу и время, и ввел первый фундаментальный набор единиц. В 1849 г. Ф. Кольрауш измерил в этих единицах сопротивление. В 1851 г. В. Вебер впервые ввел полную систему электрических величин. Они определены через механические единицы и служат основой современной системы электрических единиц.

В связи с бурным развитием науки об электричестве стали создаваться электроизмерительные приборы. В 1745 г. русский академик Г.В. Рихтер создал электрометр, в 1820 г. А. Ампер демонстрировал первый гальванометр, в 1837 г. О. де ля Рив изготовил и продемонстрировал тепловой электроизмерительный прибор, в 1881 г. Ф. Уппенборн изобрел электромагнитный прибор, в 1832 г. К. Гаусс изложил методику составления системы магнитных единиц, которую В. Вебер (1804—1891) дополнил электрическими единицами.

В 1867 г. в Париже был организован Международный комитет мер и весов, основная задача которого состояла в тщательном изучении метрических мер, сравнении их с другими мерами, выявлении и разработке возможностей использования их внутри каждой страны и для международных отношений.

В России таким учреждением было Депо образцовых мер и весов (1842), позднее — Главная палата мер и весов (1893), которую возглавил Д. И. Менделеев.

Электроизмерительные приборы, имеющие более 250-летнюю историю, обязаны своим развитием работам А. Вольта, А. Ампера, М. Фарадея. Им принадлежит первенство в создании приборов прямого преобразования — гальванометров, амперметров, вольтметров и т. д.

История создания приборов уравнивающего преобразования начинается с 1841 г., когда были предложены мостовой метод измерения (мост Уитстона) и компенсационный метод из-

мерения постоянного напряжения (компенсатор Поггендорфа). Кроме того, в XIX в. найдены основные принципы преобразования неэлектрических величин в электрические: термоэлектрический эффект (Т. Зеетек, У. Томсон), пьезоэффект, тензоэффект (О. Д. Хвольсон).

Дальнейшему развитию электроизмерительных приборов способствовало изобретение электронной лампы: в 1904 г. появился диод, а в 1910 г. — триод и пентод. Сочетание усилителей и выпрямителей с магнитоэлектрическим измерительным механизмом позволило создать электронные вольтметры, частотомеры, фазометры. Изобретение электронно-лучевой трубки в 1911 г. привело к созданию электронно-лучевого осциллографа, который стал универсальным электроизмерительным прибором. Развитие электроники привело к разработке автоматических компенсаторов и мостов. Таким образом, классическая электроизмерительная техника дополнилась приборами с автоматическим уравниванием и электронными измерительными приборами.

Широкое развитие получают дискретные методы измерений, воплощенные в приборах с цифровым отсчетом и регистрацией, значительно расширяются диапазоны измеряемых величин, в измерительной аппаратуре применяется интегральная техника. Усложнение технологии производства, развитие научных исследований привело к необходимости измерения и контроля сотен и тысяч параметров одновременно. Появился новый класс информационно-измерительной техники — измерительные информационные системы (ИИС), осуществляющие сбор, обработку, передачу, хранение, отображение и воздействие информации на объект исследования. Работы в области информационно-измерительной техники и измерительных технологий позволили в последние годы создать новый раздел теории и практики измерений — виртуальные и интеллектуальные измерительные приборы и системы.

Большой вклад в развитие информационно-измерительной техники и измерительных технологий в XX в. внесли русские ученые: Е. Г. Шрамков, А. В. Фремке, Ф. Е. Темников, М. П. Цапенко, К. Б. Карандеев, Д. И. Агейкин, П. П. Орнатский, П. В. Новицкий, Г. Д. Бурдун, Э. И. Цветков, Е. А. Чернявский, В. Н. Малиновский, Л. Ф. Куликовский, В. С. Гутников, В. М. Шляндин, Г. И. Кавалеров, В. А. Ильин, Г. Г. Раннев, Э. М. Шамаков и др.

# ГЛАВА 1

## ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИИ

**Метрология** — (от греч. *metron* — мера, *logos* — учение) — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. **Теоретическая (фундаментальная) метрология** — раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии. **Законодательная метрология** — раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимости точности измерений в интересах общества. **Практическая (прикладная) метрология** — раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

**Основные задачи метрологии.** К основным задачам теоретической метрологии относятся:

- установление рациональной номенклатуры единиц физических величин;
- создание и совершенствование системы воспроизведения, хранения и передачи размеров единиц;
- установление номенклатуры, методов нормирования, оценки и контроля показателей точности результатов измерений и метрологических характеристик средств измерений;
- разработка оптимальных (в соответствии с принятыми для каждой измерительной задачи критериями оптимальности) принципов, приемов и способов обработки результатов измерения.

На практике задачи метрологии претворяют в жизнь метрологические службы, созданные в соответствии с законодательством для выполнения работ по обеспечению единства измерений и для осуществления метрологического контроля и надзора. Различают государственную метрологическую службу, метрологические службы государственных органов управления, метрологические службы юридических лиц.

**Обеспечение единства измерений** — деятельность метрологических служб, направленная на достижение и поддержание единства измерений в соответствии с законодательными актами, а также правилами и нормами, установленными государственными стандартами и другими нормативными документами по обеспечению единства измерений.

**Единство измерений** — состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы.

Работы по обеспечению единства измерений и метрологическому контролю и надзору на межрегиональном и межотраслевом уровнях осуществляет государственная метрологическая служба, в пределах министерства (ведомства) — метрологическая служба государственного органа управления, а на предприятии (организации) — метрологическая служба юридического лица.

**Основные задачи метрологической службы юридических лиц.** К ним относятся:

- обеспечение единства и требуемой точности измерений, повышение уровня метрологического обеспечения производства;
- внедрение в практику современных методов и средств измерений, направленное на повышение уровня научных исследований, эффективности производства, технического уровня и качества продукции, а также иных работ, выполняемых предприятием;
- организация и проведение калибровки и ремонта средств измерений, находящихся в эксплуатации, своевременное представление средств измерений на поверку;
- проведение метрологической аттестации методик выполнения измерений, а также участие в аттестации средств измерений и контроля;
- проведение метрологической экспертизы технических заданий, проектной, конструкторской и технологической документации, проектов стандартов и других нормативных документов;
- проведение работ по метрологическому обеспечению подготовки производства;
- участие в аттестации испытательных подразделений, в подготовке к аттестации производств и сертификации систем качества;
- осуществление метрологического надзора за состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами, применяемыми для калибровки средств измерений, соблюдением метрологических правил и норм, нормативных документов по обеспечению единства измерений.

**Физическая величина** — одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

**Размер физической величины** — количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

**Значение физической величины** — выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

**Единица измерения физической величины** — физическая величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное единице, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

При измерениях используют понятия истинного и действительного значения физической величины. **Истинное значение физической величины** — значение величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину. Истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины. Его можно получить только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений. **Действительное значение физической величины** — это значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

**Измерение физических величин. Измерение** — совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Например, прикладывая линейку с делениями к какой-либо детали, по сути сравнивают ее размер с единицей, хранимой линейкой, и, произведя отсчет, получают значение величины (длины, высоты, толщины и других параметров детали); с помощью измерительного прибора сравнивают размер величины, преобразованной в перемещение указателя, с единицей, хранимой шкалой этого прибора, и проводят отсчет.

Приведенное определение понятия «измерение» удовлетворяет общему уравнению измерений, что имеет существенное значение при упорядочении системы понятий в метрологии.

В нем учтена техническая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения величины). В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение

(не выделена величина как физическая и не определена единица измерения этой величины), практикуется оценивать такие величины по условным шкалам (например, шкала Мооса для определения твердости минералов, содержащая 10 условных чисел твердости).

**Характеристики измерений.** Измерение — сложный процесс и важными для него являются следующие характеристики: принцип и метод измерений, результат, погрешность, точность, сходимость, воспроизводимость, правильность и достоверность.

**Принцип измерений** — физическое явление или эффект, положенное в основу измерений. Примеры: применение эффекта Джоульсона для измерения электрического напряжения, эффекта Доплера для измерения скорости; использование силы тяжести при измерении массы взвешиванием.

**Метод измерения** — прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений. Пример: измерение массы на рычажных весах с уравниванием гирями (масса массы с известным значением).

**Результат измерения** — значение величины, полученное путем ее измерения.

**Погрешность результата измерений** — отклонение результата измерений от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

**Точность результата измерений** — одна из характеристик качества измерений, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения. Высокая точность измерения соответствует малым погрешностям. Количественно точность оценивают обратной величиной модуля относительной погрешности, например, если относительная погрешность составляет 0,01, то точность равна 100.

**Сходимость результатов измерений** — близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью. Сходимость измерений отражает влияние случайных погрешностей на результат измерения.

**Воспроизводимость** — близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям (температура, давление, влажность и др.).

**Правильность** — характеристика качества измерений, отражающая близость к нулю систематических погрешностей в их результатах.

**Достоверность** — характеристика качества измерений, отражающая доверие к их результатам, которая определяется вероят-

ностью (доверительной) того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных границах (доверительных). Измерения делят на достоверные и недостоверные в зависимости от того, насколько известны вероятностные характеристики их отклонения от действительного значения измеряемых величин.

## 1.2. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Единицы, образующие какую-нибудь систему, называют *системными единицами*, а единицы, не входящие ни в одну из систем, — *внесистемными*. Из всех систем предпочтение отдается основному, построенному на единицах длины, массы, времени. Одними из таких систем для метрических единиц являются системы МКС (метр, килограмм, секунда) и СГС (сантиметр, грамм, секунда). Раньше широко использовались также системы механических, тепловых, электрических, магнитных, световых величин и др. Большое число внесистемных единиц, неудобства, возникшие на практике в связи с пересчетами при переходе от одной системы к другой, — все это вызвало необходимость создания единой универсальной системы единиц.

В 1960 г. 11 Генеральная конференция по мерам и весам утвердила Международную систему единиц — СИ (SI — Systeme International). Система СИ включает в себя систему единиц МКС (механические единицы) и систему МКСА (электрические единицы).

СИ строится из основных и производных единиц. Основные единицы образуют минимальный набор независимых исходных единиц, а производные единицы представляют собой различные комбинации основных единиц. Кроме самих единиц стандартизованы названия единиц и их обозначения, что дает возможность ученым иметь универсальный язык и записывать формулы, понятные во всем мире.

**Основные единицы.** В основу СИ положены семь основных единиц:

- **метр** (м) — единица длины. Метр равен длине пути, которую проходит свет в вакууме за  $1/299792458$  долю секунды;

- **килограмм** (кг) — единица массы. Килограмм равен массе международного прототипа килограмма (цилиндр из платиноиридия размером  $39 \times 39$  мм).

В 1899 г. было изготовлено 43 образца, Россия получила два из них: N12 (государственный эталон) и N26 (эталон-копия);

- **секунда** (с) — единица времени. Секунда равна  $9192631770$  периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей;



• **ампер (А)** — единица силы электрического тока. Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н;

• **кельвин (К)** — единица термодинамической температуры. Кельвин равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды; допускается также применение шкалы Цельсия;

• **моль (моль)** — единица количества вещества. Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (атомов, молекул, электронов и др.), сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг;

• **кандела (кд)** — единица света. Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/ср.

**Производные единицы.** Кроме основных физических единиц, в систему СИ входят производные единицы, которые определяются с использованием физических законов и зависимостей через основные физические величины или через основные и уже определенные производные. К ним относятся единицы пространства и времени, механических, электрических и магнитных величин, тепловых, световых и акустических величин, величин ионизирующих излучений.

В Приложении 1 представлены широко используемые основные (см. табл. П.1) и производные единицы механических (см. табл. П.2), электрических (см. табл. П.3), магнитных (см. табл. П.4) и оптических (см. табл. П.5) величин; множители и приставки, используемые для образования десятичных кратных и дольных единиц (см. табл. П.6). Учитывая, что для обозначения некоторых физических величин принято использовать определенные буквы греческого алфавита, в табл. П.7 приведено общепринятое их употребление.

**Внесистемные единицы.** В практике измерений довольно часто используют внесистемные единицы — единицы физических величин, не входящие в принятую систему единиц. Внесистемные единицы (по отношению к единицам СИ) делят на четыре группы: 1 — допускаемые наравне с единицами СИ; 2 — допускаемые к применению в специальных областях; 3 — временно допускаемые; 4 — устаревшие (недопускаемые). Например, плоские углы чаще всего измеряют в угловых градусах, минутах и секундах. Эти внесистемные единицы допущены к применению наравне с единицами Международной системы СИ и в них градуировано боль-

шинство угломерных приборов. В табл. П.8 Приложения 1 приведены основные внесистемные единицы, используемые наравне с единицами СИ.

### 1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Электрические измерения очень разнообразны и это связано с множеством измеряемых физических величин, различным характером их проявления во времени, различными требованиями к точности измерений, различными способами получения результата и т.д.

Измерение, согласно определению, предполагает сравнение исследуемой физической величины с однородной физической величиной, значение которой принято за единицу, и представление результата этого сравнения в виде числа. Это многооперационная процедура и для ее выполнения необходимо осуществление следующих измерительных операций: воспроизведения, сравнения, измерительного преобразования, масштабирования.

**Воспроизведение величины заданного размера** — операция создания выходного сигнала с заданным размером информативного параметра, т.е. величиной напряжения, тока, сопротивления, индуктивности и др. Эта операция реализуется средством измерений — мерой.

**Сравнение** — определение соотношения между однородными величинами, осуществляемое путем их вычитания. Эта операция реализуется устройством сравнения (компаратором).

**Измерительное преобразование** — операция преобразования входного сигнала в выходной, реализуемая измерительным преобразователем. Выходные сигналы измерительных преобразователей и их информативные параметры унифицированы государственной системой приборов и средств автоматизации (ГСП). Унифицированными сигналами являются постоянное напряжение 0...10 В и постоянный ток 0...5, 0...20, 4...20 мА.

**Масштабирование** — создание выходного сигнала, однородного с входным, размер информативного параметра которого пропорционален в  $K$  раз размеру информативного параметра входного сигнала. Масштабное преобразование реализуется в устройстве, которое называется *масштабным преобразователем*.

**Классификация измерений.** Измерения можно классифицировать по различным признакам:

по числу измерений — *однократные*, когда измерения выполняют один раз, и *многократные* — ряд однократных измерений физической величины одного и того же размера;

характеристике точности — *равноточные* — ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точ-

ности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью, и *неравноточные*, когда ряд измерений какой-либо величины выполняется различающимися по точности средствами измерений и в разных условиях;

характеру изменения во времени измеряемой величины — *статические*, когда значение физической величины считается неизменным на протяжении времени измерения, и *динамические* — измерение изменяющейся по размеру физической величины;

способу представления результатов измерений — *абсолютные* — измерения величины в ее единицах, и *относительные* — измерения изменений величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную. Относительные измерения при прочих равных условиях могут быть выполнены более точно, чем абсолютные, так как в суммарную погрешность не входит погрешность меры величины;

способу получения результата измерения — прямые и косвенные.

**Прямые измерения** — измерения, при которых искомое значение физической величины получают непосредственно из опытных данных. К прямым измерениям относится нахождение значения напряжения, тока, мощности по шкале прибора и т. д.

**Косвенные измерения** — определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. При этом числовое значение искомой величины находится расчетным путем, например значение мощности в нагрузке определяется по показаниям амперметра и вольтметра ( $P = UI$ ). Хотя косвенные измерения сложнее прямых, они широко применяются в практике измерений, особенно там, где прямые измерения практически невыполнимы, либо тогда, когда косвенное измерение позволяет получить более точный результат по сравнению с прямым измерением. Косвенные измерения в свою очередь делят на совокупные и совместные.

**Совокупные измерения** — проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. Например, нахождение сопротивлений двух резисторов по результатам измерения сопротивления при последовательном и параллельном их включении; определение массы отдельных гирь набора по известному значению массы одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний этих гирь.

**Совместные измерения** — проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Числовые значения искомых вели-

чин, как и в случае совокупных измерений, находят из системы уравнений, связывающих значения искомых величин со значениями величин, измеренных прямым (или косвенным) способом. Число уравнений должно быть не меньше числа искомых величин. Например, по результатам прямых измерений значений сопротивления терморезистора при двух различных температурах решением системы уравнений рассчитывают необходимые значения коэффициентов.

**Методы измерения.** Методы измерения можно классифицировать по различным признакам:

по физическому принципу, положенному в основу измерения — электрические, механические, магнитные, оптические и т.д.;

степени взаимодействия средства и объекта измерения — контактный и бесконтактный. Например, измерение температуры тела термометром сопротивления (контактный) и объекта пирометром (бесконтактный).

режиму взаимодействия средства и объекта измерения — статические и динамические;

виду измерительных сигналов — аналоговые и цифровые;

организации сравнения измеряемой величины с мерой — методы непосредственной оценки и сравнения.

**Метод непосредственной оценки** (отсчета) — метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений. Он отличается своей простотой, но невысокой точностью.

**Метод сравнения с мерой** — метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Эти методы сложны, но характеризуются высокой точностью. Их подразделяют на дифференциальные, нулевые, противопоставления, замещения и совпадений.

**Дифференциальный (разностный) метод** — метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, незначительно отличающейся от измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами. Точность метода возрастает с уменьшением разности между сравниваемыми величинами.

**Нулевой метод** — метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Например, измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравновешиванием.

**Метод измерения замещением** — метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Метод используют, например, при измерении индуктивности, емкости.

**Метод совпадений** — метод, при котором измеряют разность между искомой величиной и образцовой мерой, используя совпадения отметок или периодических сигналов. Метод применяют, например, для измерения перемещений, периода, частоты.

#### 1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

**Средство измерений** (СИ) — техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени. Данное определение раскрывает суть средства измерений, заключающуюся, во-первых, в «умении» хранить (или воспроизводить) единицу физической величины; во-вторых, в неизменности размера хранимой единицы. Эти важнейшие факторы и обуславливают возможность выполнения измерения (сопоставление с единицей), т. е. «делают» техническое средство средством измерений. Если размер единицы в процессе измерений изменяется более чем установлено нормами, таким средством нельзя получить результат с требуемой точностью. Это означает, что измерять можно лишь тогда, когда техническое средство, предназначенное для этой цели, может хранить единицу, достаточно неизменную по размеру (во времени).

Средства измерений классифицируют в зависимости от назначения и метрологических функций.

По назначению СИ подразделяются на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и измерительные системы.

**Мера** — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Различают меры:

- **однозначные** — воспроизводящие физическую величину одного размера (например, ЭДС нормального элемента равна 1,0185 В);

- **многозначные** — воспроизводящие физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины);

- **набор мер** — комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для практического применения как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины);

- **магазин мер** — набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их

соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

**Измерительный преобразователь** — техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину, или измерительный сигнал, удобный для обработки. Это преобразование должно выполняться с заданной точностью и обеспечивать требуемую функциональную зависимость между выходной и входной величинами преобразователя. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений. Измерительные преобразователи могут быть классифицированы по различным признакам, например:

по характеру преобразования различают следующие виды измерительных преобразователей: электрических величин в электрические (шунты, делители напряжения, измерительные трансформаторы и пр.); магнитных величин в электрические (измерительные катушки, феррозонды, преобразователи, основанные на эффектах Холла, Гаусса, сверхпроводимости и т.д.); неэлектрических величин в электрические (термо- и тензопреобразователи, реостатные, индуктивные, емкостные и т.д.);

месту в измерительной цепи и функциям различают первичные, промежуточные, масштабные и передающие преобразователи.

**Измерительный прибор** — средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Измерительные приборы подразделяются:

по форме регистрации измеряемой величины — на аналоговые и цифровые;

применению — амперметры, вольтметры, частотомеры, фазометры, осциллографы и т.д.;

назначению — приборы для измерения электрических и неэлектрических (магнитных, тепловых, химических и др.) физических величин;

действию — интегрирующие и суммирующие;

способу индикации значений измеряемой величины — показывающие, сигнализирующие и регистрирующие;

методу преобразования измеряемой величины — непосредственной оценки (прямого преобразования) и сравнения;

способу применения и по конструкции — щитовые, переносные, стационарные;

защищенности от воздействия внешних условий — обыкновенные, влаго-, газо-, пылезащищенные, герметичные, взрывобезопасные и др.

**Измерительные установки (ИУ)** — совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте. Измерительную установку, применяемую для поверки, называют *поверочной установкой*, а входящую в состав эталона — *эталонной установкой*. Некоторые большие измерительные установки называют *измерительными машинами*, например, установки для измерений удельного сопротивления электротехнических материалов; для испытаний магнитных материалов.

**Измерительная система (ИС)** — совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях. В зависимости от назначения измерительные системы подразделяют на информационные, контролирующие, управляющие и др. Например, радионавигационная система для определения местоположения различных объектов, состоящая из ряда измерительно-вычислительных комплексов, разнесенных в пространстве на значительное расстояние друг от друга.

**Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК)** — функционально объединенная совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

По метрологическим функциям СИ подразделяются на эталоны и рабочие средства измерений.

**Эталон единицы физической величины** — средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке. Конструкция эталона, его свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя тесно связанными друг с другом существенными признаками — неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

**Неизменность** — свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы физической величины длительное время. При этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов, основанных на физических постоянных.

**Воспроизводимость** — возможность воспроизведения единицы физической величины с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники.

**Сличаемость** — возможность обеспечения сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития измерительной техники.

По подчинению эталоны подразделяются на международные эталоны, первичные, вторичные.

**Международный эталон** — эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами. Международные эталоны хранятся в Международном бюро мер и весов (МБМВ) в г. Севре вблизи Парижа и служат для сличения с первичными эталонами крупнейших метрологических лабораторий разных стран.

**Первичные (национальные) эталоны** — эталоны, признанные официальным решением служить в качестве исходных для страны. Они хранятся в национальных лабораториях различных стран и предназначены для калибровки в этих лабораториях вторичных эталонов. Данное определение по существу совпадает с определением понятия «государственный эталон». Это свидетельствует о том, что термины «государственный эталон» и «национальный эталон» отражают одно и то же понятие. Вследствие этого термин «национальный эталон» применяют при проведении сличения эталонов, принадлежащих отдельным государствам, с международным эталоном или при проведении так называемых «круговых» сличений эталонов ряда стран.

**Вторичные эталоны** — эталоны, получающие размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы. Они хранятся в различных отраслевых испытательных лабораториях и используются для контроля и калибровки рабочих эталонов.

По метрологическому назначению вторичные эталоны подразделяются на исходный, сравнения и рабочий.

**Исходный эталон** — эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в данной лаборатории, организации, на предприятии), от которого передают размер единицы подчиненным эталонам и имеющимся средствам измерений. Исходным эталоном в стране служит первичный эталон, исходным эталоном для республики, региона, министерства (ведомства) или предприятия может быть вторичный или рабочий эталон. Вторичный, или рабочий, эталон, являющийся исходным эталоном для министерства (ведомства), нередко называют *ведомственным* эталоном. Эталоны, стоящие в поверочной схеме ниже исходного эталона, обычно называют *подчиненными* эталонами.



**Эталон сравнения** — эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

**Рабочий эталон** — эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Термин рабочий эталон заменил собой термин образцовое средство измерений (ОСИ) с целью упорядочения терминологии и приближения ее к международной. При необходимости рабочие эталоны подразделяют на разряды (1-й, 2-й, ...,  $n$ -й), как это было принято для ОСИ. В этом случае передачу размера единицы осуществляют через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке размер единицы передают рабочему средству измерений.

Совокупность государственных первичных и вторичных эталонов, являющаяся основой обеспечения единства измерений в стране, составляет эталонную базу страны. Число эталонов не является постоянным, а изменяется в зависимости от потребностей экономики страны. Ясно, что перечень эталонов не совпадает с измеряемыми физическими величинами, хотя прослеживается постепенное увеличение их числа из-за постоянного развития рабочих средств измерений.

Эталонная база России насчитывает более 150 государственных эталонов. Она включает в себя эталоны механических величин — массы, длины и времени; электрических величин — тока, емкости, напряжения; магнитных величин — индуктивности, магнитного потока; тепловых величин — температуры; световых величин — силы света и др.

**Рабочее средство измерений** — это средство измерений, используемое в практике измерений и не связанное с передачей единиц размера физических величин другим средствам измерений. Рабочее средство измерений в свою очередь бывает основным и вспомогательным.

**Основное средство измерений** — средство измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей.

**Вспомогательное средство измерений** — средство измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерений необходимо учитывать для получения результатов измерений требуемой точности (например, термометр для измерения температуры газа в процессе измерений объемного расхода этого газа).

В практике измерений встречаются понятия стандартизованного и нестандартизованного средств измерений.

**Стандартизованное средство измерений** — средство измерений, изготовленное и применяемое в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта. Обычно стандартизо-

ванные средства измерений подвергают испытаниям и вносят в Государственный реестр.

**Нестандартизованное средство измерений** — средство измерений, стандартизация требований к которому признана нецелесообразной.

## 1.5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Все средства измерений имеют общие свойства, позволяющие сопоставлять их между собой: метрологические, эксплуатационные, информационные и др. Отдельные виды и типы СИ обладают своими специфическими свойствами, которые отражаются в соответствующих нормативно-технических документах. Поэтому важно уметь выделять и оценивать составляющую погрешности, вносимую используемыми средствами измерений по их метрологическим характеристикам.

**Метрологическая характеристика средства измерений** — характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат и погрешность его измерений. Для каждого типа СИ устанавливают свои метрологические характеристики. Метрологические характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называют *нормируемыми метрологическими характеристиками*, а определяемые экспериментально — *действительными метрологическими характеристиками*.

К метрологическим характеристикам относятся функция преобразования, погрешность средства измерений, чувствительность, цена деления шкалы, порог чувствительности, диапазон измерений, вариация показаний и др. От того, насколько они точно будут выдержаны при изготовлении и стабильны при эксплуатации, зависит точность результатов, получаемая с помощью СИ.

**Функция преобразования (статическая характеристика преобразования)** — функциональная зависимость между информативными параметрами выходного и входного сигналов средства измерений. Функцию преобразования, принимаемую для средства измерения (типа) и устанавливаемую в научно-технической документации на данное средство (тип), называют *номинальной функцией преобразования средства (типа)*. Номинальная статическая характеристика преобразования позволяет рассчитать значение входной величины по значению выходной. Она может задаваться аналитически, таблично или графически.

**Погрешность СИ** — важнейшая метрологическая характеристика, определяемая как разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряе-

мой величины. Для меры показанием является ее номинальное значение.

**Чувствительность СИ** — свойство средства измерений, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины. Различают абсолютную и относительную чувствительность. Абсолютную чувствительность определяют по формуле

$$S = \Delta Y / \Delta X, \quad (1.1)$$

относительную чувствительность — по формуле

$$S_{\text{отн}} = \Delta Y / (\Delta X / X),$$

где  $\Delta Y$  — изменение сигнала на выходе;  $\Delta X$  — изменение измеряемой величины,  $X$  — измеряемая величина.

При нелинейной статической характеристике преобразования чувствительность зависит от  $X$ , при линейной характеристике она постоянна.

У измерительных приборов при постоянной чувствительности шкала равномерная, т. е. расстояние между соседними делениями шкалы одинаковое.

**Цена деления шкалы** (постоянная прибора) — разность значения величины, соответствующая двум соседним отметкам шкалы СИ. Приборы с равномерной шкалой имеют постоянную цену деления. В приборах с неравномерной шкалой цена деления может быть разной на разных участках шкалы, и в этом случае нормируется минимальная цена деления. Цена деления шкалы равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы прибора, и может быть также определена через абсолютную чувствительность:

$$C = 1/S. \quad (1.2)$$

**Порог чувствительности** — наименьшее значение изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством. Порог чувствительности выражают в единицах входной величины.

**Диапазон измерений** — область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИ. Значения величины, ограничивающие диапазон измерений снизу и сверху (слева и справа), называют соответственно *нижним* и *верхним* пределом измерений. С целью повышения точности измерений диапазон измерений СИ можно разбить на несколько поддиапазонов. При переходе с одного поддиапазона на другой некоторые составляющие основной погрешности уменьшаются, что приводит к повышению точности измерений. При нормировании погрешности допускают для каждого поддиапазона свои предель-

ные значения погрешности. Область значений шкалы прибора, ограниченную начальными и конечными значениями шкалы, называют *диапазоном показаний*.

Для средства измерений, выдающих результаты измерений в цифровом коде, указывают цену единицы младшего разряда (единицы младшего разряда цифрового отсчетного устройства), вид выходного кода (двоичный, двоично-десятичный) и число разрядов кода.

Для оценки влияния средства измерений на режим работы объекта исследования указывают входное полное сопротивление  $Z_{вх}$ . Это сопротивление влияет на мощность, потребляемую от объекта исследования средством измерения.

Допустимая нагрузка на средство измерений зависит от выходного полного сопротивления  $Z_{вых}$ . Чем меньше выходное сопротивление, тем больше допустимая нагрузка на средство измерений.

**Вариация показаний** — наибольшая вариация выходного сигнала прибора при неизменных внешних условиях. Она является следствием трения и люфтов в узлах приборов, механического и магнитного гистерезиса элементов и др.

**Вариация выходного сигнала** — это разность между значениями выходного сигнала, соответствующими одному и тому же действительному значению входной величины при медленном подходе слева и справа к выбранному значению входной величины.

**Динамические характеристики**, т. е. характеристики инерционных свойств (элементов) измерительного устройства, определяющие зависимость выходного сигнала СИ от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала, внешних влияющих величин, нагрузки. К ним относят дифференциальное уравнение, описывающее работу средства измерений; переходную и импульсную переходную функции, амплитудные и фазовые характеристики, передаточную функцию.

Динамические свойства средства измерений определяют динамическую погрешность. **Динамическая погрешность средства измерений** — погрешность средства измерений, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерений) физической величины.

**Нормируемые метрологические характеристики** — совокупность метрологических характеристик данного типа средств измерений, устанавливаемая нормативными документами на средства измерений. Нормируемые метрологические характеристики, включаемые в этот комплекс, должны отражать реальные свойства СИ, и их номенклатура должна быть достаточной для оценки инструментальной составляющей погрешности измерений в рабочих условиях применения СИ с той степенью достоверности, которая требуется для решения поставленной измерительной задачи. Об-

щий перечень нормируемых метрологических характеристик СИ, формы их представления и способы нормирования устанавливаются ГОСТом. В него могут входить:

- пределы измерений, пределы шкалы;
- цена деления равномерной шкалы аналогового прибора или многозначной меры, при неравномерной шкале — минимальная цена деления;
- выходной код, число разрядов кода, номинальная цена единицы наименьшего разряда цифровых СИ;
- номинальное значение однозначной меры, номинальная статическая характеристика преобразования измерительного преобразователя;
- погрешность СИ;
- вариация показаний прибора или выходного сигнала преобразователя;
- полное входное сопротивление измерительного устройства, полное выходное сопротивление измерительного преобразователя или меры;
- неинформативные параметры выходного сигнала измерительного преобразователя или меры;
- динамические характеристики СИ; функции влияния.

Кроме метрологических характеристик при эксплуатации средств измерений важны и неметрологические характеристики: показатели надежности, электрическая прочность, сопротивление изоляции, устойчивость к климатическим и механическим воздействиям, время установления рабочего режима и др.

**Надежность средства измерений** — это способность СИ сохранять нормированные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Основными критериями надежности приборов являются вероятность и средняя продолжительность безотказной работы.

**Вероятность безотказной работы** определяется вероятностью отсутствия отказов прибора в течение определенного промежутка времени.

**Средняя продолжительность** — отношение времени работы прибора к числу отказов за это время.

## 1.6. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Процедура измерения состоит из следующих этапов: принятие модели объекта измерения, выбор метода измерения, выбор СИ, проведение эксперимента для получения результата. Это приводит к тому, что результат измерения отличается от истинного значения измеряемой величины на некоторую величину, называемую *погрешностью измерения*. Измерение можно считать законченным,

если определена измеряемая величина и указана возможная степень ее отклонения от истинного значения.

Причины возникновения погрешностей чрезвычайно многочисленны, поэтому классификация погрешностей, как и всякая другая классификация, носит достаточно условный характер.

Следует различать погрешность СИ и погрешность результата измерения этим же СИ. Погрешности измерений зависят от метрологических характеристик используемых СИ, совершенства выбранного метода измерений, внешних условий, а также от свойств объекта измерения и измеряемой величины. Погрешности измерений обычно превышают погрешности используемых СИ, однако, используя специальные методы устранения ряда погрешностей и статистическую обработку данных многократных наблюдений, можно в некоторых случаях получить погрешность измерения меньше погрешности используемых СИ.

По способу выражения погрешности средств измерений делятся на абсолютные, относительные и приведенные.

**Абсолютная погрешность** — погрешность СИ, выраженная в единицах измеряемой физической величины:

$$\Delta = X_{\text{изм}} - X_{\text{д}}. \quad (1.3)$$

**Относительная погрешность** — погрешность СИ, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к результату измерений или к действительному значению измеренной физической величины:

$$\gamma_{\text{отн}} = (\Delta/X_{\text{д}})100. \quad (1.4)$$

Для измерительного прибора  $\gamma_{\text{отн}}$  характеризует погрешность в данной точке шкалы, зависит от значения измеряемой величины и имеет наименьшее значение в конце шкалы прибора.

Для характеристики точности многих средств измерений применяется приведенная погрешность.

**Приведенная погрешность** — относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности СИ к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона:

$$\gamma_{\text{прив}} = (\Delta/X_{\text{норм}})100, \quad (1.5)$$

где  $X_{\text{норм}}$  — нормирующее значение, т.е. некоторое установленное значение, по отношению к которому рассчитывается погрешность.

Выбор нормирующего значения производится в соответствии с ГОСТ 8.009—84. Это может быть верхний предел измерений СИ, диапазон измерений, длина шкалы и т.д. Для многих средств измерений по приведенной погрешности устанавливают класс точности прибора.

По причине и условиям возникновения погрешности средств измерений подразделяются на основную и дополнительную.

**Основная погрешность** — это погрешность СИ, находящихся в нормальных условиях эксплуатации. Она возникает из-за неидеальности собственных свойств СИ и показывает отличие действительной функции преобразования СИ в нормальных условиях от номинальной.

Нормативными документами на СИ конкретного типа (стандартами, техническими условиями, калибровкой и др.) оговариваются *нормальные условия измерений* — это условия измерения, характеризующие совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости. Среди таких влияющих величин наиболее общими являются температура и влажность окружающей среды, напряжение, частота и форма кривой питающего напряжения, наличие внешних электрических и магнитных полей и др. Для нормальных условий применения СИ нормативными документами предусматриваются:

*нормальная область значений влияющей величины* (диапазон значений): температура окружающей среды —  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ; положение прибора — горизонтальное с отклонением от горизонтального  $\pm 2^\circ$ ; относительная влажность —  $(65 \pm 15)\%$ ; практическое отсутствие электрических и магнитных полей, напряжение питающей сети —  $(220 \pm 4,4)$  В, частота питающей сети —  $(50 \pm 1)$  Гц и т. д.;

*рабочая область значений влияющей величины* — область значений влияющей величины, в пределах которой нормируют дополнительную погрешность или изменение показаний средства измерений;

*рабочие условия измерений* — это условия измерений, при которых значения влияющих величин находятся в пределах рабочих областей. Например, для измерительного конденсатора нормируют дополнительную погрешность на отклонение температуры окружающего воздуха от нормальной; для амперметра — изменение показаний, вызванное отклонением частоты переменного тока от 50 Гц (значение частоты 50 Гц в данном случае принимают за нормальное значение частоты).

**Дополнительная погрешность** — составляющая погрешности СИ, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений. Нормируются, как правило, значения основной и дополнительной погрешностей, рассматриваемые как наибольшие для данного средства измерений.

**Предел допускаемой основной погрешности** — наибольшая основная погрешность, при которой СИ может быть признано годным и допущено к применению по техническим условиям.

**Предел допускаемой дополнительной погрешности** — это та наибольшая дополнительная погрешность, при которой средство измерения может быть допущено к применению. Например, для прибора класса точности 1,0 приведенная дополнительная погрешность при изменении температуры на 10 °С не должна превышать  $\pm 1\%$ . Это означает, что при изменении температуры среды на каждые 10 °С добавляется дополнительная погрешность 1 %.

Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей выражают в форме абсолютных, относительных и приведенных погрешностей.

Обобщенная характеристика данного типа средств измерений, как правило, отражающая уровень их точности, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность, называется *классом точности СИ*. Класс точности дает возможность судить о том, в каких пределах находится погрешность СИ одного типа, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью каждого из этих средств, так как погрешность зависит также от метода измерений, условий измерений и т. д. Это важно учитывать при выборе СИ в зависимости от заданной точности измерений. Класс точности СИ конкретного типа устанавливают в стандартах технических требований (условий) или в других нормативных документах. Например, прибор класса 0,5 может иметь основную приведенную погрешность, не превышающую 0,5 %. Вместе с тем прибор должен удовлетворять соответствующим требованиям и в отношении допускаемых дополнительных погрешностей. Например, ГОСТ 8.401 — 80 устанавливает девять классов точности для аналоговых электромеханических приборов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0.

Зная класс точности СИ, из (1.5) можно найти максимально допустимое значение абсолютной погрешности для всех точек диапазона:

$$\Delta_{\max \text{ доп}} = \gamma_{\text{прив}} X_{\text{норм}} / 100. \quad (1.6)$$

По характеру изменения погрешности средств измерений подразделяются на систематические, случайные и промахи.

**Систематическая погрешность** — составляющая погрешности средства измерений, принимаемая за постоянную или закономерную изменяющуюся. Систематическая погрешность данного СИ, как правило, будет отличаться от систематической погрешности другого СИ этого же типа, вследствие чего для группы однотипных СИ систематическая погрешность может иногда рассматриваться как случайная погрешность.

К систематическим погрешностям СИ относят методические, инструментальные, субъективные и другие погрешности, кото-



рые при проведении измерений необходимо учитывать и по возможности устранять.

**Случайная погрешность** — составляющая погрешности СИ, изменяющаяся случайным образом. Она приводит к неоднозначности показаний и обусловлена причинами, которые нельзя точно предсказать и учесть. Однако при проведении некоторого числа повторных опытов теория вероятности и математическая статистика позволяют уточнить результат измерения, т.е. найти значение измеряемой величины, более близкое к действительному значению, чем результат одного измерения.

**Промехи** — грубые погрешности, связанные с ошибками оператора или неучтенными внешними воздействиями. Их обычно исключают из результатов измерений.

По зависимости от значения измеряемой величины погрешности СИ подразделяются на аддитивные, не зависящие от значения входной величины  $X$ , и мультипликативные — пропорциональные  $X$ .

**Аддитивная погрешность**  $\Delta_{\text{адд}}$  не зависит от чувствительности прибора и является постоянной по величине для всех значений входной величины  $X$  в пределах диапазона измерений (рис. 1.1, а). Источники данной погрешности: трение в опорах, шумы, наводки, вибрации. Примерами аддитивной погрешности приборов являются погрешности нуля, погрешность дискретности (квантования) в цифровых приборах. От значения этой погрешности зависит наименьшее значение входной величины. Если прибору присуща только аддитивная погрешность или она существенно превышает другие составляющие, то предел допустимой основной погрешности нормируют в виде приведенной погрешности (1.5).

**Мультипликативная погрешность** зависит от чувствительности прибора и изменяется пропорционально текущему значению входной величины (рис. 1.1, б). Источником этой погрешности являются: погрешности регулировки отдельных элементов СИ (например, шунта и добавочного резистора), старение элементов, изменение их характеристик, влияние внешних факторов.

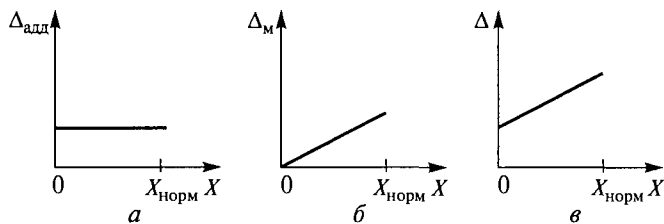


Рис. 1.1. Графики погрешностей измерительных приборов и преобразователей:

а — аддитивной; б — мультипликативной; в — суммарной

Если прибору присуща только мультипликативная погрешность или она существенна, то предел допускаемой относительной погрешности выражают в виде относительной погрешности (1.4). Класс точности таких СИ обозначают одним числом, помещенным в кружок и равным пределу допускаемой относительной погрешности, например счетчик электрической энергии класса 2,5.

Суммарная абсолютная погрешность (рис. 1.1, в) определяется по формуле

$$\Delta = \Delta_{\text{адд}} + \Delta_{\text{м}} = \gamma_{\text{адд}} X_{\text{норм}} + \gamma_{\text{м}} X, \quad (1.7)$$

где  $\gamma_{\text{адд}} = \Delta_{\text{адд}}/X_{\text{норм}}$  — приведенное значение аддитивной погрешности;  $\gamma_{\text{м}} = \Delta_{\text{м}}/X$  — относительное значение мультипликативной погрешности.

Тогда относительная суммарная погрешность определяется по формуле

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{отн}} = \frac{\Delta}{X} &= \gamma_{\text{адд}} \frac{X_{\text{норм}}}{X} + \gamma_{\text{м}} = \gamma_{\text{м}} + \gamma_{\text{адд}} + \\ &+ \gamma_{\text{адд}} \frac{X_{\text{норм}}}{X} - \gamma_{\text{адд}} = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{X_{\text{норм}}}{X} \right| - 1 \right) \right], \end{aligned} \quad (1.8)$$

где  $d = \gamma_{\text{адд}}$ ;  $c = \gamma_{\text{адд}} + \gamma_{\text{м}}$ .

Для средств измерений, у которых аддитивная и мультипликативная составляющие соизмеримы, предел относительной допускаемой основной погрешности выражается двухчленной формулой (1.8). Обозначение класса точности для них состоит из двух чисел, выражающих  $c$  и  $d$  в процентах и разделенных косой чертой ( $c/d$ ), например класс 0,02/0,01. Такое обозначение удобно, так как первый его член  $c$  равен относительной погрешности СИ в наиболее благоприятных условиях, когда  $X \approx X_{\text{норм}}$ . Второй член формулы (1.8) характеризует увеличение относительной погрешности измерения при уменьшении  $X$ , т.е. аддитивной составляющей погрешности. К этой группе СИ относятся цифровые мосты, компенсаторы с ручным и автоматическим уравниванием.

Аддитивная и мультипликативная погрешности имеют систематические и случайные составляющие.

Погрешность СИ также может быть нормирована к длине шкалы. В этом случае класс точности (1.5) обозначается одним числом в процентах, помещенным между двумя линиями, расположенными под углом, например:  $\sphericalangle^{0,5}$ . К ним относятся показывающие приборы с резко неравномерной шкалой (например, гиперболической или логарифмической). Конкретные ряды классов точности устанавливаются в стандартах на отдельные виды СИ.

В зависимости от влияния характера изменения измеряемой величины погрешности СИ подразделяются на статические и динамические.

**Статическая погрешность** — погрешность СИ, применяемого при измерении физической величины, принимаемой за неизменяемую.

**Динамическая погрешность** — погрешность СИ, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерений) физической величины, являющаяся следствием инерционных свойств СИ.

## 1.7. МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Всякая реальная система, материальный объект характеризуются бесконечным числом переменных. Когда мы описываем, характеризуем систему, то, исходя из своих предположений, делаем бесконечное число различных выборов из конечного числа переменных. Таким образом, фактически исследуем не подлинную систему, не подлинное физическое явление, а его модель, в определенном смысле подобную истинной системе.

**Модель** — система, которая не отличается от моделируемого объекта в отношении некоторых его свойств, именуемых «существенными», и отличается от него в отношении других свойств, называемых «несущественными».

В теории моделирования различают три принципиальных способа:

полное моделирование — способ, обеспечивающий подобие движения материи во времени и пространстве. Различие между объектом исследования и моделью количественное, масштабное;

неполное моделирование — способ, при котором протекание основных процессов, характеризующих изучаемое явление или процесс, подобно только частично;

приближенное моделирование — способ, применяемый наиболее часто, при котором некоторые факторы, влияющие на процесс, но не оказывающие на него решающего действия, либо вовсе не моделируются, либо моделируются приближенно, грубо.

Для проведения измерений необходимы объект измерения (измеряемая величина), средства и метод измерения, а также оператор. Кроме того, измерения выполняют в какой-либо среде и по определенным правилам. Принято объект измерения считать неизменным, т.е. всегда предполагается, что существует истинное (действительное) постоянное значение измеряемой величины. Остальные составляющие процесса измерений — средства, условия и даже оператор — все время меняются. Эти изменения могут быть случайными, их мы не в состоянии предвидеть, и не случайными, но такими, которые мы не смогли заранее предусмотреть, оценить и учесть. Если они влияют на результаты измерений, то при повторных измерениях одной и той же величины результаты

будут отличаться один от другого тем сильнее, чем больше факторов не учтено и чем сильнее они меняются. Всегда есть определенный предел числу явлений, влияющих на результат измерения, на его погрешность, которые принимаются в расчет.

При постановке измерительной задачи выделяют «существенные» свойства объекта измерения, конкретизируют рабочие условия, выделяют физическую величину, задают требуемую погрешность измерения и затем принимают модель объекта измерения. Моделью объекта измерения может служить приближенное описание взаимодействия всех «существенных» свойств объекта (алгоритм функционирования), математическое описание в виде формул, описывающих функциональную связь между входным и выходным сигналом и др. В общем случае она должна достаточно точно отображать взаимосвязь между определяемой величиной, характеристиками (свойствами) объекта и влияющими величинами. В большинстве практических измерительных задач используют математическую модель объекта измерения, представляющую собой совокупность математических зависимостей, которые описывают существенные свойства объекта измерения.

Для получения оценок качества измерения и выработки требования к измерительной аппаратуре используют различные модели измерительного процесса, но базовыми являются две из них: классическая (каноническая) и вероятностная.

*Каноническая модель измерительного процесса*, понимаемого как эксперимент, условия которого строго определены и соблюдаются, строилась в метрологии при следующих ограничениях:

- измеряемая физическая величина сохраняет неизменным на протяжении всего цикла измерения свое истинное значение, которое можно охарактеризовать одним действительным значением, лежащем внутри интервала остаточной неопределенности (доверительного интервала);

- время измерения не ограничено и сравнение с мерой может выполняться принципиально как угодно долго и тщательно;

- внешние условия и влияющие на результат факторы точно определены.

Но так как практические задачи измерительной техники отличаются от идеализированного метрологического эксперимента сравнения с мерой, а качество измерения оценивается с использованием теоретико-вероятностного подхода, то изменяется и сама модель измерительного процесса.

*Вероятностная модель измерительного процесса (или информационная модель)* принята при следующих ограничениях:

- измеряемая физическая величина рассматривается как случайный процесс, содержащий интересующую нас информацию о состоянии исследуемого объекта. Для ее описания используют случайную последовательность действительных значений

или же обобщенные характеристиками этой последовательности  $[m(x); D(x)]$ ; истинное (мгновенное) значение измеряемой величины может оставаться неопределенным на данном интервале процесса измерения;

- измерение в общем случае рассматривается как последовательность операций, время выполнения которых ограничено и конечно; непосредственное сравнение с мерой неосуществимо;

- характеристики измерительного устройства могут изменяться во времени и под влиянием внешних факторов, переменных по своей природе (эти изменения тоже рассматриваются как случайные процессы, влияющие на конечную неопределенность результата измерений).

Указанные выше основные свойства классической модели являются частным случаем вероятностной модели. Необходимость введения вероятностной модели измерительного процесса вызвана прежде всего задачей оценки качества измерения изменяющихся во времени величин (динамические измерения), которая не нашла удовлетворительного решения в рамках классической метрологии.

## 1.8. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

Природа и происхождение систематических погрешностей являются следствием определенных недостатков методики и средства измерения, ошибок экспериментатора, неполного учета всех особенностей измеряемой величины и условий эксперимента. Поэтому обнаружение и исключение систематических погрешностей во многом зависит от мастерства экспериментатора, от того, насколько глубоко он изучил конкретные условия проведения измерений и особенности применяемых им средств и методов.

По характеру изменения систематические погрешности разделяют на постоянные (сохраняющие величину и знак) и переменные (изменяющиеся по определенному закону).

*Постоянные систематические погрешности СИ* — это погрешности градуировки шкалы аналоговых приборов; погрешности, обусловленные неточностью подгонки шунтов, добавочных сопротивлений, температурными изменениями параметров элементов в приборах и др.

*Переменные систематические погрешности* — это погрешности, обусловленные нестабильностью напряжения источника питания, влиянием внешних магнитных полей и других влияющих величин.

По причинам возникновения их подразделяют на методические, инструментальные и субъективные.

*Методические погрешности* возникают вследствие несовершенства, неполноты теоретических обоснований принятого метода измерения, использования упрощающих предположений и допущений при выводе применяемых формул, из-за неправильного выбора измеряемых величин (неадекватно описывающих модели интересующих свойств объекта). Например, измерение температуры с помощью термопары может содержать методическую погрешность, вызванную нарушением температурного режима исследуемого объекта (вследствие внесения термопары).

Выявить источники и исключить методические погрешности — главное в технике эксперимента. Уровень решения этой задачи определяется метрологической подготовкой и искусством экспериментатора. В большинстве случаев методические погрешности носят систематический характер, а иногда и случайный, например, когда коэффициенты рабочих уравнений метода измерения зависят от условий измерения, изменяющихся случайным образом.

*Инструментальные погрешности* (инструментальные составляющие погрешности измерения) обуславливаются свойствами применяемых СИ (стабильностью, чувствительностью к внешним воздействиям и т.д.), их влиянием на объект измерений, технологией и качеством изготовления (например, неточность градуировки, конструктивные несовершенства, изменения характеристик прибора в процессе эксплуатации и т.д.). Эту погрешность в свою очередь подразделяют на основную и дополнительную.

*Субъективные погрешности* вызываются состоянием оператора, проводящего измерения, его положением во время работы, несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами средств измерений — все это сказывается на точности визирования. Субъективные погрешности также могут в некоторых случаях переходить в разряд случайных. Использование цифровых приборов и автоматических методов измерения позволяет исключить такого рода погрешности.

Для выявления и исключения систематических погрешностей применяют предварительное исключение возможных причин появления систематических погрешностей (использование исправных и поверенных мер и приборов, обоснованность выбора метода измерения, соблюдение условий эксперимента и т.д.), а также метод замещения и компенсации погрешности по знаку:

- метод замещения заключается в том, что измеряемая величина замещается известной величиной, получаемой при помощи регулируемой меры. Если такое замещение производится без каких-либо других изменений в экспериментальной установке и после замещения установлены те же показания приборов, то измеряемая величина равняется известной величине, значение которой отсчитывается по указателю регулируемой меры. Этот прием по-

позволяет исключить постоянные систематические погрешности. Погрешность измерения при использовании метода замещения определяется погрешностью меры и погрешностью, возникающей при отсчете значения величины, замещающей неизвестную;

- метод компенсации погрешности по знаку используется для исключения систематических погрешностей, которые в зависимости от условий измерения могут входить в результат измерения с тем или иным знаком (погрешность от термоЭДС, от влияния напряженности постоянного электрического или магнитного поля и др.). В этом случае эксперимент выполняется дважды так, чтобы погрешность входила в результаты измерений один раз с одним знаком, а другой раз — с обратным. Среднее значение из двух полученных результатов является окончательным результатом измерения, свободным от указанных выше систематических погрешностей.

Обнаружение причин и вида функциональной зависимости позволяет скомпенсировать систематическую погрешность введением в результат измерения соответствующих поправок. *Поправкой* называется значение величины, одноименной с измеряемой, которое нужно прибавить к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности. В некоторых случаях используют *поправочный множитель* — число, на которое умножают результат измерения для исключения систематической погрешности.

Поправка или поправочный множитель определяется при помощи поверки СИ, составления и использования соответствующих таблиц и графиков. Применяют также расчетные способы нахождения поправочных значений.

Однако вследствие неточности поправок, погрешности средств измерений величин, используемых для вычисления поправок, удастся скомпенсировать лишь только часть систематической погрешности, а не всю ее. Оставшуюся часть называют *неисключенным остатком систематической погрешности*. Она входит в результат измерения и искажает его и может быть оценена исходя из сведений о метрологических характеристиках использованных технических средств. Если таких сведений недостаточно, то ее можно оценить путем сравнения измеренных значений с аналогичными результатами, полученными в других лабораториях другими экспериментаторами.

При проведении автоматических измерений широко используют схемные методы коррекции систематических погрешностей, например, компенсационное включение преобразователей, различные цепи температурной и частотной коррекции и др.

Новые возможности появились в результате внедрения в измерительную технику средств, содержащих микропроцессорные системы. С помощью последних удастся исключать или корректиро-

вать многие виды систематических погрешностей, особенно инструментальные погрешности. Автоматическое введение поправок, связанных с неточностями градуировки, расчет и исключение дополнительных погрешностей, исключение погрешностей, обусловленных смещением нуля — эти и другие корректировки позволяют существенно повысить точность измерений.

## 1.9. СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Природа и физическая сущность случайных и систематических составляющих погрешности измерений различны. Однако практически во всех случаях при оценке как систематических (не исключенных остатков), так и случайных погрешностей, обрабатывают определенный статистический материал, представляющий собой совокупность результатов измерений, на основе комплекса определенных статистических правил. В общем случае рассмотрим эти погрешности как случайные величины. Природа «случайности» у них различна. Случайные погрешности в результатах измерений являются следствием многочисленных причин, например из-за физических процессов, происходящих в работающем приборе (трения, случайного дрейфа характеристик элементов, шумов), или случайных изменений условий измерения, учет которых практически неосуществим. «Случайность» оценок систематических погрешностей — результат незнания или технической невозможности (например, ограниченной точности средств аттестации методик измерения) идеального определения их истинных значений. Однако влияние случайных погрешностей на конечный результат измерений можно уменьшить увеличением числа измерений. Приведенные ниже вероятностно-статистические модели случайных величин справедливы как для случайных и неисключенных систематических составляющих, так и для суммарной погрешности измерений.

Теория погрешностей, использующая математический аппарат теории вероятностей, основывается на аналогии между появлением случайных результатов при многократно повторенных измерениях и случайных событий.

Из теории вероятности известно, что для описания случайных величин используют законы ее распределения.

**Закон распределения случайной величины** устанавливает соотношение между возможными значениями случайной величины  $X$  и соответствующими им вероятностями. Закон распределения может быть задан в виде таблиц, формул, графически. Он дает полную информацию о свойствах случайной величины, позволяет оценить ее значение и определить вероятность нахождения ее значения в заданных границах.



Для дискретных и непрерывных (рис 1.2, а) случайных величин на практике часто применяют закон распределения в виде интегральной функции распределения  $F(x)$ . Эта функция определяется вероятностью того, что случайная величина  $X_i$  в  $i$  опыте примет значение, меньшее некоторого значения  $x$ :

$$F(x) = P(X_i < x) = P(-\infty < X_i \leq x).$$

Интегральная функция распределения имеет следующие свойства — она неотрицательная, т.е.  $F(x) > 0$ ; неубывающая, т.е.  $F(x_2) > F(x_1)$ , если  $x_2 > x_1$ ; изменяется от 0 до 1, т.е.  $F(-\infty) = 0$ ,  $F(+\infty) = 1$ . Важным свойством, объясняющим универсальность и практическую применимость функции распределения, является то, что вероятность нахождения случайной величины  $X$  в интервале (включая нижнюю границу) от  $x_1$  до  $x_2$  равна разности функций распределения, т.е.

$$P(x_1 \leq X < x_2) = F(x_2) - F(x_1). \quad (1.9)$$

Для описания распределения непрерывных случайных величин часто пользуются первой производной функции распределения  $F'(x)$ , которую называют *плотностью распределения*. Это связано с тем, что производную функции распределения  $p(x) = F'(x) = dF(x)/dx$  статистически (экспериментально) значительно проще определить, чем саму функцию распределения.

Плотность вероятности  $P(x)$  (дифференциальная функция распределения) определяется как предел отношения вероятности того, что случайная величина  $X$  примет значение внутри бесконечно малого промежутка от  $x$  до  $x + dx$  к величине этого промежутка  $dx$ , когда  $dx \rightarrow 0$ :

$$P(x) = \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{P(x \leq X < x + dx)}{dx}. \quad (1.10)$$

Функция распределения выражается через плотность вероятности:

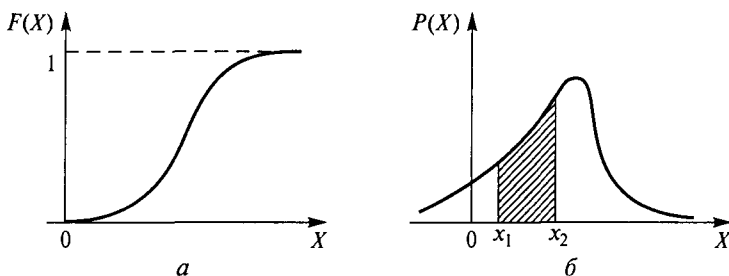


Рис. 1.2. Законы распределения непрерывной случайной величины:  
а — интегральный; б — дифференциальный

$$F(x) = P(X < x) = \int_{-\infty}^x P(X) dx$$

Вероятность попадания случайной величины в заданный интервал ( $X_1, X_2$ ) определяется как

$$P(X_1 < X < X_2) = F(X_2) - F(X_1) = \int_{X_1}^{X_2} P(X) dX.$$

Графически эта вероятность равна площади криволинейной трапеции, ограниченной кривой распределения, осью абсцисс и прямыми  $X = x_1$  и  $X = x_2$  (рис. 1.2, б).

Статистическое описание случайной величины законами распределения достаточно сложно. На практике ограничиваются числовыми характеристиками законов распределения случайной величины, которые характеризуют определенные свойства этих законов распределения. Среди числовых характеристик случайных величин математическое ожидание, мода и медиана являются характеристиками положения случайной величины на числовой оси.

**Математическое ожидание** случайной величины (ее среднее значение) определяется как сумма произведений всех возможных значений дискретной случайной величины  $X$  на вероятность этих значений  $P$ :

$$M[X] = \sum_{i=1}^{i=n} X_i P_i. \quad (1.11)$$

Для непрерывной случайной величины математическое ожидание

$$M[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} X P(X) dX, \quad (1.12)$$

где  $P(X)$  — плотность распределения вероятностей случайной величины  $X$ .

**Мода**  $M_0[X]$  — значение случайной величины  $X$ , имеющее у дискретной величины наибольшую вероятность, а у непрерывной — наибольшую плотность вероятности. Кривую распределения, имеющую один максимум, называют *одномодальной* (см. рис. 1.2, б), два максимума — *двухмодальной*, несколько одинаковых максимумов — *многомодальной*.

**Медиана**  $M_e[X]$  случайной величины  $X$  характеризует такое ее значение, для которого одинаково вероятно, окажется ли случайная величина меньше или больше  $M_e[X]$ . В случае симметричного модального распределения медиана совпадает с математическим ожиданием и модой.

Характеристиками рассеивания случайной величины являются дисперсия и среднеквадратичное отклонение.

**Дисперсия** случайной величины  $X$  — математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания. Для дискретной случайной величины дисперсия

$$D[X] = M \left[ \{X - M(X)\}^2 \right] = \sum_{i=1}^n \{X_i - M(X)\}^2 P_i, \quad (1.13)$$

для непрерывной случайной величины

$$D[X] = M \left[ \{X - M(X)\}^2 \right] = \int_{-\infty}^{+\infty} \{X_i - M(X)\}^2 P(X) dX. \quad (1.14)$$

**Среднеквадратичное отклонение** случайной величины — корень квадратный из дисперсии:

$$\sigma[X] = \sqrt{D(X)}. \quad (1.15)$$

Кроме рассмотренных характеристик положения и рассеивания случайных величин используют ряд вероятностных характеристик, каждая из которых описывает то или иное свойство распределения. К таким характеристикам относятся начальные и центральные моменты. Математическое ожидание случайной величины  $X$  есть ее первый начальный момент  $M[X] = \alpha_1$ , а дисперсия — второй центральный момент  $D[X] = \mu_2$ . Третий центральный момент  $\mu_3$  характеризует степень асимметрии (скошенности) кривой распределения относительно математического ожидания. Для удобства за характеристику асимметрии принимают безразмерную величину, называемую *коэффициентом асимметрии*

$$A_s = M \left[ (X - M(X))^3 \right] / (\sigma(X))^3.$$

При одномодальном распределении асимметрия положительна ( $A_s > 0$ ), если мода  $M_0[X]$  находится слева от среднего значения  $M[X]$ , и отрицательна ( $A_s < 0$ ), если мода  $M_0[X]$  находится справа от среднего значения  $M[X]$  (рис. 1.3). При симметричном распределении  $A_s = 0$  (рис. 1.4, а).

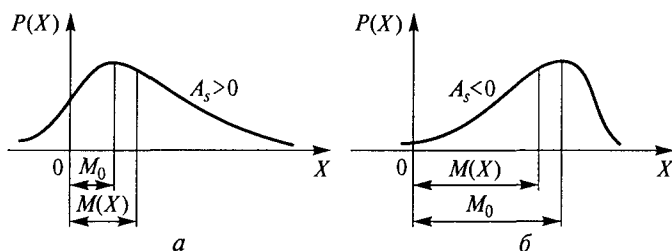


Рис. 1.3. Кривые плотности вероятности с положительными (а) и отрицательными (б) коэффициентами асимметрии

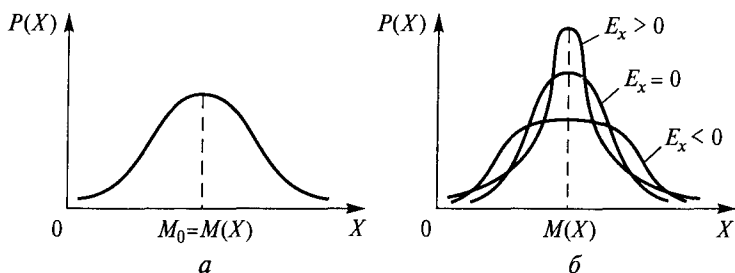


Рис. 1.4. Кривые плотности вероятности с различными коэффициентами эксцесса

Четвертый центральный момент  $\mu_4$  численно характеризует островершинность или плосковершинность кривой распределения и определяется безразмерной величиной  $E_x$ , называемой эксцессом:

$$E_x = M \left[ (X - M(X))^4 \right] / (\sigma(X))^4 - 3.$$

При симметричном одномодальном распределении эксцесс положителен ( $E_x > 0$ ), если кривая распределения островершинна, и отрицателен ( $E_x < 0$ ), если кривая плосковершинна. Эксцесс равен нулю ( $E_x = 0$ ) при нормальном распределении (рис. 1.4, б).

Используя эти три момента, можно построить теоретическую модель закона распределения.

Одним из наиболее часто употребляемых в метрологической практике теоретических законов распределения погрешностей измерения является нормальный закон распределения, обладающий свойствами симметрии и монотонного убывания плотности вероятности:

- равные по абсолютному значению, но противоположные по знаку погрешности встречаются одинаково часто (аксиома симметрии);
- малые погрешности встречаются чаще, чем большие; очень большие погрешности не встречаются.

Нормальное распределение центрированной случайной величины (погрешности) при  $M(\Delta) = 0$  является одномодальным и описывается выражением

$$P(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\Delta^2/2\sigma^2}. \quad (1.16)$$

Для нормального закона распределения вероятность нахождения погрешности между значениями  $X_1$  и  $X_2$  определяется разностью соответствующих значений функции распределения

$$P[X_1 < \Delta < X_2] = F(X_2) - F(X_1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(\Delta)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (1.17)$$

Графически эта вероятность представлена площадью под кривой, изображающей плотность вероятности между ординатами, соответствующими абсциссам  $X_1$  и  $X_2$ .

Графики плотности (1.16) нормального распределения погрешности при различных значениях  $\sigma$  приведены на рис. 1.5.

Как видно из рис. 1.5, чем меньше  $\sigma$ , тем круче кривая падает к оси  $\Delta$  и тем она острове́ршиннее ( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ ).

Нормальный закон реализуется в тех случаях, когда погрешность измерений обуславливается большим числом случайных факторов (более четырех), каждый из которых вносит свою приблизительно одинаковую с другими долю в общую погрешность. При этом законы распределения составляющих погрешностей могут быть самыми различными (равномерными, треугольными, трапециевидальными, экспоненциальными и др.).

Если  $x_1 = -\infty$ , а  $x_2 = +\infty$ , то вероятность, определенная по (1.17), обратится в единицу, что соответствует площади под кривой (см. рис. 1.2).

На практике для выполнения расчетов применяют нормированную функцию Лапласа, называемую также *интегралом вероятностей*

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2} dt = \int_0^t \varphi(t) dt, \quad (1.18)$$

где  $t = x/\sigma$ .

Тогда расчетную вероятность нахождения погрешности в заданных границах ( $X_1, X_2$ ) можно найти, используя табличные значения аргумента функции Лапласа:

$$P(x_1 < \Delta < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1), \quad (1.19)$$

где  $t_1 = x_1/\sigma$ ;  $t_2 = x_2/\sigma$ .

Формула (1.19) позволяет рассчитать границы интервала (доверительного интервала), в котором с определенной (доверительной) вероятностью находится результат измерения (рис. 1.6).

Основными точечными характеристиками погрешности измерений, которые оцениваются расчетным путем (до проведения измерений) по характеристикам используемых методов и средств измерений или по результатам измерений (после осуществления измерительного процесса), являются математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратич-

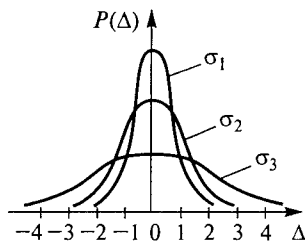


Рис. 1.5. Графики плотности нормального распределения погрешности при различных значениях  $\sigma$

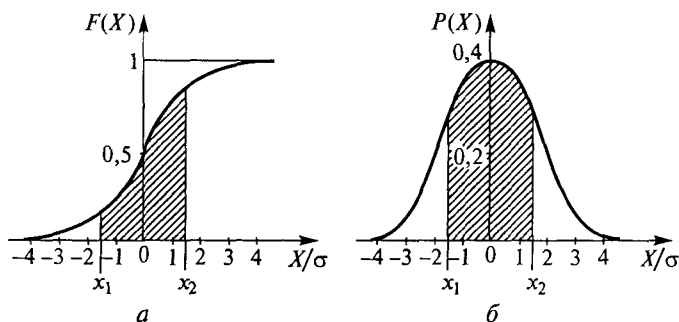


Рис. 1.6. Нормированные функции распределения:  
 а — интегральная; б — дифференциальная

ное отклонение. Оценкой математического ожидания (МО) случайной величины является *среднее арифметическое значение* (СКО) измеряемой величины

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (1.20)$$

Точечная оценка дисперсии

$$D[X] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2. \quad (1.21)$$

Для получения характеристики рассеивания результатов вокруг среднего арифметического значения в абсолютных единицах используют среднеквадратичное отклонение

$$\sigma[X] = \sqrt{D(X)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}. \quad (1.22)$$

Полученные оценки — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение являются случайными величинами, поэтому СКО  $\bar{X}$  используют для оценки разброса  $\bar{X}$ :

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_{\bar{X}}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}, \quad (1.23)$$

а СКО  $\sigma[X]$  — для оценки разброса  $\sigma[X]$ :

$$S_{\sigma} = S_{\bar{X}} \frac{\sqrt{E_x - 1}}{2\sqrt{n}}, \quad (1.24)$$

где  $E_x$  — численное значение эксцесса.

Точечные оценки, характеризующие параметры распределения в виде чисел, обычно используют при большом объеме выборки. С уменьшением объема выборки степень их достоверности уменьшается, поэтому переходят к интервальным оценкам, позволяющим определить интервал (доверительный), в котором с заданной вероятностью (доверительной) находится истинное значение оцениваемого параметра.

Вероятность того, что действительное значение измеряемой величины  $X$  находится внутри доверительного интервала ( $\bar{X} - x_2$ ,  $\bar{X} + x_1$ ), называется *надежностью  $\beta$  при заданной точности*.

В практике измерений применяют различные значения доверительной вероятности, например: 0,90; 0,95; 0,98; 0,99; 0,9973 и 0,999. Доверительный интервал и доверительную вероятность выбирают в зависимости от конкретных условий измерений. Так, например, при нормальном законе распределения случайных погрешностей со средеквадратичным отклонением  $\sigma$  часто пользуются доверительным интервалом от  $+3\sigma$  до  $-3\sigma$ , для которого доверительная вероятность (по статистическим таблицам значений функции Лапласа) равна 0,9973. Такая доверительная вероятность означает, что в среднем из 370 случайных погрешностей только одна погрешность по абсолютному значению будет больше  $3\sigma$ . Так как на практике число отдельных измерений редко превышает несколько десятков, появление даже одной случайной погрешности, большей  $3\sigma$ , маловероятное событие, наличие же двух подобных погрешностей почти невозможно. Это позволяет с достаточным основанием утверждать, что все возможные случайные погрешности измерения, распределенные по нормальному закону, практически не превышают по абсолютному значению  $3\sigma$  (правило «трех сигм»). В случае, если погрешность выходит за значение  $3\sigma$ , то его можно считать «промахом». Для определения «промаха» используют критерии «трех сигм» — Смирнова, Райта, Романовского, Шовенэ и др.

## 1.10. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

**Прямые многократные измерения.** Точно оценить действительное значение измеряемой величины можно лишь путем ее многократных измерений и соответствующей обработки их результатов. Правильно обработать полученные результаты наблюдений — значит получить наиболее точную оценку действительного значения измеряемой величины и доверительного интервала, в котором находится ее истинное значение. Обработка должна производиться в соответствии с ГОСТ 8.207 — 76 «ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Общие положения». В процессе обработки

результатов наблюдений необходимо последовательно решить следующие основные задачи:

- определить точечные и интегральные оценки закона распределения результатов измерений [по формулам (1.20) и (1.22)];
- исключить «промахи» (по одному из критериев);
- устранить систематические погрешности измерений (см. разд. 1.8);
- оценить закон распределения по статистическим критериям (используются критерии  $\chi_2$  — Пирсона, Колмогорова, составной);
- определить доверительные границы неисключенного остатка систематической составляющей [см. (1.26)], случайной составляющей [см. (1.19)] и общей погрешности результата измерения (см. разд. 1.11);
- записать результат измерения (см. разд. 1.13).

**Прямые однократные измерения.** Погрешность результата прямого однократного измерения зависит от многих факторов, но в первую очередь определяется, естественно, погрешностью используемых СИ. Поэтому в первом приближении погрешность результата измерения можно принять равной погрешности, которой в данной точке диапазона измерений характеризуется используемое СИ.

В общем случае задача оценки погрешности полученного результата обычно осуществляется на основе сведений о пределе допускаемой основной погрешности средства измерения  $\Delta_{СИ}$  (по нормативно-технической документации на используемые средства измерений) и известным значениям дополнительных погрешностей  $\Delta_{доп}$  от воздействия влияющих величин. Условно считают, что методические и субъективные погрешности при проведении измерения незначимы. Тогда максимальное значение суммарной погрешности результата измерения (без учета знака) можно найти суммированием составляющих по абсолютной величине:

$$\Delta_{\Sigma} = |\Delta_{СИ}| + \sum_{i=1}^m |\Delta_{доп}|. \quad (1.25)$$

Более реальную оценку погрешности можно получить статистическим сложением составляющих погрешности:

$$\Delta_{\Sigma} = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_i^2}, \quad (1.26)$$

где  $\Delta_i$  — граница  $i$ -й неисключенной составляющей систематической погрешности, включающая в себя погрешности средства, метода, дополнительные погрешности и др.;  $k$  — коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при  $P = 0,95$ , коэффициент  $k = 1,11$ );  $m$  — число неисключенных составляющих.



Результат измерения записывается по первой форме записи результатов согласно ГОСТ 8.011—72 «Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений»:

$$X_{\text{и}}; \Delta = \pm \Delta_{\Sigma}; P = 0,95,$$

где  $X_{\text{и}}$  — результат однократного измерения;  $\Delta_{\Sigma}$  — суммарная погрешность результата измерений;  $P$  — доверительная вероятность (при  $P = 0,95$  может не указываться).

При проведении измерений в нормальных условиях можно считать  $\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{си}}$ .

Методика обработки результатов прямых однократных измерений приведена в рекомендациях МИ 1552—86 «ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений».

**Неравноточные измерения.** В практике измерений имеют место также и неравноточные измерения, когда измерения одной и той же физической величины проводятся несколькими наблюдателями различной квалификации и опыта, на приборах разного класса точности или в течение нескольких дней. Полученные значения средних арифметических отдельных выборок отличаются друг от друга, поэтому при оценке результата измерения и его погрешности учитывается степень доверия к полученным выборочным средним в виде «веса», который устанавливается для каждой серии измерений пропорционально одному из параметров (вероятности, числу измерений, величине среднеквадратичного отклонения), либо методом экспертных оценок. Если установлено, что все выборки неравноточных измерений принадлежат одной генеральной совокупности, то определяют статистические параметры этой генеральной совокупности и устанавливают границы доверительной вероятности по распределению Стьюдента.

В практике измерений случается, что при нескольких сериях измерений некоторые из них оказываются менее надежными. В этом случае степень доверия оценивается весом данной серии измерений. Чем больше степень доверия к результату, тем больше число, выражающее вес. Среднее взвешенное значение измеряемой величины, наиболее близкое к истинному значению, составляет

$$\overline{X}_0 = \frac{\overline{X}_1 P_1^* + \overline{X}_2 P_2^* + \dots + \overline{X}_m P_m^*}{P_1^* + P_2^* + P_3^* + \dots + P_m^*}, \quad (1.27)$$

где  $\overline{X}_1, \overline{X}_2, \dots, \overline{X}_m$  — средние значения для отдельных групп измерений;  $P_1^*, P_2^*, \dots, P_m^*$  — их вес.

В основу вычисления обычно кладут среднеквадратичные погрешности. Веса соответственных групп измерений считают обратно пропорциональными их дисперсиям, т. е. используют зависимость  $P_1^* : P_2^* : P_3^* : P_m^* = 1/\sigma_1^2 : 1/\sigma_2^2 : 1/\sigma_3^2 : 1/\sigma_m^2$ .

Среднеквадратичная погрешность средневзвешенного значения  $S_0$  определяется по формуле

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m P_i^*}}, \quad (1.28)$$

где  $P_i^*$  — вес каждого результата измерений;  $m$  — число рядов измерений.

**Косвенные измерения.** При косвенных измерениях значение физической величины  $z$  определяется по функциональной зависимости ее с другими физическими величинами  $a_1, a_2, \dots, a_m$ :

$$z = f(a_1, a_2, \dots, a_m). \quad (1.29)$$

При этом погрешность оценки систематической  $\Delta_c$  и случайной  $\Delta$  величины  $z$  зависит не только от погрешностей результатов измерений  $a_1, a_2, \dots, a_m$ , но и от вида используемой функциональной зависимости (1.29).

Пусть каждая из величин  $a_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) измерена с систематической погрешностью  $\Delta_{c_j}$ . Необходимо оценить значение погрешности  $\Delta z$  результата косвенного измерения.

Рассматривая  $z$  как функцию  $m$  переменных  $a_j$ , запишем ее полный дифференциал:

$$dz = (\partial f / \partial a_1) da_1 + (\partial f / \partial a_2) da_2 + \dots + (\partial f / \partial a_m) da_m$$

или

$$dz = \sum_{j=1}^m (df / da_j) da_j.$$

Положив, что погрешности измерений достаточно малы, заменим дифференциалы соответствующими приращениями:

$$\Delta_c z = \sum_{j=1}^m (df / da_j) \Delta_c a_j. \quad (1.30)$$

Каждое слагаемое вида  $(\partial f / \partial a_j) \Delta a_j$  представляет собой частную погрешность результата косвенного измерения, вызванную погрешностью  $\Delta a_j$  определения величины  $a_j$ . Частные производные  $\partial f / \partial a_j$  называют коэффициентами влияния соответствующих погрешностей.

Оценим случайную погрешность результатов косвенных измерений. Пусть величины  $a_j$  измерены со случайными погрешностями  $\Delta a_j$ , имеющими нулевые математические ожидания  $M[\Delta a_j] = 0$  и дисперсии  $\sigma_j^2$ . Запишем выражения для математического ожидания  $M[\Delta]$  и дисперсии  $\sigma^2[\Delta]$  погрешности  $\Delta$ :

$$M \left[ \overset{\circ}{\Delta} \right] = \sum_{j=1}^m \left( \frac{df}{da_j} \right) M \left[ \overset{\circ}{\Delta} a_j \right] = 0;$$

$$\sigma^2 \left[ \overset{\circ}{\Delta} \right] = \sum_{j=1}^m \left( \frac{df}{da_j} \right)^2 \sigma_j^2 + 2 \sum_{k < j} \rho_{kj} \left| \frac{df}{da_k} \frac{df}{da_j} \right| \sigma_k \sigma_j,$$

где  $\rho_{kj}$  — коэффициент корреляции погрешностей  $\overset{\circ}{\Delta}_k$  и  $\overset{\circ}{\Delta}_j$ .

Если погрешности  $\overset{\circ}{\Delta}_k$  и  $\overset{\circ}{\Delta}_j$  некоррелированы, то  $\rho_{kj} = 0$  и

$$\sigma^2 \left[ \overset{\circ}{\Delta} \right] = \sum_{j=1}^m \left( \frac{df}{da_j} \right)^2 \sigma_j^2. \quad (1.31)$$

Таким образом, для оценки результата  $z$  косвенного измерения следует использовать формулу (1.29), а для оценки систематических и случайных погрешностей — соответственно (1.30) и (1.31).

Заметим, что в общем случае при нелинейной функции коэффициенты влияния  $df/da_j$ , присутствующие в этих формулах, в свою очередь являются функциями значений величин  $a_j$ . Коэффициенты влияния обычно оцениваются путем подстановки в выражения частных производных оценок  $a_j$ . Следовательно, вместо самих коэффициентов влияния получают лишь их оценки. Кроме того, иногда коэффициенты влияния определяют экспериментально. В том и другом случае они устанавливаются с некоторой погрешностью, что является еще одним источником погрешности при обработке результатов косвенных измерений.

Суммарную составляющую случайной погрешности косвенного измерения можно упростить, если пренебречь погрешностями, имеющими малые значения. Согласно критерию «ничтожной погрешности», если меньшая по значению случайная погрешность  $\sigma_2$  вдвое меньше по значению большей по значению  $\sigma_1$ , т.е.  $\sigma_2 < 0,3\sigma_1$ , то ею можно пренебречь.

## 1.11. СУММИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ

При измерениях может быть несколько источников как систематических, так и случайных погрешностей. Поэтому практически важным является вопрос о правилах нахождения суммарной погрешности измерения по известным значениям погрешностей составляющих ее частей. При суммировании составляющих неисключенной систематической погрешности их конкретные реализации можно рассматривать как случайные величины. Если известны границы  $\Delta_i$  составляющих неисключенной систематической погрешности, а распределение этих составляющих в пределах гра-

ниц равномерно, то граница неисключенной систематической погрешности результата измерения вычисляется по формуле (1.26).

При суммировании случайных погрешностей необходимо учитывать их корреляционные связи. Суммарную среднеквадратичную погрешность при двух составляющих можно вычислить по формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\rho\sigma_1\sigma_2}, \quad (1.32)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — среднеквадратичные погрешности отдельных составляющих;  $\rho$  — коэффициент корреляции.

Поскольку на практике трудно получить корректную оценку коэффициента  $\rho$ , приходится ограничиваться крайними случаями, т. е. считать, что либо  $\rho = 0$ , либо  $\rho = \pm 1$ . Тогда приведенная выше формула примет вид

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad \text{если } \rho = 0 \quad (1.33)$$

или

$$\sigma_{\Sigma} = |\sigma_1^2 \pm \sigma_2^2|, \quad \text{если } \rho = \pm 1. \quad (1.34)$$

Таким образом, при отсутствии корреляционной связи среднеквадратичные погрешности складываются геометрически, а в случае жесткой корреляционной зависимости — алгебраически. Этот вывод справедлив и для случая нескольких источников погрешностей. При суммировании независимых погрешностей различных составляющих надо пользоваться критерием «ничтожной погрешности», который позволит значительно упростить вычисления. Из этого критерия следует, что группа погрешностей отбрасывается, если их сумма меньше одной трети максимальной погрешности.

Правила нахождения границы погрешности результата измерения при одновременном наличии как неисключенных систематических, так и случайных погрешностей также регламентируются ГОСТ 8.207—76 и заключаются в следующем. Если  $\alpha_{н.с.}/\sigma_{\Sigma} < 0,8$ , то неисключенными систематическими погрешностями по сравнению со случайными пренебрегают и принимают, что граница погрешности результата

$$\Delta_{\Sigma} = \overset{\circ}{\Delta} = |t(n)| P_{\text{дов}} \sigma_{\Sigma}, \quad (1.35)$$

где  $|t(n)| P_{\text{дов}}$  — коэффициент Стьюдента, определяемый по таблицам.

Если  $\alpha_{н.с.}/\sigma_{\Sigma} > 8$ , то, наоборот, пренебрегают случайной погрешностью по сравнению с систематической и считают, что граница погрешности результата  $\Delta_{\Sigma} = \alpha_{н.с.}$ .

Если эти неравенства не выполняются, следует найти композицию распределения случайных и неисключенных систематичес-

ких погрешностей, рассматриваемых как случайные величины, вычислить значение среднеквадратичного отклонения и затем границы суммарной погрешности результата измерения при помощи приведенных в ГОСТ 8.207—76 эмпирических формул.

## 1.12. ФОРМЫ ЗАПИСИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результат измерения пригоден для дальнейшего использования лишь тогда, когда помимо измеренного значения физической величины в нем указывается и значение погрешности. Производственные измерения проводят обычно однократно, и точность полученного результата оценивают по нормируемым метрологическим характеристикам используемых средств измерения.

Вычисляться должны как абсолютные, так и относительные погрешности результата измерения, так как первая из них нужна для округления результата и его правильной записи, а вторая — для однозначной сравнительной характеристики его точности.

В общем случае суммарная погрешность измерения будет содержать систематическую и случайную составляющие:

$$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}. \quad (1.36)$$

Если не произведено разделение погрешностей на систематические и случайные, то результат измерения (в соответствии с ГОСТ 8.011—72 «Показатели точности и формы представления результатов измерений») записывают в виде  $x, \Delta$  от  $\Delta_{\text{ниж}}$  до  $\Delta_{\text{верх}}$ ,  $P$ , где  $x$  — результат измерения в единицах измеряемой величины;  $\Delta$ ,  $\Delta_{\text{ниж}} = \Delta_{\text{г.ниж}}$ ,  $\Delta_{\text{верх}} = \Delta_{\text{г.верх}}$  — соответственно погрешность измерения с нижней и верхней ее границами;  $P$  — вероятность.

Результаты многократных наблюдений, полученные при прямых измерениях физической величины, называются *равноточными (равнорассеянными)*, если они являются независимыми, одинаково распределенными случайными величинами. Измерения в этом случае проводятся одним наблюдателем в одинаковых условиях внешней среды и с помощью одного и того же средства измерения.

Точную оценку действительного значения измеряемой величины при равноточных измерениях можно получить лишь путем статистической обработки группы результатов измерений.

Конечный результат измерений согласно ГОСТ 8.011 — 72 представляется в одной из четырех форм:

- 1) интервалом, в котором с установленной вероятностью находится суммарная погрешность измерения;
- 2) интервалом, в котором с установленной вероятностью находится систематическая составляющая погрешности, стандарт-

ной аппроксимацией функции распределения случайной составляющей погрешности измерения и среднеквадратичным отклонением случайной составляющей погрешности измерения;

3) стандартными аппроксимациями функции распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения и их среднеквадратичными отклонениями;

4) функциями распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения.

Выбор формы представления результата измерения определяется назначением измерений и характером использования их результатов.

При записи результата измерения и погрешности младшие разряды числовых значений результата измерения и числовых значений погрешности должны быть одинаковыми.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям «метрология», «измерение», «физическая величина», «средство измерений».

2. Перечислите основные виды и методы измерений.

3. Сформулируйте основное отличие операций «измерения» от «контроля».

4. В чем основное отличие меры от эталона?

5. Приведите классификацию мер.

6. Эталоны каких физических величин вы знаете?

7. Что такое поправка?

8. В чем различие наблюдений от измерений?

9. Какие основные измерительные операции выполняются при измерении?

10. Какие унифицированные сигналы имеют измерительные преобразователи?

11. Что такое масштабирование?

12. В чем отличие прямых измерений от косвенных?

13. Приведите пример совокупных и совместных измерений.

14. Дайте определение метода измерений.

15. Сравните по точности известные методы измерений.

16. Приведите классификацию погрешностей измерений.

17. Приведите классификацию средств измерения.

18. В чем различие метрологических характеристик от неметрологических?

19. Перечислите основные метрологические характеристики.

20. В чем отличие метрологических характеристик от нормируемых метрологических?

21. Перечислите основные нормируемые метрологические характеристики.

22. Сформулируйте отличие чувствительности от порога чувствительности.

23. Как определяют цену деления шкалы прибора?

24. В чем отличие диапазона измерений от диапазона показаний?

25. Приведите классификацию погрешностей средств измерений.
26. Как обозначается класс точности для различных средств измерений?
27. Что характеризует класс точности прибора?
28. Перечислите классы точности электромеханических измерительных приборов.
29. Назовите причины появления систематических погрешностей.
30. Перечислите способы исключения систематических погрешностей.
31. Что такое неисключенный остаток систематической погрешности?
32. Перечислите числовые характеристики законов распределения.
33. Как рассчитывается систематическая и случайная погрешности косвенных измерений?
34. Сформулируйте закон суммирования погрешностей.
35. Как оценивается результат измерения по метрологическим характеристикам средств измерений?
36. Приведите формы записи однократных и многократных измерений.
37. Приведите пример неравноточных измерений.
38. Как оценивается результат неравноточных измерений?

# ГЛАВА 2

## СРЕДСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

### 2.1. МЕРЫ, МАСШТАБНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

**Меры.** По числу воспроизводимых размеров величины меры подразделяют:

- на однозначные меры, воспроизводящие физическую величину одного размера (например, гири 1 кг);
- многозначные меры, воспроизводящие физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины);
- набор мер — комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины);
- магазин мер — набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

К мерам электрических величин предъявляются общие требования: стабильность параметров меры во времени и высокая точность подгонки действительного значения меры к номинальному значению, минимальное значение остаточных (паразитных) параметров (например, минимальная индуктивность и емкость для мер сопротивления), малая зависимость значения меры от условий эксплуатации и возможность учета этого влияния и др.

**Масштабные преобразователи (МП).** Они относятся к группе измерительных преобразователей электрических величин в электрические и предназначены для изменения значения размера физической величины в заданное число раз без изменения рода величины. Различают пассивные и активные МП.

**Пассивные МП.** Такие МП строятся на пассивных элементах: резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности. Характерным для них является то, что мощность выходного сигнала всегда меньше мощности входного сигнала. К этой группе относятся шунты, резистивные, емкостные и индуктивные делители тока и напряжения, измерительные трансформаторы, позволяющие наряду с изменением размера величины осуществлять гальваническое разделение цепей.



Активные МП. Они позволяют не только изменить размер величины, но и увеличить мощность выходного сигнала. К ним относятся измерительные усилители и активные преобразователи тока. Рассмотрим некоторые из них.

*Измерительные трансформаторы тока и напряжения* предназначены для преобразования больших переменных токов и напряжений в меньшие, удобные для измерения обычными аналоговыми электромеханическими приборами, а также для разделения цепей измерительных приборов и цепей высокого напряжения.

Преимущество их применения в сравнении с делителями напряжения и шунтами — меньшее потребление мощности при измерении больших токов и напряжений, обеспечение безопасности для работы обслуживающего персонала.

Измерительные трансформаторы (ИТ) состоят из двух изолированных друг от друга обмоток, помещенных на ферромагнитный сердечник. Принцип действия ИТ совпадает с принципом действия трансформаторов. Во вторичную обмотку трансформаторов тока включаются амперметры, последовательные обмотки счетчиков, ваттметров, цепи релейной защиты и управления; во вторичную обмотку трансформаторов напряжения — вольтметры, параллельные цепи ваттметров, счетчиков и др.

Стационарные измерительные трансформаторы имеют следующие эксплуатационные характеристики: частота переменного тока 50 Гц; номинальное напряжение  $U_{1ном}$  (для трансформаторов напряжения) — от 0,38 до 750 кВ; вторичные напряжения  $U_{2ном}$  — 150; 100; 100 $\sqrt{3}$  В; номинальный первичный ток  $I_{1ном}$  трансформаторов тока — 1 А... 40 кА, номинальный вторичный ток  $I_{2ном}$  — чаще всего 5 А; номинальная нагрузка вторичной цепи — 2,5; 5; 10; 25; 30; 40; 60; 75; 100 Вт; классы точности трансформаторов тока — 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10,0; классы точности трансформаторов напряжения — 0,05; 0,01; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0.

*Измерительные усилители (ИУ)* используются для усиления сигналов постоянного и переменного токов. Существуют ИУ низкочастотные (20 Гц... 200 кГц) и высокочастотные (до 250 МГц). Они выполняются с нормированной погрешностью коэффициента передачи и позволяют измерять сигналы от 0,1 мВ и 0,3 мкА с погрешностью 0,1... 1 %.

*Электромеханические преобразователи* предназначены для преобразования электрической энергии в механическую энергию перемещения подвижной части относительно неподвижной. На основе таких преобразователей, которые называются «измерительными механизмами», строятся электромеханические измерительные приборы (ЭИП).

## 2.2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Электромеханические измерительные приборы отличаются простотой, дешевизной, высокой надежностью, разнообразием применения, относительно высокой точностью.

Любой ЭИП состоит из ряда функциональных преобразователей, каждый из которых решает свою элементарную задачу в цепи преобразований.

Так, самый простейший прибор прямого преобразования (вольтметр, амперметр) состоит из трех основных преобразователей: измерительной цепи (ИЦ), измерительного механизма (ИМ) и отсчетного устройства (ОУ) (рис. 2.1).

*Измерительная цепь* обеспечивает преобразование электрической измеряемой величины  $X$  в промежуточную электрическую величину  $Y$  (ток или напряжение), функционально связанную с измеряемой величиной и непосредственно воздействующую на измерительный механизм.

*Измерительный механизм* является электромеханическим преобразователем, осуществляющим преобразование электрической величины  $Y$  в наглядное аналоговое показание  $\alpha$ .

На магнитном воздействии электрического тока основаны: магнитоэлектрический, электромагнитный, индукционный, электродинамический и вибрационный ИМ; на тепловом воздействии электрического тока — биметаллический и тепловой ИМ. На взаимодействии заряженных электродов, находящихся под напряжением, основан принцип работы электростатического ИМ.

*Отсчетное устройство* состоит из указателя, жестко связанного с подвижной частью ИМ, и неподвижной шкалы. Указатели бывают стрелочные (механические) и световые. Шкала — совокупность отметок в виде штрихов, расположенных вдоль линии, по которым определяют числовое значение измеряемой величины. Шкалы градуируют в единицах измеряемой величины (именованная шкала), либо в делениях (неименованная шкала).

В общем случае на подвижную часть ИМ при ее движении воздействуют вращающий момент  $M_{вр}$ , моменты: противодействующий  $M_{пр}$  и успокоения  $M_{усп}$ .



Рис. 2.1. Структурная схема электромеханического измерительного прибора

*Вращающий момент* для ИМ, использующих силы электромагнитного поля,

$$M_{вр} = dW_m/d\alpha, \quad (2.1)$$

где  $dW_m$  — изменение запаса энергии магнитного поля;  $\alpha$  — угол отклонения подвижной части.

*Противодействующий момент* в электромеханических приборах необходим для создания соответствия измеряемой величины определенному углу отклонения подвижной части. В аналоговых электромеханических приборах противодействующий момент создается либо при помощи спиральных пружин (растяжек и подвесов), либо за счет энергии электромагнитного поля (в логомстрах). В случае, когда противодействующий момент создается спиральной пружинкой,

$$M_{пр} = W\alpha, \quad (2.2)$$

где  $W$  — удельный противодействующий момент, зависящий от геометрических размеров и материала пружины (растяжек).

*Момент успокоения* является моментом сил сопротивления движению, направлен всегда навстречу движению подвижной части ИМ и пропорционален угловой скорости отклонения:

$$M_{усп} = P (d\alpha/dt), \quad (2.3)$$

где  $P$  — коэффициент успокоения (демпфирования).

В ИМ наиболее часто применяют магнитоиндукционные и воздушные успокоители, а для создания очень большого успокоения — жидкостные успокоители.

Несмотря на большое разнообразие конструкций и типов приборов все они имеют ряд общих узлов и деталей. Такими деталями являются: корпус, шкала, указатель, устройства для установки и уравнивания подвижной части, создания противодействующего момента и успокоения, корректор и в высокочувствительных приборах — арретир.

**Магнитоэлектрические приборы.** Магнитоэлектрические приборы (МЭП) состоят из измерительной цепи, измерительного механизма и отсчетного устройства (см. рис. 2.1). Конструктивно измерительный механизм может быть выполнен либо с подвижным магнитом, либо с подвижной катушкой. На рис. 2.2 показана конструкция прибора с подвижной катушкой. Постоянный магнит 1, магнитопровод с полюсными наконечниками 2 и неподвижный сердечник 3 составляют магнитную систему механизма. В зазоре между полюсными наконечниками и сердечником создается сильное равномерное радиальное магнитное поле, в котором находится подвижная прямоугольная катушка 9, намотанная медным или алюминиевым проводом на алюминиевый каркас (при-

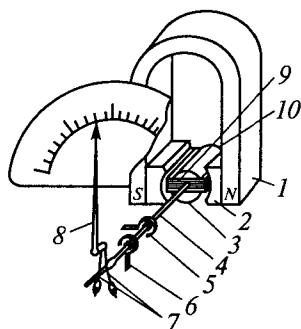


Рис. 2.2. Схема устройства магнитоэлектрического прибора:

1 — постоянный магнит; 2 — полюсные наконечники; 3 — неподвижный сердечник; 4, 10 — полуоси; 5, 6 — спиральные пружины; 7 — передвигающиеся грузики; 8 — стрелка; 9 — подвижная прямоугольная катушка

меняют и бескаркасные рамки). Катушка (рамка) может поворачиваться в зазоре на полюсах 4 и 10. Спиральные пружины 5 и 6 создают противодействующий момент и используются для подачи измеряемого тока от выходных зажимов прибора в рамку (механические и электрические соединения на рисунке не показаны). Рамка жестко соединена со стрелкой 8. Для балансировки подвижной части имеются передвигающиеся грузики 7.

Выражение для вращающего момента магнитоэлектрического прибора можно получить из (2.1). Запас электромагнитной энергии в контуре с током  $I$ , находящимся в поле постоянного магнита,

$$W_m = I\psi, \quad (2.4)$$

где  $\psi$  — полное потокосцепление данного контура с магнитным полем постоянного магнита.

Тогда

$$M_{вр} = Id\psi/d\alpha. \quad (2.5)$$

Полное изменение потокосцепления с рамкой через конструктивные параметры рамки

$$d\psi = BS\omega d\alpha,$$

где  $B$  — индукция в зазоре;  $S$  — площадь рамки;  $\omega$  — число витков рамки.

Если положить  $d\alpha = 1$  рад, то произведение  $BS\omega$  — величина постоянная для каждого данного прибора, равная изменению потокосцепления при повороте рамки на 1 рад. Обозначая его через  $\psi_0$ , запишем  $\psi_0 = BS\omega$  [Вб/рад]. Тогда

$$d\psi = \psi_0 d\alpha. \quad (2.6)$$

Подставляя (2.6) в (2.5), получим выражение вращающего момента для магнитоэлектрического механизма в следующем виде:

$$M_{вр} = I\psi_0. \quad (2.7)$$

Установившееся положение подвижной части ИМ наступает при равенстве вращающего и противодействующего моментов  $M_{вр} = M_{пр}$ , т.е. с учетом (2.2) запишем  $I\Psi_0 = W\alpha$ . Следовательно, функция преобразования для магнитоэлектрического ИМ имеет вид

$$\alpha = I\Psi_0/W \text{ или } \alpha = S_I I, \quad (2.8)$$

где  $S_I = \Psi_0/W$  — чувствительность измерительного механизма по току, рад/А.

Можно записать (2.8) через конструктивные параметры измерительного механизма:

$$\alpha = BS\omega I/W. \quad (2.9)$$

Из (2.9) следует, что угол отклонения подвижной части ИМ прямо пропорционален току в катушке, поэтому магнитоэлектрические приборы имеют равномерные шкалы.

В магнитоэлектрических приборах успокоение подвижной части магнитоиндукционное, т.е. создается взаимодействием магнитных полей от вихревых токов в каркасе катушки и поля постоянного магнита.

*Достоинства:* высокий класс точности — 0,05 и ниже, равномерная шкала, высокая и стабильная чувствительность, малое собственное потребление мощности, большой диапазон измерений, на показания МЭП не влияют внешние магнитные и электрические поля.

*Недостатки:* без преобразователей МЭП используют только в цепях постоянного тока, имеют малую нагрузочную способность, сложны и дороги, на их показания влияют колебания температуры.

*Применение:* магнитоэлектрические ИМ используют в амперметрах, вольтметрах, гальванометрах (обычных, баллистических и вибрационных) и омметрах.

**Амперметры.** Магнитоэлектрический ИМ, включенный в электрическую цепь последовательно с нагрузкой, позволяет измерять силу тока порядка 20...50 мА. Для расширения пределов измерения используют шунты (манганиновый резистор), сопротивление которых мало зависит от температуры. Сопротивление шунта  $R_{ш}$  меньше сопротивления прибора  $R_{пр}$  и выбирается из соотношения:

$$R_{ш} = R_{пр}/(n - 1), \quad (2.10)$$

где  $n = I/I_{пр}$  — коэффициент шунтирования по току;  $I$  — измеряемая сила тока;  $I_{пр}$  — допустимое значение силы тока рамки прибора.

**Вольтметры.** Магнитоэлектрический механизм, включенный параллельно нагрузке, может использоваться в качестве милливольтметра.

Для расширения пределов измерения по напряжению последовательно с ИМ включают добавочный резистор  $R_{доб}$ , сопротивление которого больше сопротивления  $R_{пр}$ :

$$R_{доб} = R_{пр}(m - 1), \quad (2.11)$$

где  $m = U/U_{пр}$  — коэффициент шунтирования по напряжению.

**Логометры.** Логометры — электромеханические приборы, измеряющие отношение двух электрических величин, обычно двух токов:  $\alpha = f(I_1/I_2)$ , что позволяет сделать их показания независимыми в известных пределах от напряжения источника питания. В логометрах вращающий и противодействующий моменты создаются электрическим путем и направлены навстречу друг другу. На рис. 2.3 приведена схема устройства магнитоэлектрического логометра.

В поле постоянного магнита помещена подвижная часть, состоящая из двух жестко закрепленных под определенным углом рамок. Особой формой полюсных наконечников и сердечника, находящегося между ними, искусственно создается в зазоре между ними неравномерное магнитное поле постоянного магнита. Токи к рамкам подводятся через безмоментные токоподводы, не создающие противодействующего момента. Направления токов в рамках логометра выбираются так, чтобы моменты  $M_{вр}$  и  $M_{пр}$  были направлены в разные стороны. Тогда в общем виде можно записать:

$$M_{вр} = I_1 f_1(\alpha); \quad M_{пр} = I_2 f_2(\alpha), \quad (2.12)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — токи в рамках;  $\alpha$  — угол отклонения подвижной части от некоторого условного нулевого положения.

Равновесие подвижной части наступает при равенстве моментов  $M_{вр}$  и  $M_{пр}$ , действующих на рамку, т.е. при условии  $I_1 f_1(\alpha) = I_2 f_2(\alpha)$ . Откуда

$$I_1/I_2 = f_2(\alpha)/f_1(\alpha) = f(\alpha) \text{ или } \alpha = F(I_1/I_2). \quad (2.13)$$

**Омметры.** Магнитоэлектрические логометры широко применяются в приборах для измерения сопротивления — омметрах и мегомметрах, в выпрямительных частотомерах и устройствах для измерения неэлектрических величин (температуры, давления, уровня жидкости и др.).

На рис. 2.4 приведены схемы магнитоэлектрических омметров с последовательным (см. рис. 2.4, а) и параллельным (см. рис. 2.4, б) включением измеряемого сопротивления. Последовательное включение  $r_x$  применяется при измерении средних и больших сопротивлений.

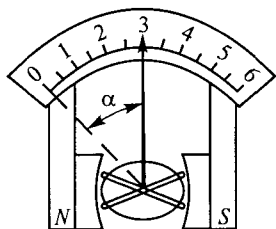


Рис. 2.3. Схема устройства магнитоэлектрического логометра

В первой схеме силы тока в катушках определяются по формулам

$$I_1 = E/(r_1 + r_0); I_2 = E/(r_2 + r_x),$$

где  $E$  — напряжение питания;  $r_1$  и  $r_2$  — сопротивления обмоток рамок;  $r_0$  — известное сопротивление;  $r_x$  — неизвестное сопротивление.

Тогда согласно (2.13) уравнение преобразования будет иметь вид

$$\alpha = F[(r_2 + r_x)/(r_1 + r_0)]. \quad (2.14)$$

Из (2.14) видно, что независимо от величины напряжения питания  $E$  и при постоянных  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_0$  отклонение подвижной части является однозначной функцией  $r_x$ , и шкала прибора может быть проградуирована в единицах сопротивления.

В приборах с параллельным включением  $r_x$  (см. рис. 2.4, б) при постоянном напряжении  $E$  сила тока  $I_1$  не зависит, а сила тока  $I_2$  зависит от  $r_x$ . Отношение токов, а следовательно, и угол  $\alpha$  не зависят от напряжения питания и являются однозначной функцией  $r_x$ , т. е. и здесь шкала может быть проградуирована в омах. Обе схемы обычно объединяют в одном приборе — омметре; переход от одной схемы к другой осуществляется с помощью переключателя.

Логометрические омметры — приборы невысокого класса точности (1,5; 2,5; 4,0). Погрешность омметра указывается в процентах от длины рабочей шкалы.

Аналогично рассмотренному принципу построения логометрического ИМ магнитоэлектрической системы выпускают логометры электромагнитной, электродинамической, ферродинамической и индукционной систем.

**Гальванометры постоянного тока.** На рис. 2.5 показана схема устройства магнитоэлектрического гальванометра постоянного тока.

Сильный постоянный магнит 2 из высококоэрцитивного сплава, полюсные наконечники 5 из магнитомягкой стали с цилиндрической расточкой концов и неподвижный стальной цилиндр 7, укрепленный в расточке, служат для создания в зазоре сильного равномерного магнитного поля. В этом зазоре находится рамка 4, укрепленная на подвесе 1, к которой через безмоментные токоподводы б подводится ток. На оси рамки закреплено зеркальце 3 для оптического отсчета угла отклонения рамки от нулевого положения.

На рамку при подаче тока  $I$  действуют моменты: вращающий  $M_{вр}$  (2.1), противодействующий  $M_{пр}$ , создаваемый при закручивании подвеса (2.2), и успокоения  $M_{усп}$  (2.3).

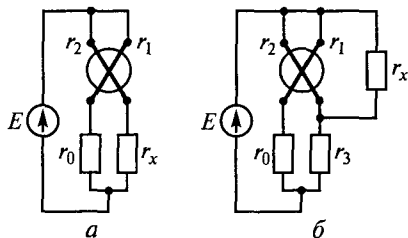


Рис. 2.4. Схемы устройства магнитоэлектрических омметров с логометрическим механизмом для измерения больших (а) и малых (б) сопротивлений:

$r_1$  и  $r_2$  — сопротивления обмоток рамок;  $r_0$  и  $r_3$  — известные сопротивления;  $r_x$  — неизвестное сопротивление

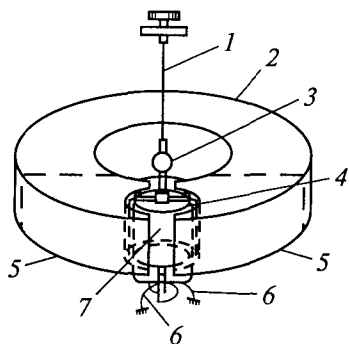


Рис. 2.5. Схема устройства магнитоэлектрического гальванометра:

1 — подвес; 2 — постоянный магнит; 3 — зеркальце; 4 — рамка; 5 — полюсные наконечники; 6 — безмоментные токоподводы; 7 — стальной цилиндр

Величина  $P = \psi_0 / (R_r + R_{вн})$  называется коэффициентом успокоения, который определяется конструктивными параметрами гальванометра —  $\psi_0$ ,  $R_r$ , а также сопротивлением внешней цепи  $R_{вн}$ . Изменяя  $R_{вн}$ , можно изменять коэффициент успокоения.

Известно, что движение вращающегося тела определяется уравнением

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \sum M,$$

где  $J$  — момент инерции тела;  $d^2\alpha/dt^2$  — угловое ускорение;  $\sum M$  — сумма вращающих моментов, действующих на тело.

Для гальванометра это уравнение имеет вид

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_{вр} + M_{пр} + M_{усп}. \quad (2.15)$$

Подставляя в (2.15) значения моментов с учетом их знака, получим дифференциальное уравнение движения подвижной рамки гальванометра:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = I\psi_0. \quad (2.16)$$

Интеграл этого дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами и с правой частью, как известно, состоит из двух членов:  $\alpha_c$  — частного решения при заданных условиях и  $\alpha_0$  — общего решения данного уравнения без правой части, т. е.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_0. \quad (2.17)$$

Частное решение уравнения (2.16), рассмотренное для случая установившегося равновесия подвижной части гальванометра с учетом (2.8), будет иметь вид

$$\alpha_c = S_1 I. \quad (2.18)$$

Для получения общего решения уравнения (2.16) запишем его в виде

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = 0. \quad (2.19)$$



Для (2.16) решением будет функция

$$\alpha_0 = C_1 e^{x_1 t} + C_2 e^{x_2 t}, \quad (2.20)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные интегрирования, получаемые из начальных условий;  $x_1$  и  $x_2$  — корни характеристического уравнения, записанного в виде

$$Jx^2 + Px + W = 0. \quad (2.21)$$

Определив значения корней  $x_1$  и  $x_2$  и подставив их в (2.19), а найденное значение  $\alpha_0$  в (2.17), получим уравнение движения подвижной части гальванометра

$$\alpha = f(t). \quad (2.22)$$

График функции (2.22) для различных значений сопротивления нагрузки приведен на рис. 2.6.

При  $R_{\text{вн}} = \infty$  колебания подвижной части гальванометра будут постепенно, хотя и медленно, затухать из-за трения подвижной рамки о воздух (кривая 1). Режим движения рамки для этого случая будет колебательным.

При  $R_{\text{кр}} < R_{\text{вн}} < \infty$  подвижная часть совершает затухающие колебательные движения около положения установившегося равновесия, определяемого углом  $\alpha_c$  (кривая 2).

При  $R_{\text{вн}} < R_{\text{кр}}$  режим движения рамки гальванометра будет аperiodическим (кривая 3).

При  $R_{\text{вн}} \approx R_{\text{кр}}$  подвижная часть приходит в режим устойчивого равновесия без колебаний и за минимальное время (кривая 4). Этот режим называется *критическим*. Величина критического сопротивления  $R_{\text{кр}}$  определяет возможность применения гальванометра и его всегда указывают на шкале прибора.

К метрологическим характеристикам относятся: чувствительность, период собственных колебаний, внешнее и полное критическое сопротивление.

*Применение:* гальванометры используют для измерения малых токов ( $10^{-5} \dots 10^{-12}$  А) и напряжений (до  $10^{-4}$  В) в качестве нуль-индикаторов.

**Электромагнитные измерительные приборы (ЭМИП).** В электромагнитных измерительных приборах для перемещения подвижной части используется энергия магнитного поля системы, состоящей из катушки с из-

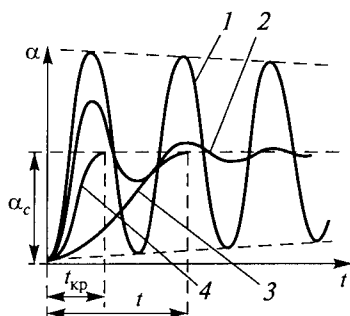


Рис. 2.6. Режимы движения подвижной части гальванометра:

1 — колебательный; 2 — установившегося равновесия; 3 — аperiodический; 4 — критический

меряемым током и одного или нескольких сердечников, выполненных из ферромагнитных материалов. Получили распространение три конструкции ЭМИП: с плоской катушкой; с круглой катушкой; с замкнутым магнитопроводом. В ЭМИП с плоской катушкой (рис. 2.7) сердечник 1 из пермаллоя под действием сил поля втягивается в узкий воздушный зазор катушки 5 с обмоткой из медного провода. Ось 3 сердечника 1 со стрелкой 6, спиральной пружиной 4 и подвижной частью успокоителя 2 крепится на опорах или растяжках. Успокоители в ЭМИП могут быть воздушные, жидкостные или магнитоиндукционные.

Энергия электромагнитного поля катушки с током  $I$  выражается формулой

$$W_m = I^2 L / 2. \quad (2.23)$$

Используя выражение (2.1), запишем

$$M_{вп} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (2.24)$$

Приравнявая вращающий и противодействующий моменты, получим

$$\alpha W = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (2.25)$$

Из (2.25) получим выражение для функции преобразования ЭМИП

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha}, \quad (2.26)$$

где  $W$  — удельный противодействующий момент пружины.

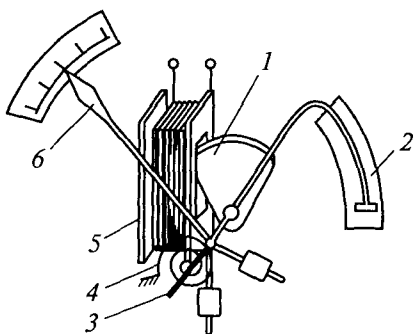


Рис. 2.7. Схема устройства электромагнитного прибора:

1 — сердечник; 2 — успокоитель; 3 — ось; 4 — спиральная пружина; 5 — катушка; 6 — стрелка сердечника

Из (2.26) видно, что шкала электромагнитного прибора квадратичная. Конструктивно добиваются равномерности шкалы, начиная с 1/5 части верхнего предела измерения.

*Достоинства:* простота конструкции и высокая надежность, хорошая перегрузочная способность, возможность работы в цепях постоянного и переменного токов, классы точности 1,0; 1,5; 2,5; частотный диапазон 45 Гц... 10 кГц; диапазон измерения по току 0,005... 300 А (при прямом включении) и до 20 000 А с измерительным трансформатором

тока (ИТТ); по напряжению 1,5... 60 В (при прямом включении) и до 6000 В с измерительным трансформатором напряжения (ИТН).

**Недостатки:** большое собственное потребление энергии, невысокая чувствительность, неравномерная шкала, влияние внешних магнитных и температурных полей, частоты питающего напряжения на показания ЭМИП.

**Применение:** электромагнитные приборы используют в качестве амперметров, вольтметров, фазометров, частотомеров, генериметров и фарадметров. Расширение пределов по току — секционирование и использование ИТТ, по напряжению — секционирование, применение добавочного резистора и ИТН.

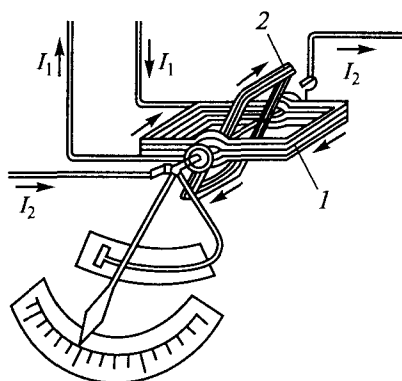


Рис. 2.8. Схема устройства электродинамического прибора:

1 — неподвижная катушка; 2 — подвижная катушка

**Электродинамические измерительные приборы (ЭДИП).** В таких приборах для перемещения подвижной части используется энергия системы, состоящей из подвижной и неподвижной катушек с токами. Неподвижная часть может иметь одну, чаще две катушки, соединенные между собой параллельно или последовательно, намотанные медным проводом, внутри которых располагается подвижная катушка, обычно бескаркасная. Для ее включения в цепь измеряемого тока используются пружинки или растяжки. Успокоение подвижной части — воздушное или магнитоиндукционное (рис. 2.8).

Внутри неподвижной катушки 1 вращается укрепленная на оси подвижная катушка 2. Ток к ней подводится по спиральным токоподводящим пружинам, служащим одновременно для создания противодействующего момента.

Электромагнитная энергия системы двух катушек с токами  $I_1$  и  $I_2$

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2,$$

где  $L_1$  и  $L_2$  — индуктивность неподвижной и подвижной катушек;  $M$  — взаимная индуктивность.

Индуктивности катушек  $L_1$  и  $L_2$  не зависят от положения в пространстве, поэтому первые два слагаемых равны нулю. Таким образом,

$$M_{вр} = \frac{dW_m}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}.$$

Приравнявая вращающий и противодействующий моменты, имеем

$$\alpha W = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}.$$

Откуда получаем уравнение преобразования ЭДИП в виде

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}.$$

Учитывая, что взаимная индуктивность  $M$  катушек зависит от расположения подвижной катушки относительно неподвижной, можно представить уравнение преобразования в общем виде:

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 f(\alpha). \quad (2.27)$$

Уравнение (2.27) действительно для случая работы ЭДИП на постоянном токе. На переменном токе показания ЭДИП зависят от произведения действующих значений токов  $I_1$  и  $I_2$  и от сдвига по фазе между этими токами:

$$\alpha = \frac{f(\alpha)}{W} I_1 I_2 \cos \Psi. \quad (2.28)$$

*Достоинства:* используются в цепях постоянного и переменного токов, классы точности 0,05; 0,1; 0,2. Диапазон измерений на постоянном токе 0,015... 10 А (прямое включение), на переменном токе 0,005... 200 А (прямое включение), до 600 А с ИТТ; измерения постоянного напряжения 1,5... 600 В (прямое включение), 7,5... 6000 В с  $R_{\text{доб}}$ , переменного до 30 000 В с ИТН; частотный диапазон до 40 кГц.

*Недостатки:* большое собственное потребление энергии, неравномерная шкала, невысокая чувствительность, малая перегрузочная способность, сложная конструкция и высокая стоимость, тряски и вибрации недопустимы. На показания этих приборов влияют внешние магнитные поля, температура и частота питающего напряжения.

*Применение:* электродинамические приборы используют в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров (для расширения пределов измерения применяют секционирование катушек, сопротивление  $R_{\text{доб}}$ , ИТТ и ИТН), частотомеров, фазометров (на принципе логометров).

**Ферродинамические измерительные приборы (ФДИ).** Эти приборы отличаются от ЭДИП тем, что неподвижная катушка в них расположена на сердечнике из ферромагнитного материала. Это приводит к значительному увеличению  $M_{\text{вр}}$  и уменьшению влияния внешних магнитных полей. Однако наличие магнитопровода снижает точность этих приборов из-за потерь на гистерезис и вихревые токи.

**Достоинства:** не бояться вибраций и тряски, внешние магнитные поля мало влияют на их показания, классы точности 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5. Успокоение подвижной части — воздушное и магнитоиндукционное.

**Недостатки:** на постоянном токе погрешность возрастает за счет потерь на гистерезис, сказывается влияние частоты питающего напряжения и температуры внешней среды, частотный диапазон 10 Гц... 1,5 кГц.

**Применение:** ферродинамические приборы в основном применяются в цепях переменного тока на промышленной частоте в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров; большая величина  $M_{вр}$  позволяет использовать их в самописцах, расширение пределов измерения осуществляется так же, как у электродинамических приборов.

**Электростатические измерительные приборы (ЭСИП).** В ЭСИП для перемещения подвижной части используется принцип взаимодействия двух или несколько электрически заряженных проводников, т.е. здесь в отличие от механизмов других систем перемещение подвижной части осуществляется за счет непосредственного приложенного напряжения. Таким образом, эти приборы по своему принципу действия являются приборами, измеряющими только напряжение. Конструктивно их можно представить в виде плоского конденсатора с подвижными и неподвижными электродами. Перемещение подвижной части связано с изменением емкости системы, которая может быть осуществлена либо изменением площади электродов, либо изменением расстояния между ними. На рис. 2.9 приведена схема устройства электростатического прибора. Подвижная алюминиевая пластина 1, закрепленная вместе со стрелкой на оси 3, может перемещаться, взаимодействуя с двумя электрически соединенными неподвижными пластинами 2. Входное напряжение подается на подвижную и неподвижную пластины. Под действием электростатических сил подвижная пластина втягивается между неподвижными пластинами.

Обобщенное выражение (2.1) для электростатического прибора имеет вид

$$M_{вр} = dW_э/d\alpha,$$

где  $W_э$  — изменение энергии электрического поля при изменении положения подвижной части на  $d\alpha$ .

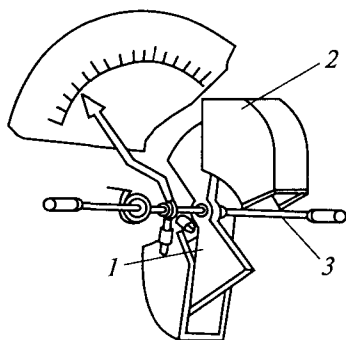


Рис. 2.9. Схема устройства электростатического прибора: 1 — подвижная алюминиевая пластина; 2 — неподвижная пластина; 3 — ось

Энергия поля заряженного конденсатора определяется уравнением

$$W_3 = \frac{1}{2} U^2 C,$$

поэтому

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha},$$

где  $C$  — емкость, образуемая между электродами электростатического прибора.

Приравнявая вращающий момент и противодействующий, получим

$$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (2.29)$$

Из выражения (2.29) видно, что шкала прибора квадратичная.

Конструктивно добиваются частичной линеаризации шкалы так, что рабочая часть начинается примерно с 1/5 части общей длины шкалы. Успокоение подвижной части — магнитоиндукционное или воздушное.

*Достоинства:* не потребляют энергии в цепях постоянного тока и имеют очень незначительное потребление в цепях переменного тока; классы точности: 0,05; 0,1; 1,0; 1,5; 2,5; частотный диапазон 20 Гц... 10 МГц, диапазон измерений постоянного напряжения 10 В ... 7500 кВ, переменного напряжения 30 В... 7500 кВ; независимость показаний от изменения температуры, частоты и формы кривой измеряемого напряжения, а также внешних магнитных полей.

*Недостатки:* низкая чувствительность, неравномерная шкала, сказывается влияние внешних электрических и электростатических полей.

*Применение:* в цепях постоянного и переменного токов в качестве вольтметров. Для расширения пределов измерения по напряжению используются резисторные и емкостные делители напряжения.

**Индукционные измерительные приборы (ИИП).** В ИИП особым расположением катушек получают вращающееся электромагнитное поле, которое, пронизывая алюминиевый цилиндр, индуцирует в нем вихревые токи, что вызывает возникновение вращающего момента. С помощью спиральных бестоковых пружин создается противодействующий момент и обеспечивается пропорциональность измеряемой величины отклонению подвижной системы.

Зависимость показаний ИИП от колебаний частоты тока возбуждения и температуры окружающей среды ограничивает применение этих приборов.

*Применение:* в самопишущих приборах, для построения указателя вращающегося поля, синхроскопа, частотомера и в счетчиках электрической энергии.

Упрощенная схема однофазного индукционного счетчика электрической энергии показана на рис. 2.10.

Механизм прибора состоит из двух неподвижных магнитопроводов: трехстержневого сердечника 1 с катушкой напряжения и П-образного сердечника 5 с двумя последовательно соединенными токовыми катушками, счетного механизма 2, алюминиевого диска 3, жестко укрепленного на оси, и постоянного магнита 4, служащего для создания тормозного момента.

Анализ работы индукционного счетчика показывает, что его вращающий момент пропорционален активной мощности переменного тока:

$$M_{\text{вр}} = K_1 UI \cos \varphi = K_1 P,$$

где  $K_1$  — коэффициент пропорциональности;  $\varphi$  — угол сдвига фаз между напряжением  $U$  и током  $I$ ;  $P$  — мощность.

Под влиянием  $M_{\text{вр}}$  диск счетчика начинает вращаться. На диск действует тормозной момент  $M_{\text{т}}$ , создаваемый постоянным магнитом, который упрощенно можно считать пропорциональным скорости вращения диска:

$$M_{\text{т}} = K_2 d\alpha/dt,$$

где  $K_2$  — постоянный коэффициент.

При неизменной активной мощности в цепи  $M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$ . Тогда

$$K_1 P = K_2 d\alpha/dt. \quad (2.30)$$

Выражение (2.30) можно представить в виде

$$K_1 P dt = K_2 d\alpha. \quad (2.31)$$

Интегрируя (2.31) по времени от  $t_1$  до  $t_2$ , получим

$$K_1 \int_{t_1}^{t_2} P dt = K_2 \int_{t_1}^{t_2} d\alpha.$$

Тогда  $K_1 W = K_2 2\pi N$ , где  $W$  — активная энергия, учтенная счетчиком за время от  $t_1$  до  $t_2$ ;  $N$  — число оборотов диска за время от  $t_1$  до  $t_2$ .

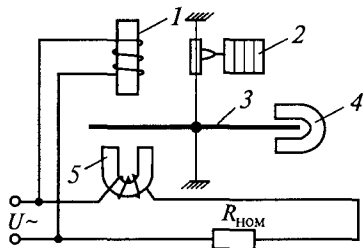


Рис. 2.10. Схема устройства однофазного индукционного счетчика:

1 — трехстержневой сердечник; 2 — счетный механизм; 3 — алюминиевый диск; 4 — постоянный магнит; 5 — П-образный сердечник

Следовательно,

$$W = K_2 2\pi N / K_1 = C_{\text{ном}} N,$$

где  $C_{\text{ном}} = 1/A$  — номинальная постоянная счетчика (количество энергии, учитываемой счетчиком за один оборот диска);  $A$  — передаточное число счетного механизма в виде числа оборотов, соответствующих единице энергии.

Количество электричества, реально прошедшее за один оборот диска, зависит от тока и характера нагрузки, внешних условий (например, от температуры и частоты), характеризуется действительной постоянной счетчика  $C_d$ , которая, как правило, не равна номинальной. Она определяется путем измерения действительно израсходованной энергии  $W_d$  за некоторое число оборотов диска  $N$  при помощи ваттметра и секундомера. В этом случае

$$W_d = Pt = C_d N,$$

где  $P$  — мощность, измеренная ваттметром;  $t$  — время.

Тогда

$$C_d = Pt/N.$$

Относительная погрешность счетчика, т.е. его класс точности (в %)

$$\gamma_{\text{отн}} = [(W - W_d)/W_d]100 = [(C_{\text{ном}} - C_d)/C_d]100. \quad (2.32)$$

Передаточное число счетчика  $A$  указывается на щитке счетчика. Значения  $A$  и  $C_{\text{ном}}$  зависят только от конструкции данного счетчика и являются величинами постоянными.

Важный параметр счетчика — *порог чувствительности*, под которым понимается минимальная нагрузка, выражаемая обычно в процентах от номинальной, при которой подвижная часть начинает безостановочно вращаться.

Наряду с этим счетчик не должен иметь самоход при разомкнутой токовой цепи и изменении напряжения в пределах  $220 \text{ В} \pm 10 \%$ .

Счетчики активной энергии выпускаются классов точности 0,5; 1,0; 2,0; 2,5. Порог чувствительности счетчика не должен превышать 0,4 % для счетчиков класса точности 0,5 и 0,5 % для счетчиков класса точности 1,0; 2,0; 2,5.

*Применение:* для измерения электрической энергии в однофазных и трехфазных цепях.

### 2.3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В соответствии с используемым преобразователем приборы называют выпрямительными, термоэлектрическими, электронными.



**Выпрямительные приборы.** Они представляют собой сочетание выпрямительного преобразователя и магнитоэлектрического ИП. В качестве преобразователей (выпрямителей) используются полупроводниковые выпрямители (диоды) на основе кремния или германия. В зависимости от числа применяемых диодов и схемы их включения осуществляется одно- и двухполупериодное выпрямление (преобразование) переменного тока. В цепи однополупериодного выпрямления (рис. 2.11, а) ток через измеритель (микроамперметр), включенный последовательно с диодом  $VD1$ , протекает только в положительный полупериод напряжения  $U(t)$ . В отрицательный полупериод ток протекает через диод  $VD2$ . Подвижная часть магнитоэлектрического микроамперметра из-за своей инерционности реагирует на среднее значение момента

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} m_t dt,$$

где  $m_t$  — мгновенное значение вращающего момента.

Используя выражение (2.7), определим

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} B_t S w i(t) dt = \frac{1}{2} B S w I_{\text{ср}},$$

где  $S$  — число витков.

Приравнявая  $M_{\text{вр}}$  к  $M_{\text{пр}}$ , получим выражение для функции преобразования прибора:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{B S w}{W} I_{\text{ср}}. \quad (2.33)$$

Шкалу прибора градуируют обычно в действующих значениях синусоидального тока  $I_d$ . Тогда выражение (2.33) принимает вид

$$\alpha = \frac{B S w}{W} \frac{I}{K_{\phi}} = 0,45 \frac{B S w I}{W}, \quad (2.34)$$

где  $K_{\phi} = I/I_{\text{ср}} = 1,11$  — коэффициент формы для синусоиды.

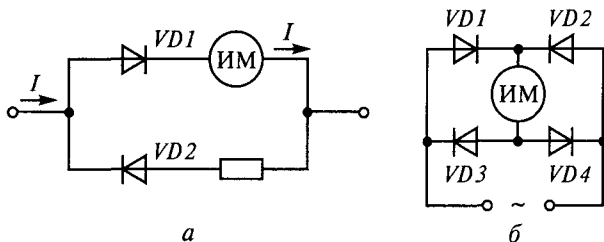


Рис. 2.11. Схемы включения прибора с однополупериодным (а) и двухполупериодным (б) выпрямителями

В цепи двухполупериодного выпрямления (рис. 2.11, б) ток  $I_{н}$  протекает через микроамперметр в одном и том же направлении оба полупериода:

$$M_{вр} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} m_t dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} B_t S w i(t) dt = B S w I_{ср}.$$

Для этого случая функция преобразования прибора

$$\alpha = 0,9 B S w I / W. \quad (2.35)$$

*Достоинства:* высокая чувствительность, малое собственное потребление мощности, широкий частотный диапазон — возможность работы без частотной компенсации на частотах до 2000 Гц, с частотной компенсацией — до 20 кГц.

*Недостатки:* зависимость показаний от формы кривой измеряемого напряжения, необходимость введения частотной и температурной компенсации, невысокая точность (1,0; 1,5; 2,5; 4) из-за нелинейности вольт-амперных характеристик диодов.

*Применение:* выпрямительные приборы широко используют в качестве комбинированных приборов для измерения постоянных и переменных токов, напряжения и сопротивления — ампервольт-омметры (авометры). Диапазон измерений по току — 0,2 мА... 6 А, по напряжению 0,2 мВ... 600 В.

**Термоэлектрические приборы.** Эти приборы представляют собой сочетание магнитоэлектрического механизма с отсчетным устройством и термоэлектрического преобразователя. Термоэлектрический преобразователь состоит из одной или нескольких термопар и нагревателя, по которому протекает измеряемый ток. Нагреватель обычно изготавливается из материала с большим удельным сопротивлением (нихром, константан, вольфрам) с допустимой температурой 600... 800 °С. Для термопары подбирают материалы, дающие в паре высокую термоЭДС, обладающие устойчивыми термоэлектрическими характеристиками (хромель — копель, медь — копель и др.).

Различают контактные термоэлектрические преобразователи, у которых горячий спай термопары 2 приварен к нагревателю 1 (рис. 2.12, а), и бесконтактные термоэлектрические преобразователи (рис. 2.12, б), у которых нагреватель 1 и горячий спай разделены изолятором 3 (каплей стекла), что уменьшает чувствительность и увеличивает инерционность преобразователя. Преимуществом бесконтактных преобразователей является изоляция цепи термопары от нагревателя и возможность создания термобатарей (рис. 2.12, в).

Под действием теплоты, выделяемой нагревателем, и при разности температур горячего и холодного спаев термопары возникает термоЭДС  $E$ , пропорциональная току  $I_x$ , протекающему по нагревателю, и измеряемая магнитоэлектрическим ИМ.

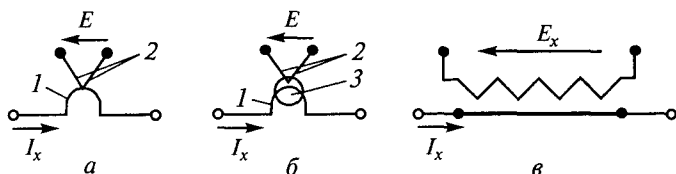


Рис. 2.12. Контактные (а), бесконтактные (б) термопреобразователи и термобатарея (в):

1 — нагреватель; 2 — термопара; 3 — изолятор

*Достоинства:* малое влияние частоты (и формы кривой) переменного тока; высокий частотный диапазон (10 Гц... 100 МГц); класс точности 0,5; 1,0 и ниже; диапазоны измерения по току 100 мА... 10 А, по напряжению 0,75... 50 В; низкое входное сопротивление (200... 300 Ом/В).

*Недостатки:* малая перегрузочная способность, зависимость показаний от температуры окружающей среды, низкая чувствительность, большое собственное потребление мощности, ограниченный срок работы, неравномерная шкала.

*Применение:* термоэлектрические приборы используются в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров.

## 2.4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОСТЫ И КОМПЕНСАТОРЫ

Измерение токов и напряжения приборами непосредственной оценки производится в лучшем случае с погрешностью 0,05 %. Более точное измерение этих величин возможно с помощью приборов сравнения — компенсаторов. В зависимости от вида измеряемого напряжения различают компенсаторы постоянного и переменного токов.

**Компенсаторы постоянного тока (КПТ).** Они используются для прямого измерения ЭДС и напряжений, а также косвенного измерения сопротивления, тока и мощности. Упрощенная принципиальная схема компенсатора с ручным управлением приведена на рис. 2.13.

На этой схеме можно выделить три контура: контур *I* нормального элемента, в который входят нормальный элемент  $E_N$ , образцовое сопротивление  $R_N$  и нуль-индикатор, в качестве которого используется гальванометр  $\Gamma$ ; контур *II* — рабочий, который содержит вспомогательный источник питания компенсатора  $E_K$  (до 2В), реостат для установки рабочего тока  $R_{\text{рег}}$ , магазин сопротивлений  $R_K$  и сопротивление  $R_N$ ; контур *III* — измерительный, состоит из источника измеряемого напряжения  $U_x$ , нуль-индикатора и магазина сопротивлений  $R_K$ .

У всех компенсаторов декады сопротивлений  $R_{\text{рег}}$ ,  $R_N$ ,  $R_K$  и переключатель  $\Pi$  находятся внутри корпуса прибора, ручки рычаж-

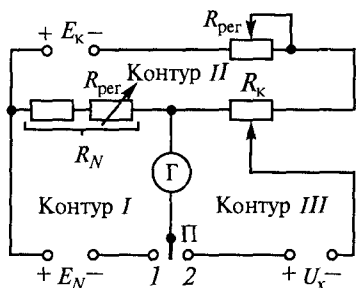


Рис. 2.13. Упрощенная принципиальная схема компенсатора постоянного тока

ют такое значение тока  $I_{\text{раб}}$  в цепи второго контура, при котором падение напряжения, создаваемое им на сопротивлении  $R_N$ , будет равно ЭДС нормального элемента  $E_N$ . При этом нуль-индикатор покажет отсутствие тока в цепи первого контура. Для этого случая

$$I_{\text{раб}} R_N = E_N. \quad (2.36)$$

Затем приступают к измерению напряжения  $U_x$ . Для этого переключатель П устанавливают в положение 2 и регулировкой сопротивления  $R_K$  добиваются компенсации напряжения  $U_x$  падением напряжения на участке  $r$  сопротивления  $R_K$  от тока  $I_{\text{раб}}$ . При этом нуль-индикатор покажет отсутствие тока в цепи третьего контура. С учетом выражения (2.36) можно записать

$$U_x = E_N r / R_N, \quad (2.37)$$

где  $r$  — значение участка сопротивления  $R_K$  при компенсации напряжения  $U_x$ .

Погрешность измерения напряжения компенсатором постоянного тока определяется в основном тремя факторами:

- погрешностью установки и поддержанием неизменным рабочего тока;
- погрешностью изготовления и подгонки образцового, компенсационного и регулируемого сопротивлений ( $R_N$ ,  $R_K$  и  $R_{\text{рег}}$ );
- чувствительностью нуль-индикатора.

Существует девять классов точности компенсаторов постоянного тока: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2.

Различают высокоомные компенсаторы (10...40 кОм с пределом измерения до 1,9 В) и низкоомные (10...1000 Ом с пределом измерения до 100 мВ). Для высокоомных компенсаторов в качестве нуль-индикатора используют гальванометры магнитоэлектрической системы с относительно большим критическим сопротивлением; для низкоомных — гальванометры с небольшим критическим сопротивлением.

ных переключателей декад  $R_{\text{рег}}$ ,  $R_K$  располагаются на панели прибора. Источник питания компенсатора  $E_K$ , нормальный элемент  $E_N$ , нуль-индикатор могут быть встроенными или подключаться снаружи к соответствующим зажимам. Измерение  $U_x$  осуществляется в два этапа. Сначала устанавливают ток  $I_{\text{раб}}$  в рабочей цепи, значение которого строго определено и неизменно для каждого типа компенсатора. Для этого переключатель П переводят в положение 1, и с помощью реостата  $R_{\text{рег}}$  устанавливают

Компенсаторы используют также для точных косвенных измерений токов и сопротивлений. Для измерения силы тока  $I_x$  в исследуемую цепь включается образцовый резистор, сопротивление  $R_0$  которого известно с большой точностью, и компенсатором измеряется падение напряжения  $U_x$  на этом сопротивлении:

$$I_x = U_x / R_0.$$

Для измерения сопротивления резистора  $R_x$  последовательно с ним в исследуемую цепь включается образцовый резистор  $R_0$ . Измерив падение напряжения  $U_0$  на сопротивлении  $R_0$  расчетным путем, находят значение тока в исследуемой цепи  $I = U_0 / R_0$ . Затем, измерив падение напряжения  $U_x$  на сопротивлении  $R_x$ , получают расчетное значение искомого резистора  $R_x = R_0 U_x / U_0$ .

**Компенсаторы переменного тока.** В таких компенсаторах для полного уравнивания двух напряжений на переменном токе необходимо выполнить четыре условия: равенство напряжений по модулю, противоположность их фаз, равенство частот, одинаковая форма кривых  $U_x$  и  $U_k$ .

Два первых условия обеспечивает конструкция компенсаторов. Третье условие выполняется при питании объекта измерения и компенсатора от одного источника. Четвертое условие осуществить практически невозможно, так как  $U_k$  всегда синусоидально, а  $U_x$  может быть любой формы и полной компенсации достичь не удастся, а уравнивается первая гармоника. В качестве индикатора равновесия на промышленной частоте применяют вибрационный (резонансный) гальванометр. На более высоких частотах — электронные нуль-индикаторы, на звуковых — телефоны, усилители с выпрямительными приборами на выходе.

По способу компенсации неизвестного напряжения компенсаторы переменного тока делятся на два вида:

- полярно-координатные — с отсчетом измеряемого напряжения в полярных координатах (регулируется модуль  $U_k$  и отдельно его фаза);
- прямоугольно-координатные — с отсчетом измеряемого напряжения в виде геометрической суммы двух взаимно-перпендикулярных составляющих.

Прямоугольно-координатный компенсатор (рис. 2.14) содержит два одинаковых реохорда —  $ab$  и  $cd$ , средние точки которых соединены электрически; воздушный трансформатор  $TV$  с взаимной индуктивностью обмоток  $M$ ; регулировочные реостаты  $R_{\text{рег}}$  и  $R_f$  для установки рабочих токов реохорд  $ab$  и  $cd$ ; амперметр  $A$  электродинамической системы класса 0,05 или 0,1; высокочувствительный нуль-индикатор НИ, например осциллографического типа.

По амперметру  $A$  реостатом  $R_{\text{рег}}$  устанавливают рабочий ток  $I_1$  реохорда  $ab$ . Под действием тока  $I_1$ , протекающего по первичной

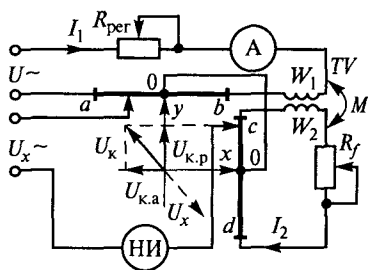


Рис. 2.14. Упрощенная принципиальная схема прямоугольно-координатного компенсатора

практически совпадает с фазой ЭДС  $E_2$ . Следовательно,

$$I_2 = j\omega MI_1 / (R_{cd} + R_f). \quad (2.38)$$

Множитель  $j$  в (2.38) означает, что ток  $I_2$  опережает ток  $I_1$  на  $90^\circ$ . Равенство по модулю токов  $|I_1|$  и  $|I_2|$  устанавливается резистором  $R_f$ :

$$I_2 = I_1 e^{j90^\circ}.$$

Реохорды  $ab$  и  $cd$  равны по сопротивлению и длине, токи реохордов равны по величине и сдвинуты на  $90^\circ$ , а так как средние точки реохордов соединены электрически, то разность потенциалов между ними равна нулю. Таким образом, образуется прямоугольно-координатная система напряжений  $U_y$  и  $U_x$  с одинаковыми масштабами по осям.

Попеременно перемещая движки реохордов, добиваются нулевого показания нуль-индикатора, что соответствует полной компенсации активной и реактивной составляющих измеряемого напряжения.

Значение активной составляющей компенсирующего напряжения определяется по положению движка на шкале реохорда  $ab$ , а реактивной составляющей — по шкале реохорда  $cd$ . Тогда измеряемое напряжение  $U_x$  и начальная фаза  $\varphi_x$  находятся как

$$U_x = U_{к.а}^2 + U_{к.р}^2, \quad \varphi_x = \arctg U_{к.р} / U_{к.а}.$$

Знак начальной фазы  $\varphi_x$  определяется в зависимости от квадранта, в котором находится вектор компенсирующего напряжения  $U_k$  в прямоугольной системе координат. Так как значение тока  $I_2$  зависит от частоты, то для его коррекции используется резистор  $R_f$ .

**Недостатки:** компенсаторы переменного тока уступают по точности компенсаторам постоянного тока.

**Автоматические компенсаторы постоянного тока.** Процесс уравнивания в таких компенсаторах производится автоматически.

Существуют компенсаторы с полным и неполным уравновешиванием. Промышленностью выпускаются автоматические компенсаторы, различающиеся габаритными размерами, видами записи, погрешностью, различным временем прохождения указателем всей шкалы.

Они применяются для измерения электрических и неэлектрических величин, которые могут быть предварительно преобразованы в напряжение или ЭДС постоянного тока. Применение автоматических компенсаторов постоянного тока существенно сокращает время измерений, но снижает их точность.

**Мостовые схемы.** Широкое применение мостовых схем объясняется высокой точностью измерений, большой чувствительностью и возможностью измерения различных параметров электрических цепей ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ), а также величин, функционально с ними связанных (частоты, фазового угла) и ряда неэлектрических величин (температуры, давления, перемещений, усилий и т. д.).

Наиболее точные измерения сопротивлений  $R$  постоянному току выполняются с помощью мостов постоянного тока. Эти мосты делятся на две группы: одинарные (четырёхплечие) и двойные (шестиплечие).

Одинарный мост, называемый *мостом Уитсона*, применяют для измерения сопротивлений от 1 Ом до 100 МОм; двойной мост, называемый *мостом Томпсона*, — для измерения малых величин сопротивлений — от 1 Ом и менее. В двойном мосте влияние величин, вызывающих погрешность измерения, сведено к минимуму.

Одинарный мост (рис. 2.15) состоит из четырех плеч:  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$  и  $da$ . Три известных регулируемых сопротивления  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  вместе с измеряемым сопротивлением  $R_1 = R_x$  образуют замкнутый четырехполюсник  $abcd$ .

В измерительную диагональ моста  $bd$  включен указатель равновесия  $\Gamma$ , в качестве которого используется магнитоэлектрический гальванометр. В диагональ питания моста  $ac$  включается источник постоянного тока — аккумуляторная батарея или сухой элемент. Подбором значений сопротивлений  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  добиваются отсутствия тока через гальванометр (потенциалы точек  $b$  и  $d$  равны) и, следовательно,  $I_x R_x = I_4 R_4$ ;  $I_2 R_2 = I_3 R_3$ .

Поскольку в момент равновесия моста ток через гальванометр не протекает ( $I_\Gamma = 0$ ), то  $I_x = I_2$  и  $I_3 = I_4$ . Тогда правомерно записать  $R_x/R_2 = R_4/R_3$  или  $R_x R_3 = R_2 R_4$ , откуда сопротивление

$$R_x = R_2 R_4 / R_3. \quad (2.39)$$

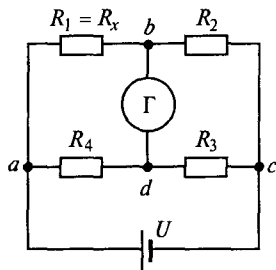


Рис. 2.15. Схема одинарного моста постоянного тока

Сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  — известные фиксированные сопротивления в диапазоне 1...1000 Ом. При этом отношение  $R_2/R_3 = = 10^{-3} \dots 10^3$ . Регулировкой сопротивления  $R_4$  уравнивают мост. Погрешности измерения с помощью мостов постоянного тока зависят от диапазона измеряемых сопротивлений, наименьшие погрешности получают в диапазоне 100 Ом ... 100 кОм. По мере увеличения измеряемого сопротивления уменьшается чувствительность мостов, а при измерении больших сопротивлений сказывается влияние сопротивления изоляции.

Нижний предел измеряемых сопротивлений ограничен тем, что при измерении малых сопротивлений сказывается влияние сопротивления монтажных проводов и переходных контактов. Эти погрешности исключаются в двойном мосте (рис. 2.16), в котором используются резисторы  $R_3$  и  $R_4$ , чтобы исключить влияние сопротивления соединительного проводника. Мост называется двойным, так как он содержит два комплекта плеч отношения.

При равновесии моста сопротивление  $R_x$  определяется выражением

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} + \frac{rR_4}{r + R_3 + R_4} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right). \quad (2.40)$$

На практике значения  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  выбирают такими, чтобы выполнялось соотношение

$$R_1/R_2 = R_3/R_4. \quad (2.41)$$

При этих условиях вторым членом (2.40) можно пренебречь. Чтобы проверить выполнение условия (2.41), мост уравнивается, а затем проводник  $r$  убирается, что не должно влиять на равновесие моста. Следовательно, двойной мост компенсирует малое сопротивление  $r$ .

На практике для исключения влияния соединительных проводов сопротивление резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  выбирают более 10 Ом, а сопротивления  $R_x$  и  $R_0$  имеют токовые и потенциальные зажимы и примерно один порядок величины. Чтобы исключить влияние термоЭДС, берут два отсчета при разных полярностях батареи, а затем усредняют результат.

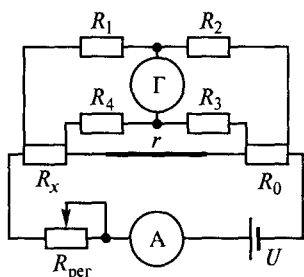


Рис. 2.16. Схема двойного моста постоянного тока

В качестве нуль-индикаторов в мостах постоянного тока применяют высокочувствительные гальванометры или электронные устройства.

Двойной мост обеспечивает погрешность менее 0,05 % для сопротивлений в диапазоне  $10^{-6} \dots 1$  Ом.



**Мосты переменного тока.** Измерения сопротивления, индуктивности и емкости выполняются одинарными мостами на переменном токе (рис. 2.17).

Четыре плеча  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$  и  $da$  моста тока образуются четырьмя комплексными сопротивлениями  $Z_1 = Z_x$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  и  $Z_4$ . В одну диагональ моста включается источник питания переменного тока, в другую — нулевой индикатор НИ. При равновесии моста ток в измерительной диагонали равен нулю и, следовательно,

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4. \quad (2.42)$$

Представив комплексное сопротивление  $Z$  в (2.42) в алгебраической форме, получим

$$(R_1 + jX_1)(R_3 + jX_3) = (R_2 + jX_2)(R_4 + jX_4),$$

откуда

$$\begin{cases} R_1 R_3 - X_1 X_3 = R_2 R_4 - X_2 X_4; \\ R_1 X_3 - R_3 X_1 = R_3 X_4 - R_4 X_2, \end{cases} \quad (2.43)$$

где  $R_i$  и  $X_i$  — активные и реактивные составляющие сопротивления  $Z$ .

Записав (2.42) в показательной форме, получим равенство

$$z_1 z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = z_2 z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}, \quad (2.44)$$

где  $z_i$  — модуль  $i$ -го сопротивления;  $\varphi_i = \arctg X_i/R_i$  — фазовый угол  $i$ -го сопротивления.

Равенство (2.44) равносильно двум равенствам:

$$\begin{cases} z_1 z_3 = z_2 z_4; \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \end{cases} \quad (2.45)$$

Из (2.45) следует, что для уравнивания моста с комплексными сопротивлениями необходима регулировка активной и реактивной составляющих. Равенство фаз (2.45) указывает, какими по характеру должны быть сопротивления плеч моста для обеспечения равновесия мостовой схемы. Например, если сопротивления плеч  $Z_1 = R_1$ ,  $Z_3 = R_3$ , т.е. носят чисто активный характер, то  $\varphi_1 = \varphi_3 = 0$ . Тогда из (2.45) следует

$$\varphi_2 + \varphi_4 = 0 \text{ или } \varphi_2 = -\varphi_4, \quad (2.46)$$

это означает, что если сопротивление  $Z_2$  индуктивного характера, т.е.  $Z_2 = R_2 + jX_2$ , то сопротивление  $Z_4$  должно носить емкостный характер, т.е.  $Z_4 = R_4 - jX_4$  (рис. 2.18, а).

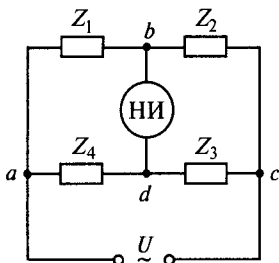


Рис. 2.17. Схема одинарного моста переменного тока

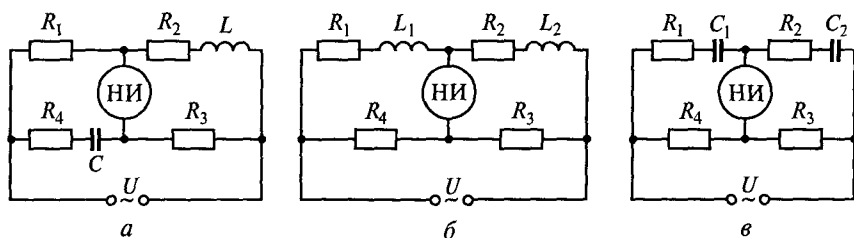


Рис. 2.18. Схемы мостов с реактивными сопротивлениями: в противоположных (а) и смежных (б, в) плечах

Аналогично получим схемы сравнения между собой реактивных сопротивлений, содержащих индуктивности (рис. 2.18, б) и емкости (рис. 2.18, в).

Правильный выбор регулируемых элементов моста и питание моста напряжением повышенной частоты (1000 Гц и выше) обеспечивает быстрое равновесие моста или его хорошую сходимость.

*Сходимость мостов* — это возможность достижения состояния равновесия определенным числом переходов от регулировки одного параметра к регулировке другого. Хорошая сходимость означает малое число операций и, следовательно, сокращение времени измерения.

Мосты переменного тока можно разделить на две группы:

1. Частотно-независимые, уравновешенные при одной частоте, сохраняющие равновесие при изменении частоты источника питания.

2. Частотно-зависимые, характеризующиеся тем, что в условии равновесия, помимо  $C$ ,  $L$ ,  $R$ , имеется частота, входящая в выражение реактивных составляющих сопротивлений.

Погрешность мостов переменного тока складывается из следующих составляющих: погрешности выполнения отдельных элементов мостовой схемы, погрешности подгонки элементов, погрешности от неполного учета активной и реактивной составляющих сопротивлений плеч моста, погрешности отсчетного устройства. Чем выше частота питания схемы моста, тем в большей степени проявляются эти погрешности. Для их уменьшения мост переменного тока питают от сети переменного тока через разделительный трансформатор, заземляют для уменьшения влияния паразитных емкостей и токов утечек, уменьшают влияние сопротивления соединительных проводов.

Существуют четыре класса точности мостов переменного тока: 0,05; 0,02; 0,1; 0,2. Нулевым индикатором на низкой частоте в них служит вибрационный гальванометр. При частоте 1000 Гц и выше питание осуществляется от звуковых генераторов, в качестве индикатора равновесия используются электронные нулевые индикаторы.

Универсальные мосты обеспечивают измерение значений величин в широких пределах.

## 2.5. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Электронные приборы можно разделить на две большие группы: аналоговые электронные измерительные приборы со стрелочным отсчетом и приборы дискретного типа с цифровым отсчетом.

В зависимости от характера измерений и вида измеряемых величин, их также подразделяют на группы:

**В** — приборы для измерения напряжений: В1 — калибраторы; В2 — вольтметры постоянного тока; В3 — вольтметры переменного тока; В4 — вольтметры импульсного тока; В6 — вольтметры селективные; В7 — вольтметры универсальные;

**Г** — измерительные усилители и генераторы: Г3 — генераторы гармонических колебаний низкочастотные; Г4 — генераторы гармонических колебаний высокочастотные; Г5 — генераторы импульсные; Г6 — генераторы функциональные;

**Е** — приборы для измерения распределенных параметров электрических цепей;

**С** — приборы для наблюдения за формой сигналов и ее исследования;

**Ч** — частотомеры;

**Ф** — измерители фазового сдвига и т. д.

*Достоинства:* электронные приборы при сравнении их с электромеханическими обладают значительным быстродействием, широким частотным диапазоном (20 Гц... 1000 МГц) и диапазоном измеряемых величин, высокой чувствительностью, хорошей перегрузочной способностью.

**Аналоговые электронные измерительные приборы** состоят из электронной части, предназначенной для преобразования, выпрямления, усиления электрической величины, и измерительного механизма магнитоэлектрической системы, а в осциллографах — электронно-лучевой трубки. Эти приборы используют в качестве вольтметров, частотомеров, осциллографов, измерителей сопротивления, емкости, индуктивности, параметров транзисторов, интегральных схем и др.

Электронные вольтметры (ЭВ) составляют наиболее обширную группу электронных приборов. Основное их назначение — измерение напряжения в цепях постоянного, переменного тока в широком диапазоне частот.

Электронные вольтметры можно классифицировать по следующим признакам:

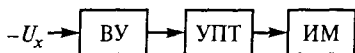


Рис. 2.19. Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока

по способу измерения — приборы непосредственной оценки и приборы сравнения;

значению — приборы постоянного, переменного, импульсного напряжений, универсальные

(постоянного и переменного напряжений) и селективные (с частотно-избирательными свойствами);

характеру измеряемого напряжения — амплитудные (пиковые), действующего и среднего значений;

частотному диапазону — низкочастотные и высокочастотные.

**Электронные вольтметры постоянного тока.** Структурная схема ЭВ (рис. 2.19) состоит из: делителя входного напряжения, усилителя постоянного тока, магнитоэлектрического измерительного механизма.

Измеряемое напряжение постоянного тока поступает на входное устройство ВУ, представляющее собой многопредельный высокоомный резисторный делитель напряжения. Сигнал с ВУ поступает на вход усилителя постоянного тока УПТ, который помимо функций усиления сигнала по напряжению и мощности, согласует высокое выходное сопротивление ВУ с малым сопротивлением рамки измерительного механизма ИМ магнитоэлектрической системы. Функция преобразования такого вольтметра

$$\alpha = K_{\text{ВУ}} K_{\text{УПТ}} S_{\text{ИУ}} = K_{\text{V}} U_x, \quad (2.47)$$

где  $K_{\text{ВУ}}$ ,  $K_{\text{УПТ}}$ ,  $K_{\text{V}}$  — коэффициенты преобразования ВУ, УПТ и электронного вольтметра соответственно;  $S_{\text{ИУ}}$  — чувствительность ИМ по напряжению.

Входное сопротивление электронных вольтметров составляет десятки мегаом, что практически исключает их влияние на объект измерения.

При измерении малых напряжений начинает сказываться дрейф нуля УПТ, поэтому в электронных микровольтметрах исключают УПТ, постоянный ток преобразовывают с помощью модулятора в переменный и используют усилитель переменного напряжения.

*Технические характеристики:* диапазон измеряемых напряжений для вольтметров: 10 мВ... 1000 В и для микровольтметров  $10^{-8}$ ... 1 В. Классы точности: 1,5; 2,5. Шкала — линейная.

**Электронные вольтметры переменного тока.** Структурная схема, приведенная на рис. 2.20, а, используется в вольтметрах для измерения напряжений значительного уровня. Измеряемое напряжение, после прохождения входного устройства ВУ, преобразуется детектором Д в напряжение постоянного тока, которое усиливается УПТ и поступает на измерительный механизм ИМ магнитоэлектрической системы. Частотные характеристики таких вольт-

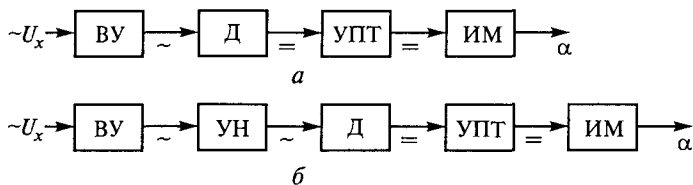


Рис. 2.20. Упрощенные структурные схемы приборов:

*а* — электронного вольтметра; *б* — электронного милливольтметра

метров определяются только входным устройством и детектором и составляют 10 Гц... 1 ГГц. Диапазон измеряемых напряжений начинается с 0,1 В и выше.

Другая структурная схема (рис. 2.20, *б*) применяется в милливольтметрах, поскольку обладает большей чувствительностью за счет использования дополнительного усилителя. Измеряемое напряжение, после прохождения входного устройства ВУ, поступает на вход усилителя переменного напряжения УН, далее на вход детектора Д и через усилитель постоянного тока УПТ на измерительный механизм ИМ. Частотный диапазон таких приборов определяется частотными характеристиками усилителя переменного тока (трудно изготовить широкополосный усилитель переменного тока) и ограничивается до 1 МГц. Диапазон измеряемых напряжений составляет от единиц милливольт до нескольких сотен вольт.

Элементная база, используемая при создании вольтметров переменного тока, определяется существующим уровнем техники (от полупроводниковых образцов до микроинтегрального исполнения), а функциональное назначение блоков схемы при этом не меняется.

Важным элементом, существенно влияющим на метрологические характеристики вольтметров, являются детекторы, выполняющие функцию преобразователей переменного напряжения в постоянное напряжение. Напряжение на выходе детектора может быть пропорционально амплитудному, средневыпрямленному и среднеквадратичному значению измеряемого напряжения. Эксплуатационные свойства вольтметра зависят от типа детектора. Например, вольтметры с амплитудными детекторами являются самыми высокочастотными; вольтметры с детекторами среднеквадратичного (действующего) значения измеряют напряжение любой формы; вольтметры среднего (средневыпрямленного) значения пригодны для измерения только гармонического сигнала. Шкалу электронных вольтметров обычно градуируют в действующих значениях синусоидального сигнала.

**Электронный вольтметр среднего значения.** Простейший вольтметр для измерения относительно высоких напряжений может быть выполнен по структурной схеме, приведенной на рис. 2.20, *а*. Выпрямитель состоит из полупроводниковых диодов, работающих

на линейном участке вольт-амперной характеристики. Широкий диапазон измерений ЭВ обеспечивается с помощью входного делителя.

*Достоинства:* диапазон измеряемых напряжений — по частоте 10 Гц... 10 МГц, по напряжению 1 мВ... 300 В.

*Недостатки:* показания ЭВ среднего значения зависят от формы кривой  $K_{\phi}$  измеряемого напряжения.

#### **Амплитудный электронный вольтметр (диодно-конденсаторный).**

Показания такого ЭВ пропорциональны амплитудному значению измеряемого напряжения. Такие вольтметры позволяют измерять амплитуду импульсов с минимальной длительностью до десятых долей микросекунды и скважностью 2 ... 500. Верхняя граница частотного диапазона измерения определяется частотными свойствами диода, значениями монтажных емкостей и индуктивностью подводящих проводов; нижняя граница — постоянной времени разряда конденсатора, и чем больше ее значение, тем ниже граничная частота.

Диодные (как и транзисторные) амплитудные детекторы при малых напряжениях вносят в измеряемый сигнал значительные нелинейные искажения, поэтому в последнее время применяют амплитудные детекторы на интегральных микросхемах — операционных усилителях.

*Достоинства:* диапазон измерений по частоте 20 Гц... 1000 МГц, по напряжению 100 мВ... 1000 В; классы точности 4,0; 10,0; входное сопротивление 100 кОм... 5 МОм.

*Недостатки:* зависимость показаний ЭВ от формы сигнала.

**Электронный вольтметр действующего значения.** В схеме такого ЭВ выпрямитель состоит из полупроводниковых диодов, использующих квадратичный участок вольт-амперной характеристики. Для увеличения протяженности этого участка применяют преобразователи на диодных цепочках. Основное достоинство этих преобразователей заключается в независимости показаний на выходе от формы кривой измеряемого напряжения. Для расширения пределов измерения ЭВ на переменном токе используются емкостные делители напряжения.

*Достоинства:* высокая чувствительность (за счет усилительных свойств); малое потребление энергии; диапазон измерений по частоте 20 Гц... 50 МГц, по напряжению 1 мВ... 1000 В; классы точности: 2,5; 4,0; 10,0; 15,0.

*Недостатки:* высокая стоимость; ограниченная точность; необходимость переградуировки при замене элементной базы.

**Электронный омметр.** Он представляет собой электронный вольтметр постоянного тока, имеющий измерительную схему, преобразующую измеряемое сопротивление в пропорциональное ему постоянное напряжение.

Шкалу такого вольтметра градуируют в единицах измеряемого сопротивления и применяют его в качестве омметра. Расши-

рение пределов измерения осуществляется с помощью образцовых резисторов.

Технические характеристики: большое входное сопротивление, диапазон измерения 10 Ом... 1000 МОм, погрешность 2... 4 %, возможно измерение очень больших сопротивлений (тераомметры) с погрешностью до 10 %.

## 2.6. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цифровые измерительные приборы (ЦИП) — это многопредельные, универсальные приборы, предназначенные для измерения различных электрических величин: переменного и постоянного тока и напряжения, емкости, индуктивности, временных параметров сигнала (частоты, периода, длительности импульсов) и регистрации формы сигнала, его спектра и т.д.

В цифровых измерительных приборах входная измеряемая аналоговая (непрерывная) величина автоматически преобразуется в соответствующую дискретную величину с последующим представлением результата измерения в цифровой форме.

По принципу действия и конструктивному исполнению цифровые приборы разделяют на электромеханические и электронные. Электромеханические приборы имеют высокую точность, но малую скорость измерений. В электронных приборах используется современная база электроники.

Несмотря на схемные и конструктивные особенности, принцип построения цифровых приборов одинаков (рис. 2.21).

Измеряемая величина  $X$  поступает на входное устройство прибора ВУ, где происходит масштабное преобразование. С входного устройства сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь АЦП, где аналоговый сигнал преобразуется в соответствующий код, который отображается в виде числового значения на цифровом отсчетном устройстве ЦОУ. Для получения всех управляющих сигналов в цифровом приборе предусмотрено устройство управления (УУ) (на рис. 2.21 не показано).

Входное устройство цифрового прибора устроено аналогично электронному прибору, а в некоторых конструкциях на его входе используется фильтр для исключения помех.

В зависимости от принципа аналого-цифрового преобразования (АЦП) цифровые измерительные приборы разделяют на устройства прямого преобразования и компенсационные (с уравнивающим преобразованием).

Основными элементами ЦИП являются триггеры (электронное устройство с двумя устойчивыми со-

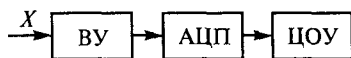


Рис. 2.21. Структурная схема цифрового прибора

стояниями), дешифраторы (преобразователь кода с одним основанием в код с другим основанием) и знаковые индикаторы (преобразователь электрического сигнала в световой). Несколько знаковых индикаторов образуют цифровое отсчетное устройство. К наиболее важным характеристикам ЦИП относятся: разрешающая способность, входное сопротивление, быстродействие, точность, помехозащищенность. *Разрешающая способность* ЦИП определяется изменением цифрового отсчета, приходящегося на единицу младшего разряда. *Входное сопротивление* ЦИП характеризует мощность, потребляемую им от объекта измерения. *Быстродействие* ЦИП оценивается числом измерений в секунду. *Точность измерений* ЦИП отражает близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Класс точности ЦИП определяется пределом допускаемой относительной погрешности

$$\gamma_{\text{отн}} = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{X_k}{X} \right| - 1 \right) \right],$$

где  $c$  и  $d$  — постоянные числа, характеризующие класс точности ЦИП соответственно в конце и начале диапазона;  $X_k$  — конечное значение диапазона. Класс точности обозначается в виде дроби  $c/d$ , например класс 0,02/0,01.

*Помехоустойчивость* ЦИП определяется степенью подавления помех на его входе и характеризуется коэффициентом подавления помех

$$K = 20 \lg(E_{\text{пом}}/U_0),$$

где  $E_{\text{пом}}$  — амплитудное значение помехи на входе прибора;  $U_0$  — эквивалентное входное постоянное напряжение, вызывающее такое же изменение показаний прибора, что и  $E_{\text{пом}}$ .

Технические характеристики типичного универсального ЦИП:

Диапазон входных величин .....	20 мВ... 1кВ, 0,2 мА... 2 А, 200 МОм... 10 МОм
Абсолютная погрешность от верхнего предела измерений, % .....	0,001... 0,5
Стабильность от верхнего предела измерений, %:	
за сутки .....	0,002
за 6 мес .....	0,008
Разрешение .....	$10^{-6}$
Время выполнения операции .....	2 мс... 1с
Входные характеристики:	
сопротивление, МОм .....	10
емкость, пФ .....	40
частота (для переменного напряжения) .....	100 кГц...1 МГц



*Достоинства:* высокая чувствительность (по напряжению постоянного тока 1 нВ, по напряжению переменного тока 1 мкВ, по постоянному току 1 нА, по переменному току 5 мкА, по сопротивлению постоянному току 10 мкОм, по частоте от долей Гц). Высокая точность измерения (ЦИП подразделяют на восемь классов точности: 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0). Удобство и объективность отчета и регистрации; возможность дистанционной передачи результата измерения в виде кодовых сигналов без потери точности; возможность сочетания ЦИП с вычислительными машинами и другими автоматическими устройствами, высокая помехозащищенность.

*Недостатки:* сложность устройств и, следовательно, высокая их стоимость, невысокая надежность.

Перспективы развития ЦИП: достигнутый уровень метрологических характеристик в целом удовлетворяет требованиям практики и приближается к характеристикам соответствующих эталонов, поэтому основные усилия разработчиков направлены на повышение надежности ЦИП и создание ЦИП с расширенными функциональными возможностями, обеспечивающих потребителю максимум эксплуатационных удобств, что естественно связано с широким применением микроэлектроники и микропроцессорной техники.

**Микропроцессор** — это устройство, предназначенное для выполнения вычислительных и логических функций в соответствии с поступающими командами и выполненное на БИС. В сочетании с другими устройствами: блоками памяти, устройствами ввода-вывода и управления (УУ) микропроцессор образует микроЭВМ, и ее технические возможности удовлетворяют большинство требований, предъявленных со стороны ЦИП. МикроЭВМ осуществляет функции управления работой ЦИП и обработку промежуточных и окончательных результатов. Высокая точность обеспечивается за счет использования микроЭВМ для автоматической коррекции погрешности (внесение поправок в результат каждого измерения — по аддитивной и мультипликативной составляющей). Повышение надежности ЦИП осуществляется в основном программным путем.

Применение микропроцессорных систем в измерительной технике повышает точность приборов, расширяет их возможности, упрощает управление процессом измерений, автоматизирует калибровку и поверку приборов, позволяет выполнять вычислительные операции и создавать полностью автоматизированные приборы с улучшенными метрологическими характеристиками.

### Контрольные вопросы

1. Назовите общие узлы и детали электромеханических приборов различных систем.

2. Приведите структурную схему электромеханического измерительного прибора.
3. Приведите классификацию измерительных приборов.
4. Сравните по точности электромеханические приборы различных систем.
5. Сравните по защищенности от воздействия внешнего магнитного поля электромеханические приборы различных систем.
6. Выведите уравнение шкалы прибора магнитоэлектрической системы.
7. Как создается противодействующий момент у приборов различных систем?
8. Имеет ли класс точности гальванометр магнитоэлектрической системы?
9. Назовите режимы движения подвижной части гальванометра.
10. Что такое логометр?
11. Для измерения каких физических величин используются логометры?
12. Сравните по точности приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем.
13. Выведите уравнение шкалы прибора электродинамической системы.
14. Как расширяют диапазон измерений по току и напряжению у приборов электродинамической системы?
15. В чем отличие приборов электродинамической системы от приборов ферродинамической системы?
16. Отличаются ли показания приборов электродинамической системы при измерении постоянного и переменного тока?
17. Перечислите достоинства и недостатки электростатических приборов.
18. Объясните устройство и работу приборов индукционной системы.
19. В чем отличие номинальной постоянной счетчика от действительной?
20. Как осуществляется температурная и частотная коррекция у приборов выпрямительной системы?
21. Перечислите основные достоинства термоэлектрических приборов.
22. На какие группы делятся электронные аналоговые приборы?
23. Расскажите принцип работы компенсатора постоянного тока.
24. Какие существуют виды компенсаторов переменного тока и в чем их отличие?
25. Сформулируйте отличительные признаки мостов постоянного и переменного тока.
26. В чем отличие цифровых приборов от аналоговых?
27. Перечислите основные функциональные узлы цифровых измерительных приборов.
28. Как меняются характеристики ЦИП от применения в них микропроцессоров?

## ГЛАВА 3

# ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 3.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Постоянный ток и напряжение измеряются в основном с помощью магнитоэлектрических амперметров и вольтметров с пределами измерений 0,1 мкА...6 кА и 0,3 мВ...1,5 кВ, а также с помощью аналоговых электромагнитных, электродинамических, ферродинамических, электростатических, цифровых приборов, потенциометров (компенсаторов) постоянного тока. Для определения малых количеств электричества быстропротекающих импульсов тока используются баллистические гальванометры, для больших количеств электричества — кулонометры.

Выбор измерителя обусловлен мощностью объекта измерения и необходимой точностью. При включении прибора в измерительную цепь он изменяет ее параметры. Для уменьшения методической погрешности при измерении напряжения сопротивление вольтметра должно быть как можно большим, а при измерении тока сопротивление амперметра — как можно меньшим. Тогда и потребление мощности от объекта измерения будет малым.

Измерительный механизм магнитоэлектрических амперметров и вольтметров принципиально не различаются, а в зависимости от назначения прибора меняется его измерительная цепь. В амперметрах ИМ непосредственно или с помощью шунта включается в цепь последовательно с нагрузкой. В вольтметрах последовательно с ИМ включается добавочный резистор, и прибор подключается к тем точкам схемы, между которыми необходимо измерить напряжение. Характер измерительной цепи также определяется допустимой температурной погрешностью и пределом измерения прибора. Для компенсации температурной погрешности необходимо применять специальные схемы температурной компенсации.

**Измерение малых токов и напряжений.** Прямое измерение этих физических величин выполняют с помощью гальванометров магнитоэлектрической системы (от 0,1 нА и от 1 нВ), цифровых пикоамперметров (от 1 нА), микровольтметров (от 10 мкВ), нано-вольтметров (от 10 нВ), компенсаторов (от 1 мкВ).

Косвенное измерение осуществляют: с помощью компенсаторов (до 10 нА); по величине заряда конденсатора (до 1 нА); электрометров (до 10 нА).

**Измерение небольших количеств электричества.** Для измерения небольших количеств электричества в кратковременных импульсах тока применяют баллистический гальванометр (БГ). Он является разновидностью магнитоэлектрического гальванометра. В отличие от обычных магнитоэлектрических гальванометров, БГ имеет искусственно увеличенный момент инерции подвижной части за счет увеличения ее веса и, следовательно, значительно больший период собственных колебаний, равный 15...30 с.

**Измерения больших количеств электричества.** Для измерения количества электричества, протекающего за большой промежуток времени (несколько часов), применяют кулон-метры. Длительность измеряемых импульсов 0,05 ... 0,2 с, амплитуда 2... 200 мА, форма импульсов прямоугольная. Прибор имеет магнитоэлектрический ИМ, особенностью которого является отсутствие противодействующего момента. Подвод тока к обмотке рамки осуществляется с помощью безмоментных спиралей. Обмотка рамки выполнена из медного провода, намотанного на толстый алюминиевый каркас, в котором при движении рамки индуцируется ток, создающий тормозной момент. Под действием вращающего и тормозного моментов рамка поворачивается с постоянной, пропорциональной току, скоростью в течение всего времени, пока длится импульс тока.

**Измерение ЭДС.** Для этих целей используют компенсатор постоянного тока. Существуют электромеханические, гальванометрические и электрометрические компенсаторы, которые отличаются чувствительностью и входным сопротивлением.

Для измерения ЭДС источников с большим внутренним сопротивлением или напряжений в высокоомных цепях целесообразно использовать дифференциальный метод измерения (входное сопротивление магнитоэлектрических или электронных вольтметров может быть недостаточным).

**Измерение больших постоянных токов.** Для токов более 10 кА наиболее простой способ измерения — параллельное включение шунтов и использование магнитных преобразователей. Для более точных измерений (порядка 0,01 %) больших токов служат преобразователи из меди в виде стержня с определенным диаметром, имеющим приспособление для включения в разрыв шины с током.

**Измерение высоких напряжений.** Измерение напряжений до 1,5 кВ осуществляется магнитоэлектрическими вольтметрами с добавочными резисторами. При более высоких напряжениях (до 300 кВ) целесообразно включать электростатические вольтмет-

ры или обычные вольтметры через измерительные трансформаторы напряжения.

### 3.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Для оценки величины переменного тока и напряжения используют действующие, амплитудные и средние значения. Если сигнал синусоидален, то эти значения жестко связаны между собой через коэффициенты формы кривой  $K_f = U_d/U_{cp} = 1,11$  и коэффициент амплитуды  $K_a = U_{max}/U_d = 1,41$ . Значения этих коэффициентов зависят от формы кривой используемого сигнала. Чем острее форма этого сигнала, тем больше будут значения  $K_f$  и  $K_a$ .

Переменный ток и напряжение можно измерить с помощью измерительных механизмов (ИМ) всех систем. В этом случае магнитоэлектрические приборы (выпрямительные, термоэлектрические и электронные) используются с преобразователями переменного тока в постоянный. Обычно они градуируются в действующих значениях тока или напряжения. В приборах, предназначенных для измерения среднего и амплитудного значения, делается соответствующая отметка на шкале.

**Электромагнитные амперметры и вольтметры.** Амперметры на токи 250...300 А непосредственно в цепь не включаются из-за сильного влияния на показания приборов, магнитного поля токоподводящих проводов и значительного нагрева шины. Предел измерения изменяют путем секционирования обмотки катушки и включения секций последовательно или параллельно. Для переключения секций применяют штепсельные и рычажные переключающие устройства. Расширение пределов измерения на переменном токе производится при помощи измерительных трансформаторов тока.

Для расширения пределов измерения электромагнитных вольтметров применяют добавочные сопротивления и секционирование; для измерения больших напряжений (свыше 500 В) на переменном токе — измерительные трансформаторы напряжения.

Собственное магнитное поле электромагнитных приборов невелико, поэтому внешние магнитные поля влияют на показания приборов. Для защиты от внешних магнитных полей используют астазирование и экранирование.

На переменном токе возникает частотная погрешность, так как в сердечнике и в других металлических частях возникают вихревые токи, оказывающие размагничивающее действие на сердечник, вследствие чего вращающий момент на переменном токе будет немного меньше, чем на постоянном. Частотный диапазон — до 2000...3000 Гц, классы точности: 1,5; 2,5.

**Электродинамические амперметры и вольтметры.** У амперметров при токах до 0,5 А неподвижные и подвижные катушки соединяются последовательно. При таком соединении катушек компенсация частотной и температурной погрешностей не требуется, так как изменения температуры  $t^0$  и частоты  $f$  до 3000 Гц незначительно влияют на показания приборов.

При токах больше 0,5 А подвижная катушка соединяется параллельно с неподвижной (так как последовательное соединение вызвало бы перегрев и изменение свойств токоподводящих пружин). В этом случае необходима компенсация температурной и частотной погрешностей, возникающих в результате перераспределения токов в катушках при изменении  $t^0$  и  $f$ . Для компенсации температурной погрешности необходимо, чтобы температурные коэффициенты сопротивления параллельных ветвей были одинаковыми. Для компенсации частотной погрешности необходимо, чтобы постоянные времени обеих катушек были бы равны между собой.

У вольтметров неподвижная и подвижная катушки включаются последовательно. Для расширения пределов измерения применяют секционирование и измерительные трансформаторы напряжения.

**Ферродинамические амперметры и вольтметры.** Они имеют такие же измерительные схемы включения неподвижных и подвижных катушек, что и электродинамические приборы. Ферродинамические приборы, кроме температурной и частотной погрешностей, обладают специфическими погрешностями, вызванными наличием сердечника:

- погрешностью от нелинейности кривой намагничивания;
- погрешностью от потерь в материале на гистерезис и вихревые токи (магнитопровод изготавливают из материала с малой коэрцитивной силой).

Для расширения пределов измерения используют те же способы, что и для электродинамических приборов.

**Электростатические вольтметры (ЭВ).** Схемы включения ЭВ обладают некоторыми особенностями. У ЭВ на малые пределы измерения воздушный зазор между пластинами очень мал, поэтому возникает опасность короткого замыкания пластин, а следовательно, и сети при случайных ударах, трясках, вибрациях. Для исключения этой опасности внутрь ЭВ встраивается защитный резистор, через который прибор включается в сеть. При повышении частоты до нескольких сотен герц этот резистор, во избежание дополнительной погрешности, выключается. Диапазон частот — 20 Гц... 10 МГц.

Расширение пределов измерения ЭВ на переменном токе осуществляется включением последовательно с ЭВ добавочных конденсаторов или емкостных делителей. Применение делителей значительно снижает точность электростатических вольтметров. Ис-

точником погрешности является собственная емкость прибора на повышенных частотах. Электростатические вольтметры применяются в основном в качестве лабораторных вольтметров.

### 3.3. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ

В настоящее время необходимо измерять мощность и энергию постоянного тока; активную мощность и энергию переменного однофазного и трехфазного токов; реактивную мощность и энергию трехфазного переменного тока; мгновенное значение мощности, а также количество электричества в очень широких пределах.

Электрическая мощность определяется работой, совершаемой источником электромагнитного поля в единицу времени.

Активная (поглощаемая электрической цепью) мощность

$$P_a = UI \cos \varphi = I^2 R = U^2 / R, \quad (3.1)$$

где  $U$ ,  $I$  — действующие значения напряжения и тока;  $\varphi$  — угол сдвига фаз между ними.

Реактивная мощность

$$P_p = UI \sin \varphi = I^2 X. \quad (3.2)$$

Полная мощность

$$P_n = UI = I^2 Z.$$

Активная, реактивная и полная мощности связаны выражением

$$P = \sqrt{P_a^2 + P_p^2}. \quad (3.3)$$

Так, мощность измеряется в пределах 1 Вт ... 10 ГВт (в цепях постоянного и однофазного переменного токов) с погрешностью  $\pm(0,01 \dots 0,1) \%$ , а при СВЧ  $\pm(1 \dots 5) \%$ ; реактивная мощность — от единиц вар до Мвар с погрешностью  $\pm(0,1 \dots 0,5) \%$ .

Диапазон измерения электрической энергии определяется диапазонами измерения номинальных токов (1 нА ... 10 кА) и напряжений (1 мкВ ... 1 МВ), погрешность измерения  $\pm(0,1 \dots 2,5) \%$ .

Измерение реактивной энергии представляет интерес только для промышленных трехфазных цепей.

**Измерение мощности в цепях постоянного тока.** При косвенном измерении мощности используют методы амперметра и вольтметра, а также компенсационного метода.

Метод амперметра и вольтметра. В этом случае приборы включаются по двум схемам (рис. 3.1).

Метод прост, надежен, экономичен, но обладает рядом существенных недостатков: необходимостью снимать показания по двум

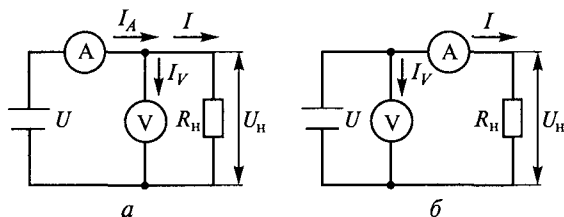


Рис. 3.1. Схемы измерения мощности по показаниям вольтметра и амперметра при различных сопротивлениях нагрузки:

*a* — малых; *б* — больших

приборам, необходимо производить вычисления, невысокой точностью за счет суммирования погрешности приборов.

Мощность  $P_x$ , вычисленная по показаниям приборов (см. рис. 3.1, *a*), имеет вид

$$P_x = U_V I_A = U(I_V + I_n) = UI_V + UI_n = P_V + P_n.$$

Она больше действительного значения мощности, расходуемой в нагрузке  $P_n$ , на значение мощности потребления вольтметра  $P_V$ , т.е.  $P_n = P_x - P_V$ .

Погрешность определения мощности в нагрузке тем меньше, чем больше входное сопротивление вольтметра и меньше сопротивление нагрузки.

Мощность  $P_x$ , вычисленная по показаниям приборов (см. рис. 3.1, *б*), имеет вид

$$P_x = U_V I_A = (U_A + U_n)I = U_A I + U_n I = P_A + P_n.$$

Она больше действительного значения мощности потребления нагрузки на значение мощности потребления амперметром  $P_A$ . Методическая погрешность тем меньше, чем меньше входное сопротивление амперметра и больше сопротивление нагрузки.

Компенсационный метод. Данный метод применяют тогда, когда требуется высокая точность измерения мощности. С помощью компенсатора поочередно измеряют ток нагрузки и падение напряжения на нагрузке. Измеряемая мощность определяется по формуле

$$P = U_n I_n. \quad (3.4)$$

При прямом измерении активная мощность измеряется электромеханическими (электродинамическими и ферродинамическими), цифровыми и электронными ваттметрами.

Электродинамические ваттметры используют как переносные приборы для точных измерений мощности (класс 0,1...2,5) в цепях постоянного и переменного токов частотой до нескольких тысяч герц; ферродинамические (щитовые) ваттметры — в це-



пях переменного тока в основном промышленной частоты (класс 1,5...2,5).

В широком диапазоне частот применяют цифровые ваттметры, основу которых составляют различные преобразователи мощности (например термоэлектрические), УПТ, микропроцессор и ЦОУ. В цифровых ваттметрах осуществляется автоматический выбор пределов измерений, самокалибровка и предусмотрен внешний интерфейс.

Для измерения мощности в высокочастотных цепях служат специальные и электронные ваттметры; для измерения реактивной мощности на низких частотах — реактивные ваттметры (варметры), в которых путем использования специальных схем отклонение подвижной части электродинамического ИМ пропорционально реактивной мощности.

Включение электромеханических ваттметров непосредственно в электрическую цепь допустимо при токах нагрузки, не превышающих 10...20 А, и напряжениях до 600 В. Мощность при больших токах нагрузки и в цепях высокого напряжения измеряется ваттметром с измерительными трансформаторами тока  $TA$  и напряжения  $TV$  (рис. 3.2).

**Измерение активной мощности в цепях трехфазного тока.** Метод одного ваттметра. Этот метод применяют только в симметричной системе с равномерной нагрузкой фаз, одинаковыми углами сдвига по фазе между векторами  $I$  и  $U$  и с полной симметрией напряжений (рис. 3.3). На рис. 3.3, *а* нагрузка соединена звездой и нулевая точка доступна. На рис. 3.3, *б* нагрузка соединена треугольником и ваттметр включен в фазу.

На рис. 3.3, *в* нагрузка соединена треугольником с искусственной нулевой точкой. Искусственная нулевая точка создается с по-

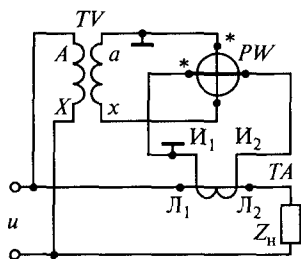


Рис. 3.2. Схема включения электродинамического ваттметра через измерительные трансформаторы тока и напряжения

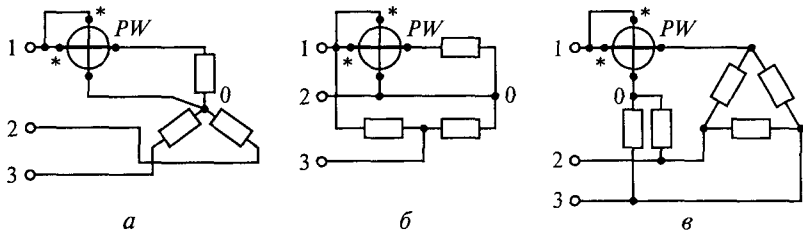


Рис. 3.3. Схемы включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь при полной симметрии при соединении нагрузки:

*а* — звездой; *б* — треугольником; *в* — с искусственной нулевой точкой

мощью двух резисторов, каждый из которых равен сопротивлению цепи обмотки напряжения ваттметра (указывается в техническом паспорте на ваттметр).

Показания ваттметра будут соответствовать мощности одной фазы, а мощность трехфазной сети во всех трех случаях включения прибора будет равна мощности одной фазы, умноженной на три, т.е.  $P = 3PW$ .

**Метод двух ваттметров.** Этот метод применяют в трехфазной трехпроводной цепи независимо от схемы соединения и характера нагрузки как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений. Асимметрия — это система, в которой мощности отдельных фаз различны. Токовые обмотки ваттметров включаются в любые две фазы, а обмотки напряжения — на линейные напряжения (рис. 3.4).

Полная мощность может быть выражена в виде суммы показаний двух ваттметров. Так, для схемы, приведенной на рис. 3.4, а,

$$P = P_1 + P_2 = I_1 U_{12} \cos \Psi_1 + I_3 U_{32} \cos \Psi_2,$$

где  $\Psi_1$  — угол сдвига фаз между током  $I_1$  и линейным напряжением  $U_{12}$ ;  $\Psi_2$  — угол сдвига фаз между током  $I_3$  и линейным напряжением  $U_{32}$ .

В частном случае при симметричной системе напряжений и одинаковой нагрузке фаз —  $\Psi_1 = 30^\circ - \varphi$  и  $\Psi_2 = 30^\circ + \varphi$  — показания ваттметров будут:

$$P_1 = I_1 U_{12} \cos (30^\circ - \varphi); P_2 = I_3 U_{32} \cos (30^\circ + \varphi).$$

При активной нагрузке ( $\varphi = 0$ ) показания будут одинаковы, так как  $P_1 = P_2 = IU \cos 30^\circ$ .

При нагрузке с углом сдвига  $60^\circ$  показания второго ваттметра равны нулю, так как  $P_2 = IU \cos (30^\circ + \varphi) = IU \cos (30^\circ + 60^\circ) = 0$ , и в этом случае мощность трехфазной цепи измеряется одним ваттметром.

При нагрузке с углом сдвига  $\varphi$  больше  $60^\circ$  мощность, измеряемая вторым ваттметром, будет отрицательной, так как  $(30^\circ + \varphi)$

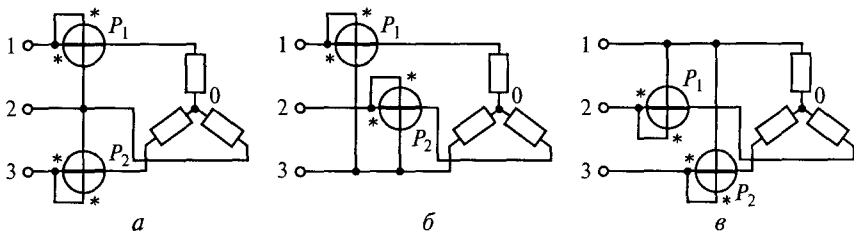


Рис. 3.4. Схемы включения двух ваттметров в трехфазную цепь:

а — в 1-ю и 3-ю фазы; б — в 1-ю и 2-ю; в — во 2-ю и 3-ю

Больше  $90^\circ$ . В этом случае подвижная часть ваттметров повернется в обратную сторону. Для отсчета необходимо изменить на  $180^\circ$  фазу тока в одной из цепей ваттметра. В этом случае мощность цепи трехфазного тока равна разности показаний ваттметров:

$$P = P_1 + (-P_2) = P_1 - P_2.$$

**Метод трех ваттметров.** Для измерения мощности трехфазной цепи при несимметричной нагрузке включают три ваттметра. В этом случае общая мощность при наличии нулевого провода будет равна арифметической сумме показаний трех ваттметров. Каждый ваттметр измеряет мощность одной фазы, показания ваттметра независимо от характера нагрузки будут положительными (параллельная обмотка включается на фазное напряжение, т.е. между линейным проводом и нулевым).

Если нулевая точка недоступна и нулевой провод отсутствует, то параллельные цепи приборов могут образовать искусственную нулевую точку при условии, что сопротивления этих цепей равны между собой.

**Измерение реактивной мощности в однофазных и трехфазных цепях.** Несмотря на то, что реактивная мощность не определяет ни совершаемой работы, ни передаваемой энергии за единицу времени, ее измерение также важно. Наличие реактивной мощности приводит к дополнительным потерям электрической энергии в линиях передачи, трансформаторах и генераторах. Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (вар) как в однофазных, так и в трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока электродинамическими и ферродинамическими или специально предназначенными для измерения реактивной мощности ваттметрами. Отличие реактивного ваттметра от обычного состоит в том, что он имеет усложненную схему параллельной цепи с целью получения сдвига по фазе, равного  $90^\circ$ , между векторами тока и напряжения этой цепи. Тогда отклонение подвижной части будет пропорционально реактивной мощности  $P_p = UI \sin \varphi$ . Реактивные ваттметры преимущественно применяются для лабораторных измерений и поверки реактивных счетчиков.

**Измерение мощности в цепях повышенной частоты.** С этой целью можно использовать как прямые, так и косвенные измерения. В ряде случаев предпочтительнее могут оказаться косвенные, так как иногда легче измерить ток и напряжение на нагрузке, чем непосредственно мощность. Прямые измерения мощности в цепях повышенных и высоких частот осуществляются термоэлектрическими, электронными ваттметрами, ваттметрами, основанными на эффекте Холла, цифровыми ваттметрами; косвенные измерения — осциллографическим методом. Данный метод применяют в основном тогда, когда цепь питается напряжением не-

синусоидальной формы, при высоких частотах, маломощных источниках напряжения и т. д.

**Измерение энергии в однофазных и трехфазных цепях.** Энергию измеряют электромеханическими и электронными счетчиками электрической энергии. Электронные счетчики электрической энергии обладают лучшими метрологическими характеристиками, большей надежностью и являются перспективными средствами измерений электрической энергии.

### 3.4. ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ И ЧАСТОТЫ

Фаза характеризует состояние гармонического сигнала в определенный момент времени  $t$ . Фазовый угол в начальный момент времени (начало отсчета времени), т. е. при  $t = 0$ , называют *нулевым (начальным) фазовым сдвигом*. Разность фаз  $\Delta\varphi$  измеряют обычно между током и напряжением, либо между двумя напряжениями. В первом случае чаще интересуются не самим углом сдвига фаз, а величиной  $\cos\varphi$  или коэффициентом мощности;  $\cos\varphi$  — это косинус того угла, на который опережает или отстает ток нагрузки от напряжения, приложенного к этой нагрузке. *Фазовым сдвигом*  $\Delta\varphi$  двух гармонических сигналов одинаковой частоты называют модуль разности их начальных фаз:  $\Delta\varphi = |\varphi - \varphi|$ . Фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  не зависит от времени, если остаются неизменными начальные фазы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Разность фаз выражается в радианах или градусах.

**Методы измерения угла сдвига фаз.** Эти методы зависят от диапазона частот, уровня и формы сигнала, от требуемой точности и наличия СИ. Различают косвенное и прямое измерения угла сдвига фаз.

**Косвенное измерение.** Такое измерение угла сдвига фаз между напряжением  $U$  и током  $I$  в нагрузке в однофазных цепях осуществляют с помощью трех приборов — вольтметра, амперметра и ваттметра (рис. 3.5). Угол  $\varphi$  определяется расчетным путем из найденного значения  $\cos\varphi$ :

$$\varphi = \arccos [P/(UI)].$$

Метод используется обычно на промышленной частоте и обеспечивает невысокую точность из-за

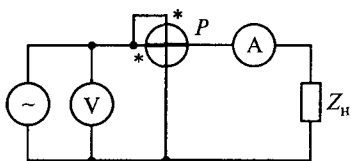


Рис. 3.5. Измерение угла сдвига фаз методом трех приборов

методической погрешности, вызванной собственным потреблением приборов. Метод достаточно прост, надежен, экономичен.

В трехфазной симметричной цепи величину  $\cos\varphi$  можно определить путем измерения:

- мощности, тока и напряжения одной фазы;
- активной мощности методом двух ваттметров;
- реактивной мощности методом двух ваттметров с искусственной нейтральной точкой.

Среди осциллографических методов измерения фазы наиболее распространены методы линейной развертки и эллипса. Осциллографический метод, позволяющий наблюдать и фиксировать исследуемый сигнал в любой момент времени, используют в широком диапазоне частот в маломощных цепях при грубых измерениях (5... 10%). Метод линейной развертки предполагает применение двухлучевого осциллографа, на горизонтальные пластины которого подают линейное развертывающее напряжение, а на вертикальные пластины — напряжение, между которыми измеряется фазовый сдвиг. Для синусоидальных кривых на экране получаем изображение двух напряжений (рис. 3.6, *а*), и по измеренным отрезкам АБ и АС вычисляем угол сдвига между ними:

$$\varphi_x = \text{АБ} \cdot 360^\circ / \text{АС},$$

где АБ — отрезок между соответствующими точками кривых при переходе их через ноль по оси  $x$ ; АС — отрезок, соответствующий периоду.

Погрешность измерения  $\varphi_x$  зависит от погрешности отсчета и фазовой погрешности осциллографа.

Если вместо линейной развертки использовать синусоидальное развертывающее напряжение, то получаемые на экране фигуры Лиссажу при равных частотах исследуемых напряжений дают на экране осциллографа изображение эллипса (рис. 3.6, *б*). Угол сдвига  $\varphi_x = \arcsin(\text{АБ}/\text{ВГ})$ .

Этот метод позволяет измерять  $\varphi_x$  в пределах  $0 \dots 90^\circ$  без учета знака фазового угла.

Погрешность измерения  $\varphi_x$  также определяется погрешностью отсчета и расхождениями в фазовых сдвигах каналов  $X$  и  $Y$  осциллографа.

Применяя компенсатор переменного тока с калиброванным фазовращателем и электронным осциллографом в качестве индикатора равенства фаз, можно произвести достаточно точное измерение угла сдвига фаз. Погрешность измерения в этом случае определяется в основном погрешностью используемого фазовращателя.

Прямое измерение. Прямое измерение угла сдвига фаз осуществляют с помощью электродинами-

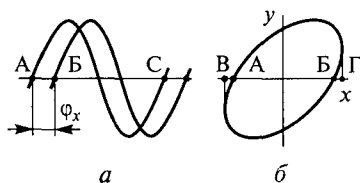


Рис. 3.6. Кривые, получаемые на экране двухлучевого осциллографа: при линейной (*а*) и синусоидальной (*б*) развертках

ческих, ферродинамических, электромагнитных, электронных и цифровых фазометров.

Наиболее часто из электромеханических фазометров используют электродинамические и электромагнитные логометрические фазометры. Шкала у этих приборов линейная. Диапазон частот: от 50 Гц до 6... 8 кГц. Классы точности: 0,2; 0,5. Для них характерна большая потребляемая мощность 5... 10 Вт.

В трехфазной симметричной цепи угол сдвига фаз  $\varphi$  или  $\cos \varphi$  измеряют однофазным или трехфазным фазометром.

Цифровые фазометры используют в маломощных цепях в диапазоне частот от единиц герц до 150 МГц; классы точности: 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0. В электронно-счетных цифровых фазометрах сдвиг по фазе между двумя напряжениями преобразуется во временной интервал, заполняемый импульсами стабильной частоты с определенным периодом, которые подсчитываются электронным счетчиком импульсов. Составляющие погрешности этих приборов: погрешность дискретности, погрешность генератора стабильной частоты, погрешность, зависящая от точности формирования и передачи временного интервала.

**Методы измерения частоты.** Частота — одна из важнейших характеристик периодического процесса, определяемая числом полных циклов (периодов) изменения сигнала в единицу времени. Диапазон используемых в технике частот очень велик и колеблется от долей герц до десятков гигагерц. Весь спектр частот делится на два диапазона — низкие и высокие.

Низкие частоты: инфразвуковые — ниже 20 Гц; звуковые — 20... 20 000 Гц; ультразвуковые — 20... 200 кГц. Высокие частоты: высокие — 200 кГц... 30 МГц; ультравысокие — 30... 300 МГц.

Выбор метода измерения частоты зависит от диапазона измеряемых частот, необходимой точности измерения, величины и формы напряжения измеряемой частоты, мощности измеряемого сигнала, наличия СИ и т. д.

**Прямое измерение.** Метод основан на применении электромеханических, электронных и цифровых частотомеров.

В электромеханических частотомерах используют измерительный механизм электромагнитной, электродинамической и ферродинамической систем с непосредственным отсчетом частоты по шкале логометрического измерителя. Такие частотомеры просты в устройстве и эксплуатации, надежны, обладают довольно высокой точностью. Диапазон частот: 20... 2500 Гц. Классы точности: 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5.

Электронные частотомеры применяют при измерениях в частотном диапазоне от 10 Гц до нескольких мегагерц, при уровнях входного сигнала 0,5... 200 В. Они имеют большое входное сопротивление, что обеспечивает малое потребление мощности. Классы точности: 1,0; 0,5 и ниже.

Цифровые частотомеры применяют для очень точных измерений. Диапазон частот: 0,01 Гц... 17 ГГц. Источником погрешности является погрешность от дискретности и нестабильности кварцевого генератора.

**Мостовой метод измерения частоты.** Метод основан на использовании частотозависимых мостов переменного тока, питаемых напряжением измеряемой частоты. Наиболее распространенной мостовой схемой для измерения частоты служит емкостной мост. Данный метод применяют для измерения низких частот в пределах 20 Гц... 20 кГц, погрешность измерений 0,5... 1 %.

**Косвенное измерение.** Метод осуществляется с использованием осциллографов: по интерференционным фигурам (фигурам Лиссажу) и методом круговой развертки. Методы просты, удобны и достаточно точны. Их применяют в широком диапазоне частот 10 Гц... 20 МГц. Недостатком метода Лиссажу является сложность расшифровки фигур при соотношении фигур более 10, и, следовательно, возрастает погрешность измерения за счет установления истинного отношения частот. При методе круговой развертки погрешность измерения в основном определяется погрешностью квантования образцовой частоты.

### **Контрольные вопросы**

1. Приборы каких систем можно использовать для измерения постоянного тока и напряжения?
2. Какими приборами осуществляются:
  - а) прямые измерения малых токов и напряжений;
  - б) косвенные измерения малых токов и напряжений;
  - в) прямые измерения малых количеств электричества;
  - г) прямые измерения больших количеств электричества;
  - д) прямые измерения больших постоянных токов и напряжений?
3. Приборы каких систем можно использовать для измерения переменного тока и напряжения?
4. В чем сущность прямых и косвенных измерений:
  - а) малых и больших переменных токов;
  - б) малых и больших переменных напряжений;
  - в) мощности в цепях постоянного тока;
  - г) мощности в цепях переменного тока;
  - д) фазы;
  - е) частоты?
5. Приведите схемы включения индукционных счетчиков электрической энергии в однофазных и трехфазных цепях.

# ГЛАВА 4

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

### 4.1. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Основными параметрами цепей с сосредоточенными постоянными являются: сопротивление резисторов, емкость конденсаторов, тангенс угла диэлектрических потерь конденсаторов, индуктивность и добротность катушек, взаимная индуктивность двух катушек. При выборе метода и средства для измерения этих параметров следует учитывать их зависимость от частоты тока, температуры, влажности, внешних электрических и магнитных полей и т. д.

Весь диапазон измеряемых сопротивлений условно разделен на поддиапазоны: малые сопротивления — 10 нОм... 10 Ом; средние — 10 Ом... 1 МОм; большие — свыше 1 МОм.

Выбор средств и метода измерения зависит от значений сопротивления, условий измерения, требуемой мощности и т. д.

При косвенных измерениях разных сопротивлений  $R_x$  широко используют метод амперметра-вольтметра. Этот метод основан на раздельном измерении тока и напряжения с последующим вычислением сопротивления по закону Ома. Метод прост, надежен, но обладает невысокой точностью, ограниченной классом точности применяемых приборов и методической погрешностью, вносимой этими приборами. В зависимости от значения сопротивления для измерения тока можно использовать милли- и микроамперметры, гальванометры; для измерения напряжения — милли- и микровольтметры, гальванометры. Погрешность измерения порядка 1,5... 2 %.

Прямые измерения сопротивления  $R_x$  с высокой точностью осуществляют с помощью мостов постоянного тока.

**Мосты постоянного тока (одинарные).** Диапазон измерения: 10 Ом... 0,1 ПОм (множитель  $10^{15}$  — приставка пета); классы точности: 0,005... 10,0.

При измерении малых сопротивлений на результат измерения существенно влияют сопротивления контактов и подводящих проводов, а также контактная ЭДС. Для уменьшения этого влияния применяют четырехзажимную схему включения исследуемого объекта, а измерения производят с помощью двойных мостов постоянного тока. Диапазон измерения: 10 нОм... 10 Ом (множитель  $10^{-9}$  — приставка нано); классы точности: 0,01... 2,0.



**Цифровые мосты.** Диапазон измерения: 10 МОм... 1 ТОм (множитель  $10^6$  — приставка мега, а множитель  $10^{12}$  — приставка тера); классы точности: 0,005... 2,0.

Для измерения больших сопротивлений используют одинарные мосты, а для измерения очень больших сопротивлений — до 0,01 ЭОм (множитель  $10^{18}$  — приставка экса) — баллистические гальванометры. Следует учесть, что при измерении больших сопротивлений токи, протекающие через исследуемые объекты, становятся очень малыми, что предъявляет высокие требования к чувствительности СИ.

Для измерения больших сопротивлений можно также использовать магнитоэлектрические омметры и омметры-логометры, электронные тераомметры, цифровые омметры.

**Электронный логометр (тераомметр).** Это прибор, в котором последовательно с измеряемым сопротивлением  $R_x$  включается образцовое сопротивление  $R_0$ . С помощью электронного вольтметра измеряют падение напряжения на  $R_x$  (при условии, что  $R_0 \gg R_x$ ), которое пропорционально измеряемому сопротивлению. Шкала при этом будет линейной. При  $R_0 \ll R_x$  измеряют падение напряжения на  $R_0$ ; шкала выходного прибора обратно пропорциональна измеряемому сопротивлению и носит гиперболический характер. Обычно это многопредельные приборы с неравномерной шкалой. Диапазон измерения: 10 Ом... 10 ПОм; классы точности: 1,5; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0.

Цифровые омметры имеют классы точности 0,005... 2,0. Диапазон измерения: 100 Ом... 1 ТОм.

## 4.2. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ

Диапазон измерения емкости — 1 пФ... 100 мкФ (множитель  $10^{-12}$  — приставка пико; множитель  $10^{-6}$  — приставка микро). Выбор метода зависит от измеряемой емкости, условий измерения (температуры окружающей среды, частоты и величины питающего напряжения), требуемой точности и наличия СИ.

Косвенные измерения — это методы амперметра и вольтметра; амперметра, вольтметра и ваттметра. Прямые измерения — мостовые методы и метод непосредственной оценки.

При измерении емкости и тангенса угла диэлектрических потерь используются:

- мосты переменного тока (с ручным уравниванием). Диапазон измерения: емкости — 10 пФ... 1 мкФ; тангенса угла потерь — 0,001... 1; классы точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0;

- цифровые мосты. Диапазон измерения: емкости — 1 пФ... 100 мкФ; тангенса угла потерь — 0,0001... 1; классы точности: 0,02; 0,05;

• фарадметры с электромагнитным и электродинамическим ИМ на принципе логометра. Их применяют при грубых измерениях относительно больших емкостей. На этом принципе может быть построен и генриметр. Диапазон измерения: 1 ... 10 мкФ; классы точности: 1,0; 1,5.

### 4.3. ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ, ДОБРОТНОСТИ И ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

Косвенные измерения — это методы амперметра и вольтметра: амперметра, вольтметра и ваттметра. Прямые измерения — мостовые методы, методы непосредственной оценки.

При измерении индуктивности, добротности и взаимной индуктивности используются:

- мосты переменного тока широкого применения с ручным уравниванием. Диапазон измерения: индуктивности 1 мкГн... 1000 Гн; добротности 4,5... 200; классы точности — 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0;

- цифровые мосты. Диапазон измерения индуктивности — 0,1 мкГн... 100 Гн; классы точности — 0,02; 0,05;

- генриметры (на принципе логометров). Диапазон измерений — 1 ... 10 Гн; классы точности — 1,5; 2,5.

Для измерения взаимной индуктивности  $M$  можно использовать все методы измерения  $L$ , а также баллистический гальванометр или веберметр.

Точность измерения  $M$  данными методами определяется точностью используемых СИ и принятых методов измерения.

#### Контрольные вопросы

1. Как делится диапазон измеряемых сопротивлений?
2. Назовите прямые и косвенные виды измерения сопротивлений.
3. Что лежит в основе выбора метода измерения сопротивлений?
4. Назовите область использования:
  - а) метода амперметра-вольтметра;
  - б) мостового метода;
  - в) электронного логометра;
  - г) цифровых омметров.
5. Как делится диапазон измеряемой емкости?
6. Что представляют собой прямые измерения:
  - а) малых значений емкости и тангенса угла потерь;
  - б) индуктивности, добротности и взаимной индуктивности?
7. Что представляют собой прямые и косвенные измерения больших значений емкости и тангенса угла потерь?
8. Что представляют собой косвенные измерения индуктивности, добротности и взаимной индуктивности?

# ГЛАВА 5

## ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

### 5.1. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Магнитные измерения тесно связаны с электрическими измерениями, так как электрические и магнитные явления представляют собой части единого электромагнитного процесса. В большинстве случаев при определении той или иной магнитной величины измеряется практически электрическая величина, значение которой представляет собой функцию измерения магнитной величины. Сама же магнитная величина определяется расчетным путем на основании соотношений, связывающих магнитные и электрические величины. Посредством магнитных измерений решается ряд задач, к которым относятся исследование магнитных свойств веществ и материалов, атомов и атомного ядра; контроль качества магнитных материалов и изделий из них; измерение магнитных полей постоянных магнитов и электромагнитов; исследование магнитного поля Земли и других планет; изучение физических свойств материалов по их магнитным характеристикам. Каждая из этих областей исследований предъявляет свои требования к диапазону и точности измерений, частотному диапазону, условиям измерения и к средствам измерения.

В Российской Федерации область магнитных измерений базируется на трех первичных эталонах — магнитной индукции и напряженности, магнитного потока и магнитного момента.

*Эталон единицы магнитной индукции и напряженности* — катушка Гельмгольца с однослойной намоткой голой медной проволоки на кварцевый каркас. Магнитная индукция при постоянном токе в 1 А, пропущенном через обмотку, определяется расчетным путем с погрешностью  $\pm 0,001\%$  по измеренным геометрическим размерам катушки. Основным параметром меры индукции — ее постоянная  $K_B = B/I$ . В качестве меры магнитной индукции  $B$  и напряженности  $H$  могут служить соленоиды и постоянные магниты.

*Эталон магнитного потока* — катушка взаимной индуктивности, состоящая из двух гальванически не связанных между собой обмоток и воспроизводящая магнитный поток, сцепляющийся с одной из обмоток, когда по другой протекает электрический ток.

*Эталон единицы магнитного момента* — группа постоянных магнитов эллипсоидной формы. Значения магнитных моментов определены путем сравнения индукции поля, создаваемого магнитом, с индукцией поля катушки как эталоном единицы магнитной индукции.

Кроме эталонов и образцовых мер в практике измерений используются и стандартные рабочие магнитные меры.

## 5.2. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА

При создании приборов для измерения магнитного потока обычно используется явление электромагнитной индукции. При изменении магнитного потока в измерительной катушке (ИК) возникает ЭДС. Измерительная катушка является преобразователем, с помощью которого магнитные величины (магнитный поток  $\Phi$ , магнитная индукция  $B$ , напряженность магнитного поля  $H$ ) могут быть преобразованы в ЭДС и измерены. Магнитоизмерительный преобразователь в виде ИК можно использовать для измерения параметров постоянного и переменного магнитных полей. В зависимости от характера измеряемой величины к ИК предъявляются различные требования относительно ее формы, размеров, расположения и т. д. Основной характеристикой ИК является ее постоянная, определяемая через произведение числа витков на площадь витка.

Для измерения постоянного магнитного потока используют баллистический гальванометр (БГ) или веберметр. Основные характеристики БГ — его постоянная и период свободных колебаний. Погрешность измерения составляет 0,5... 1,0 %. Баллистический гальванометр обеспечивает высокую чувствительность и точность, является прибором магнитоэлектрической системы с неградуированной шкалой и требует определения постоянной при каждом измерении.

**Веберметр** — прибор с градуированной шкалой для измерения магнитного потока. Существуют веберметры магнитоэлектрические, фотогальванометрические, аналоговые электронные и цифровые.

*Магнитоэлектрический веберметр* представляет собой разновидность гальванометра с противодействующим моментом, равным нулю и с большим моментом магнитоиндукционного успокоения. При отсутствии противодействующего момента, подвижная часть веберметра может занимать любое случайное положение. Это дает возможность произвести правильный отсчет измеряемой величины, так как указатель веберметра остается неизменным в положении первого максимального отброса. По точности и чувствительности он уступает баллистическому гальванометру. Диапазон из-

Измерений магнитоэлектрических микроверберметров — 500...10 000 мкВб; классы точности — 1,0; 2,5; 4,0 (в зависимости от сопротивления внешней цепи — 10; 20; 30 Ом).

*Фотогальванометрический веберметр* представляет собой фотогальванометрический усилитель с отрицательной обратной связью, которая осуществляется с помощью *RC*-цепи. Диапазон измерений фотогальванометрических микроверберметров — 2...2000 мкВб; классы точности — 1,0; 2,5 (сопротивление внешней цепи 100...1000 Ом).

Диапазон измерений цифровых микроверберметров — 10 мкВб...10 мВб; класс точности — 0,05 (с внешним сопротивлением 100 Ом). Диапазон измерений аналоговых электронных микроверберметров — 25...2500 мкВб; классы точности — 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Периодически изменяющиеся магнитные потоки измеряются индукционным методом, в основе которого лежит закон электромагнитной индукции. Измерению подлежит переменная ЭДС, индуцируемая в ИК, которая и является неподвижным индукционным преобразователем, охватывающим переменный поток. Концы ИК можно подключить к вольтметру среднего, действующего, амплитудного значения, к компенсатору, компаратору, в зависимости от требуемой точности и наличия СИ. В зависимости от СИ можно получить различные значения одного и того же потока, что особенно важно, когда кривая ЭДС несинусоидальна.

### 5.3. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Прямые измерения магнитной индукции  $B$  и напряженности магнитного поля  $H$  в постоянных и переменных полях выполняются с помощью тесламетров с преобразователем Холла.

**Преобразователь Холла.** Преобразователь представляет собой пластину из полупроводникового материала, по которому пропускается постоянный или переменный ток. При помещении преобразователя в магнитное поле на боковых его гранях возникает ЭДС Холла. Выпускаемые промышленностью тесламетры с преобразователем Холла имеют следующие параметры: диапазон измерения — 0,002...2 Т; классы точности — 1,0; 1,5; 2,5; частотный диапазон — до 1000 МГц.

*Достоинства:* приборы просты и удобны в эксплуатации, имеют достаточно высокие метрологические характеристики.

*Недостатки:* показания приборов зависят от температуры внешней среды.

**Ядерно-резонансные тесламетры.** Это приборы, в которых в качестве преобразователя применяется разновидность квантового маг-

нитоизмерительного преобразователя, действие которого основано на взаимодействии микрочастиц (атомов, ядер атомов) с магнитным полем. В качестве квантового преобразователя можно использовать ядерно-резонансный преобразователь, позволяющий измерить магнитную индукцию с высокой точностью. Диапазон измерений — 0,01 ... 10 Т; классы точности — 0,001 ... 0,1.

**Ферромодуляционные тесламетры.** Они предназначены для измерения магнитной индукции  $B$  и напряженности  $H$  в малых постоянных и низкочастотных переменных полях. Тесламетры основанные на явлении сверхпроводимости, позволяют измерить параметры магнитного поля биотоков сердца и мозга человека.

Напряженность магнитного поля  $H$  измеряют электродинамическим способом, который основан на взаимодействии тока протекающего по рамке, с измеряемым магнитным полем. О значении напряженности судят по углу отклонения рамки, помещенной в измеряемое магнитное поле, при неизменном значении тока в ней.

## 5.4. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Магнитные материалы делят на три группы: магнитомягкие (обычно используются для магнитопроводов); магнитотвердые (служат источниками магнитного поля); материалы со специальными свойствами. Статические и динамические характеристики магнитных материалов и методы их определения регламентируются соответствующими ГОСТами и стандартами.

Аппаратура для определения характеристик и параметров магнитных материалов состоит из намагничивающих и измерительных обмоток, средств измерения, регистрации, обработки полученной информации и различных вспомогательных устройств.

В промышленных установках для определения статических характеристик магнитных материалов определяют индукцию  $B$  с помощью индукционно-импульсного метода, а напряженность поля  $H$  — косвенно по силе тока в намагничивающей катушке и ее параметрам или с помощью магнитоизмерительных приборов. В установках для определения динамических характеристик магнитных материалов обычно используют индукционный магнитоизмерительный преобразователь и различные способы измерения его выходного сигнала.

**Образцы для испытаний.** Испытание магнитных материалов стремятся проводить при равномерном намагничивании материала, когда индукция в различных сечениях образца одинакова. Для испытания магнитного материала в замкнутой магнитной цепи используют образцы в виде кольца, что обеспечивает наибольшую

точность измерения. Но изготовление таких образцов — сложное дело, поэтому гораздо проще испытывать образцы материалов в виде полос, стержней с помощью специальных устройств — пермеметров.

**Основные статические характеристики.** Это — характеристики материалов, определяемые в постоянных магнитных полях и позволяющие отличить один материал от другого. К ним относятся: основная кривая намагничивания и симметричная петля гистерезисного цикла, площадь которой пропорциональна энергии, затрачиваемой на перемагничивание, а точки пересечения с осями координат позволяют определить основные магнитные характеристики материалов (рис. 5.1).

Начальная кривая намагничивания (см. рис. 5.1, а) представляет собой зависимость магнитной индукции от напряженности намагничивающего поля  $B = f(H)$ . Кривая  $OA$  получается при монотонном увеличении напряженности поля предварительно размагниченного образца. На практике чаще пользуются основной кривой намагничивания  $B = f(H)$ , являющейся геометрическим местом вершин симметричных гистерезисных петель (см. рис. 5.1, б). Из основной кривой намагничивания определяются значения нормальной магнитной проницаемости  $\mu = B/H$  для различных значений  $B$  и  $H$ . Из предельной гистерезисной петли находят остаточную индукцию материала  $B_r$  и коэрцитивную силу  $H_{CB}$  (напряженность поля, при которой  $B = 0$ ), индукцию насыщения  $B_{\mu}$ , относительную магнитную проницаемость  $\mu_{отн}$  и ее начальное  $\mu_{нч}$  и максимальное значения  $\mu_{max}$ .

Наиболее распространенный способ определения статических характеристик — индукционно-импульсный метод с использованием баллистического гальванометра и веберметра.

**Динамические характеристики.** Эти характеристики зависят не только от качества самого материала, но и от формы и размеров образца, формы кривой и частоты намагничивающего поля. При

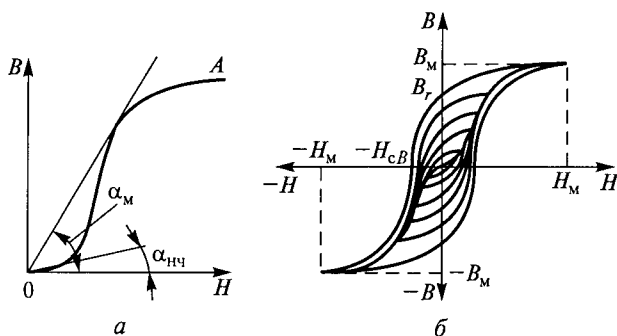


Рис. 5.1. Основные статические характеристики материалов:

а — начальная кривая намагничивания; б — основная кривая намагничивания

намагничивании магнитного материала переменным магнитным полем магнитная индукция изменяется по кривой, называемой *динамической петлей*. Динамическая петля и ее площадь определяют полную энергию, рассеиваемую за цикл перемагничивания т.е. потери за счет гистерезисных явлений, вихревых токов, магнитной вязкости и т.д. Семейство динамических петель характеризует магнитный материал при данных размерах образца, форме и частоте магнитного поля. Геометрическое место вершины динамических петель называется *динамической кривой намагничивания*.

Важными параметрами магнитных материалов в переменных магнитных полях являются различные виды магнитной проницаемости.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте основные задачи магнитных измерений.
2. Какие эталоны составляют метрологическую основу магнитных измерений?
3. Назовите основную характеристику измерительной катушки.
4. Как измеряется магнитный поток?
5. В чем отличие баллистического гальванометра от обычного магнитоэлектрического?
6. Назовите основные метрологические характеристики баллистического гальванометра.
7. В чем отличие веберметра от баллистического гальванометра?
8. Как измеряют напряженность и магнитную индукцию?
9. Что представляет собой преобразователь Холла?
10. Как измеряют переменные магнитные поля?
11. Приведите классификацию магнитных материалов.
12. Перечислите статические и динамические характеристики магнитных материалов.



# ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 6.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Внедрение механизации и комплексной автоматизации в производство требует быстрого и точного контроля технологических процессов, что связано с измерением и контролем разнообразных параметров физических величин. Особенно большое число неэлектрических величин требуется измерять и контролировать в металлургической, химической и текстильной отраслях промышленности. Развитие измерительной техники показало, что среди многочисленных методов измерения неэлектрических величин наибольшими преимуществами обладают электрические методы, которые обеспечивают:

- возможность измерения сигналов очень малой величины — применение электронных усилителей дает возможность измерять такие сигналы, которые не могут быть измерены никакими другими способами;
- возможность передачи измеренной величины на расстояние, а следовательно, и возможность дистанционного управления различными процессами;
- высокую точность и скорость измерений;
- возможность комплектования измерительных и управляемых ими автоматических установок унифицированными электроизмерительными приборами.

Для измерения любой неэлектрической величины  $X$  (температуры, давления, расхода жидкости, скорости, перемещения, ускорения, деформации, вибрации и т. д.) ее преобразовывают с помощью первичного измерительного преобразователя или датчика в выходную электрическую величину  $Y$ . Далее сигнал  $Y$  преобразуется цепью измерительных преобразователей прибора, где он претерпевает ряд изменений по уровню и спектру и преобразуется из одного вида энергии в другой. Таким образом, прибор для измерения неэлектрических величин в общем можно представить в виде цепи измерительных преобразователей, последовательно преобразующих измеряемую величину  $X$  в ряд других величин и в конечном итоге — в число (код), определяющее значение измеряемой величины в определенных единицах измерения.

*Измерительный преобразователь* — техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Учитывая, что объект измерения, как правило, сложный процесс, характеризующийся множеством различных параметров, то *информативным параметром* входного сигнала будем считать непосредственно измеряемую величину или величину, функционально связанную с измеряемой величиной. *Неинформативный параметр* не связан функционально с измеряемой величиной, но влияет на метрологические характеристики преобразователя.

Параметры, характеризующие условия, в которых работает преобразователь, и влияющие на его функцию преобразования, называют влияющими величинами. Зависимость изменения метрологических характеристик преобразователя от изменения влияющей величины или неинформативного параметра входного сигнала в пределах рабочих условий эксплуатации называется *функцией влияния*. Функция влияния может быть нормирована в виде формулы, графика или таблицы.

**Функция преобразования.** *Статическая характеристика (функция) преобразования* — это связь, выражающая зависимость информативного параметра выходного сигнала от постоянного во времени информативного параметра входного сигнала. Ее можно описать аналитическим выражением или графиком. В аналитическом виде характеристика преобразования представляется зависимостью  $Y = f(X)$ , которая может быть линейной (рис. 6.1, а) или нелинейной (рис. 6.1, б, в). Различают номинальную функцию преобразования  $Y_{\text{ном}} = f_{\text{ном}}(X)$ , приписываемую измерительному пре-

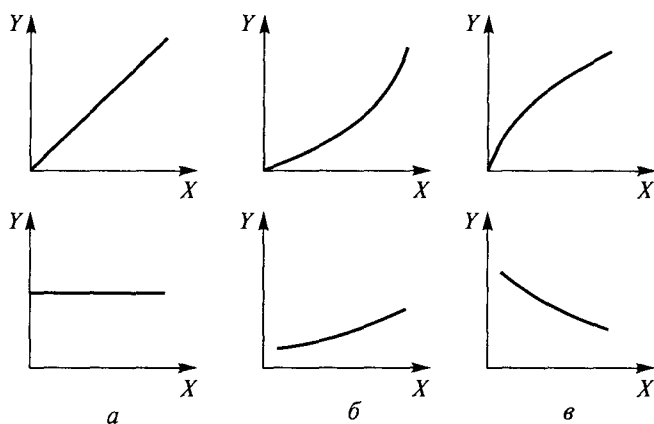


Рис. 6.1. Функции преобразования:

а — линейная; б, в — нелинейные

образователю согласно государственным стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам, и реальную (рабочую)  $Y_p = f_p(X)$ , которую он имеет в действительности.

*Динамические характеристики* преобразователей представляют собой зависимость информативного параметра выходного сигнала от меняющихся во времени параметров входного сигнала. К числу динамических относятся характеристики: импульсная  $g(t)$ , являющаяся реакцией преобразователя на дельта-функцию  $\delta(t)$ ; переходная  $h(t)$  — реакция на единичный ступенчатый сигнал; передаточная функция — отношение операторных изображений выходной величины к входной  $K(p) = Y(p)/X(p)$ ; амплитудно- и фазочастотная. Динамические (инерционные) свойства преобразователей характеризуют такими понятиями как скорость преобразования и время преобразования. *Скорость преобразования* (измерения) определяется числом преобразований (измерений) в единицу времени, выполняемых с нормированной погрешностью. *Время преобразования* (измерения) — время, прошедшее с начала преобразования (измерения) до получения результата с нормированной погрешностью.

**Чувствительность.** *Чувствительностью преобразователя* называют отношение изменения выходной величины (информативного параметра) к вызывающему его изменению входной величины (информативного параметра входного сигнала). Чувствительность равна производной от функции преобразования преобразователя  $S = dY/dX = \Delta Y/\Delta X$  и геометрически выражается тангенсом угла наклона касательной в любой точке кривой функции преобразования.

Для линейных преобразователей чувствительность постоянна и определяется по формуле

$$S = Y/X, \quad (6.1)$$

а для нелинейных она всегда зависит от входного сигнала.

**Погрешность.** Абсолютные, относительные и приведенные погрешности преобразователя определяются по входу и выходу, так как входная и выходная величины могут иметь разную физическую природу, а также вследствие того, что часто отсутствует измерительный преобразователь, по которому можно было бы поверить рабочий преобразователь. Смысл определения погрешностей по входу и выходу поясняется на рис. 6.2, а. *Абсолютная погрешность  $F_p$  преобразователя по выходу* — это разность значений реальной  $F_p$  и номинальной  $F_{ном}$  функций преобразования при одном и том же значении входной величины  $X$

$$\Delta y = Y_p - Y_{ном}. \quad (6.2)$$

Погрешность создается самим преобразователем, поэтому представляется целесообразным знать значение входного сигнала, со-

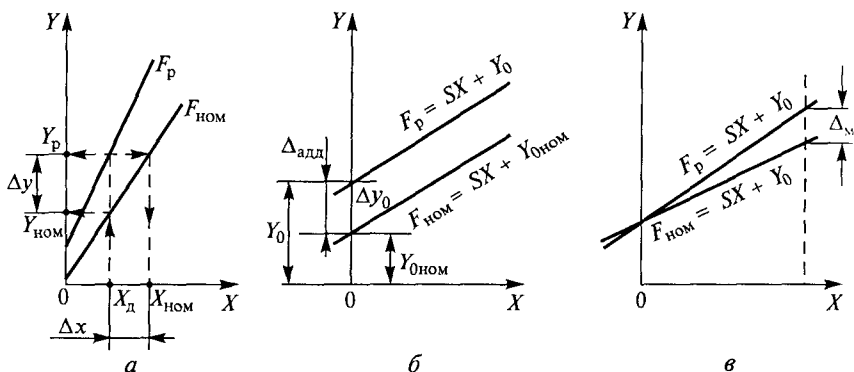


Рис. 6.2. Графики погрешностей:

*a* — по входу и выходу; *б* — аддитивная; *в* — мультипликативная

ответствующего погрешности преобразователя. *Абсолютная погрешность преобразователя по входу*

$$\Delta X = X_{\text{ном}} - X_{\text{д}}, \quad (6.3)$$

где  $X_{\text{д}}$  — действительное значение входной величины;  $X_{\text{ном}}$  — значение входной величины, определяемое по номинальной функции преобразования  $Y_{\text{ном}} = f_{\text{ном}}(X)$  при значении выходной величины  $Y_{\text{ном}}$ , соответствующей действительному значению  $X_{\text{д}}$ .

*Относительные погрешности по выходу и входу* определяются соответственно равенствами

$$\gamma_{\text{вых}} = \Delta y / Y_{\text{р}} \text{ и } \gamma_{\text{вх}} = \Delta X / X_{\text{д}}.$$

*Приведенные погрешности по выходу и входу* соответственно

$$\gamma_{\text{прив.вых}} = \Delta y (Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}) \text{ и } \gamma_{\text{прив.вх}} = \Delta X (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}),$$

где  $X_{\text{max}}$ ,  $Y_{\text{max}}$ ,  $X_{\text{min}}$ ,  $Y_{\text{min}}$  — максимальные и минимальные значения входной и выходной величин преобразователя.

Погрешности преобразования зависят как от свойств самого преобразователя, так и от условий, в которых он работает (температуры и влажности окружающей среды, наличия внешних электрических и магнитных полей и т. д.). При нормировании точности измерительных преобразователей обычно указывают область допустимых значений погрешностей преобразования, реализуемого преобразователем при «нормальных условиях» (основная погрешность), и допустимые изменения функции преобразования при определенных изменениях влияющих величин.

На практике часто используются преобразователи с линейной функцией преобразования, не проходящей через начало координат (рис. 6.2, б),

$$Y_{\text{р}} = SX + Y_0, \quad (6.4)$$

где  $Y_0$  — значение выходной величины при нулевом значении входной.

Отклонение такой реальной функции от номинальной вызвано отклонениями  $Y_0$  и чувствительности  $S$ . Погрешность, обусловленная неноминальным значением выходной величины при нулевом значении входной, называется *аддитивной*:

$$\Delta_{\text{адд}} = \Delta y_0 = Y_0 - Y_{0\text{ном}}, \quad (6.5)$$

где  $Y_{0\text{ном}}$  — номинальное значение выходной величины при нулевом значении входной.

При изменении  $Y_0$  график функции преобразования (см. рис. 6.2, б) перемещается параллельно самому себе, т. е. аддитивная погрешность не зависит от входной величины.

Погрешность, обусловленная неноминальным значением чувствительности  $S$ , называется *мультипликативной*. Погрешность чувствительности, представляющая собой мультипликативную составляющую основной погрешности, приводит к изменению угла наклона реальной характеристики преобразователя относительно номинальной (рис. 6.2, в). При этом абсолютная погрешность  $\Delta_m = Y_0 - Y_{\text{ном}}$  зависит от входной величины  $X$ . Например, при изменении температурных условий работы преобразователя его чувствительность изменилась на  $\Delta S$  и стала равной  $S = S_{\text{ном}} + \Delta S$ , где  $S_{\text{ном}}$  — номинальное значение чувствительности преобразователя. Абсолютная погрешность чувствительности преобразователя в этом случае будет

$$\Delta_m = [(S_{\text{ном}} + \Delta S)X + Y_0] - [S_{\text{ном}}X + Y_0] = \Delta SX, \quad (6.6)$$

т. е. абсолютная мультипликативная погрешность пропорциональна входной величине  $X$ .

## 6.2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Схемы включения преобразователей для получения электрической величины во многом определяют метрологические свойства самих приборов для измерения неэлектрических величин. Эти приборы можно разделить на приборы прямого и компенсационного преобразований.

**Метод прямого преобразования.** В приборах, использующих метод прямого преобразования (рис. 6.3), результат измерения получается после ряда последовательных преобразований измеряемой величины в отклонение подвижной части измерителя. Эти приборы достаточно просты, надежны, но они имеют невысокие метрологические характеристики.

В измерительном преобразователе Пр происходит преобразование измеряемой неэлектрической величины  $X$  в электрическую  $\mathcal{E}$ .

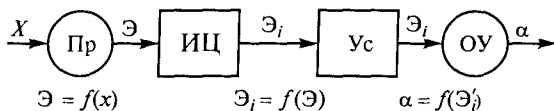


Рис. 6.3. Структурная схема прибора прямого преобразования

Эту величину в общем случае можно преобразовать в измерительной цепи ИЦ еще несколько раз. Затем величина  $\mathcal{E}_i = f(\mathcal{E})$  усиливается при необходимости усилителем  $Ус$  и поступает на отсчетное устройство  $ОУ$ , регистрирующее значение входной величины  $X$ .

Функция преобразования измерительного прибора получается путем последовательной подстановки функций преобразования каждого из звеньев преобразования измеряемой неэлектрической величины в выражение функции преобразования последнего звена  $\alpha = f(\mathcal{E}_i)$  и позволяет учесть влияние конструктивных параметров всех преобразователей на функцию преобразования прибора.

Чувствительность прибора, состоящего из ряда последовательно соединенных преобразователей, имеющих линейную функцию преобразования, определяется по формуле

$$S_{\text{пр}} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta X} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta X} \frac{\Delta \mathcal{E}_i}{\Delta \mathcal{E}} \frac{\Delta \mathcal{E}'_i}{\Delta \mathcal{E}_i} \frac{\Delta \alpha}{\Delta \mathcal{E}'_i} = S_{\text{пр}} S_{\text{ИЦ}} S_{\text{Ус}} S_{\text{ОУ}},$$

т. е. она равна произведению чувствительности отдельных его преобразователей.

Следовательно, для увеличения чувствительности прибора в целом нужно стремиться к увеличению чувствительности отдельных звеньев схемы. Однако одновременно с этим увеличивается чувствительность прибора к внешним дополнительным факторам (колебанию питающего напряжения, частоты, изменению температуры внешней окружающей среды и т. д.), что приводит к появлению дополнительных погрешностей прибора. Эти погрешности будут тем больше, чем меньше различие чувствительности к дополнительным факторам и чувствительности к измеряемой величине. Чтобы чувствительность всего прибора была постоянной, т. е. функция его преобразования  $\alpha = f(X)$  была строго линейной, функции преобразования измерительных преобразователей прибора должны быть линейными и постоянными, а линейность характеристик отдельных измерительных преобразователей, входящих в схему прибора, должна быть согласована по диапазону. При этом следует учитывать, что чувствительность каждого преобразователя постоянна только на определенном участке характеристики, которая ограничивается, с одной стороны, пределом преобразования, а другой — порогом чувствительности.

*Предел преобразования преобразователя* — это максимальное значение входной величины, которая еще может быть воспринята

преобразователем без искажения этой величины и без поврежде- ний преобразователя.

*Порог чувствительности преобразователя* — это минимальное изменение значения входной величины, которое можно обнару- жить с помощью данного преобразователя.

Абсолютная погрешность для прибора с последовательным со- единением преобразователей равна алгебраической сумме пере- считанных к выходу погрешностей всех входящих в него преобра- зователей:

$$\Delta y = S_{иц} S_{уc} S_{оу} \Delta \Theta + S_{уc} S_{оу} \Delta \Theta_i + S_{оу} \Delta \Theta'_i + \Delta \alpha.$$

Приведенная погрешность для такого прибора будет равна сумме приведенных погрешностей составляющих:

$$\gamma_{пр} = \gamma_{пр.Пр} + \gamma_{пр.иц} + \gamma_{пр.уc} + \gamma_{пр.оу}, \quad (6.7)$$

а приведенная среднеквадратичная погрешность при отсутствии корреляции между составляющими согласно (1.19) определяется по формуле

$$\gamma(\sigma)_{пр} = \sqrt{\gamma^2(\sigma)_{пр.Пр} + \gamma^2(\sigma)_{пр.иц} + \gamma^2(\sigma)_{пр.уc} + \gamma^2(\sigma)_{пр.оу}}. \quad (6.8)$$

Из сказанного ясно, что погрешность измерения неэлектри- ческой величины  $X$  зависит от погрешности всех последовательно включенных преобразователей.

Использование в приборах дифференциальной схемы включе- ния преобразователей (рис. 6.4) позволяет существенно улучшить метрологические характеристики приборов. Основу таких схем со- ставляет вычитающий преобразователь — это преобразователь с двумя входами, выходная величина которого представляет собой нечетную функцию разности двух входных одноименных сиг- налов  $\Theta = F(\Theta_1 - \Theta_2)$ .

Здесь имеются два самостоятельных, как правило, одинако- вых канала последовательно включенных преобразователей, на- ходящихся в одинаковых рабочих условиях, в один из которых включен рабочий преобразователь  $Пр_1$ , а во второй — нерабо- чий преобразователь  $Пр_2$ . Неэлектрические величины  $X_1$  и  $X_2$ ,

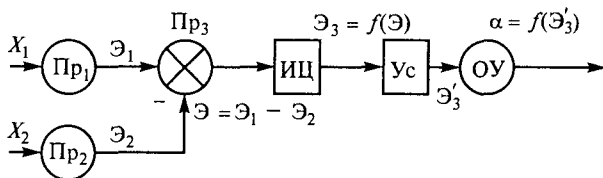


Рис. 6.4. Структурная схема прибора с дифференциальным преобразо- вателем

поступающие на вход преобразователей  $\text{Пр}_1$  и  $\text{Пр}_2$ , преобразуются в электрические сигналы  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  и поступают на вычитающий преобразователь  $\text{Пр}_3$ . Сигнал  $\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$  с выхода вычитающего преобразователя идет далее уже по цепи прямого преобразования.

Рассмотрим в общем виде свойства дифференциальной схемы, считая для простоты, что преобразователи  $\text{Пр}_1$  и  $\text{Пр}_2$  имеют линейную функцию преобразования вида (6.4)

$$Y_1 = SX_1 + Y_0; \quad Y_2 = SX_2 + Y_0. \quad (6.9)$$

Тогда функция преобразования дифференциального преобразователя запишется в виде

$$Y = Y_1 - Y_2 = S(X_1 - X_2). \quad (6.10)$$

Рассмотрим работу дифференциальной схемы включения преобразователей в двух режимах.

1. Пусть  $X_1 = X$ , а  $X_2$  — одноименная ей физическая величина, имеющая постоянное значение. Тогда функцией преобразования дифференциального преобразователя является зависимость  $Y = SX$ , а его чувствительность равна чувствительности одного канала  $S_d = dY/dX = S$ . Второй канал в этом случае используется для компенсации погрешностей, связанных с возможными изменениями условий эксплуатации прибора.

2. Пусть предварительно преобразованная измеряемая величина  $X$  воздействует на оба канала одновременно, но в противофазе при  $X_0 = \text{const}$

$$X_1 = X_0 + X; \quad X_2 = X_0 - X.$$

В этом случае функция преобразования дифференциального преобразователя имеет вид

$$Y = 2SX, \quad (6.11)$$

а его чувствительность  $S_d$  в два раза больше чувствительности одного канала:

$$S_d = 2S, \quad (6.12)$$

и эти соотношения выполняются тем лучше, чем меньше измеряемая величина  $X$ .

Рассмотрим погрешность дифференциального преобразователя. Пусть преобразователи  $\text{Пр}_1$  и  $\text{Пр}_2$  имеют аддитивные погрешности. В этом случае можно записать

$$Y_1 = SX_1 + \Delta Y; \quad Y_2 = SX_2 + \Delta Y.$$

Погрешности  $\Delta Y$  обоих каналов можно считать равными, так как каналы одинаковые и находятся в одних и тех же условиях. Из



выражения (6.10) для функции преобразования дифференциального преобразователя видно, что аддитивные погрешности обоих каналов взаимно компенсируются.

Мультипликативная погрешность, зависящая от уровня входного сигнала  $X$  тем меньше, чем меньше измеряемая величина и чем выше и стабильнее линейность функции преобразования.

Линейность функции преобразования дифференциальной схемы во втором режиме работы достаточно высокая и при малых  $X$  лучше, чем линейность функции преобразования преобразователей  $Пр_1$  и  $Пр_2$ .

**Метод компенсационного преобразования.** В приборах, использующих метод компенсационного преобразования (с применением отрицательной обратной связи), удастся значительно уменьшить как аддитивную, так и мультипликативную погрешности. Применение обратной связи позволяет создать приборы, обладающие малой статической и динамической погрешностями, имеющие большую выходную мощность.

Структурная схема такого прибора с компенсацией измеряемой электрической величины на выходе преобразователя приведена на рис. 6.5. Входная неэлектрическая величина  $X$  после ее преобразования поступает в виде электрического сигнала  $U_x$  на один из входов вычитающего преобразователя, на другой вход которого подается напряжение  $U_k$ , получаемое на выходе от компенсационной цепи КЦ.

Компенсационная цепь приводится в действие выходным напряжением усилителя  $Ус$  с таким расчетом, чтобы разность  $\Delta U$  была достаточно мала. Мерой измеряемой неэлектрической величины является величина  $Y_{\text{вых}}$ , воздействующая на компенсационную цепь КЦ. Измеритель ОУ в данном случае является механическим устройством, например реохордом, включенным в цепь моста или компенсатора. Общая погрешность измерения складывается только из погрешностей измерительного преобразователя  $Пр$ , измерительной и компенсационной цепей. Исключение погрешностей этих узлов может быть достигнуто в компенсационных приборах с компенсацией измеряемой неэлектрической величины (рис. 6.6).

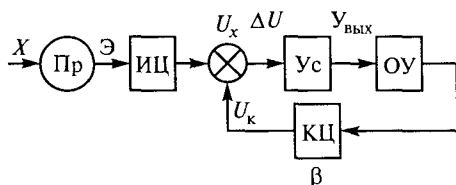


Рис. 6.5. Структурная схема прибора с компенсационным преобразователем

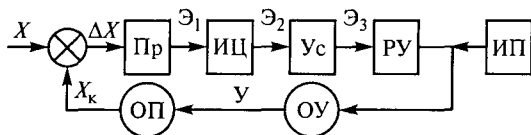


Рис. 6.6. Структурная схема прибора с частичной компенсацией погрешностей

Здесь обратный преобразователь ОП преобразует выходную электрическую величину  $U$  в неэлектрическую  $X_k$  однородную с измеряемой величиной  $X$ . Разность между  $X$  и  $X_k$  ( $\Delta X$ ), преобразованная в электрическую величину  $\mathcal{E}$  и усиленная усилителем  $Ус$ , воздействует на регулирующее устройство  $РУ$ , которое связано с источником питания ИП. В результате этого на измеритель  $ОУ$  и обратный преобразователь подается такая электрическая величина  $U$ , которая, будучи преобразована в неэлектрическую величину  $X_k$ , компенсирует измеряемую величину  $X$ . Таким образом, вся цепь прямого преобразования оказывается охваченной обратным преобразованием и при  $\Delta X \ll X$  погрешность всех преобразующих звеньев практически исключается. Общая погрешность измерения складывается только из погрешностей измерителя  $ОУ$  и обратного преобразователя. Следовательно, по сравнению с предыдущим случаем, здесь вместо погрешности прямого преобразователя появляется погрешность обратного преобразователя. Реальный выигрыш при переходе от схемы на рис. 6.5 к схеме на рис. 6.6 может быть получен лишь в том случае, когда погрешность обратного преобразователя будет меньше погрешности прямого преобразователя. В приборах с обратной связью роль преобразователя обратной связи выполняют простые устройства, обладающие высокой точностью. При этом высокую точность имеет и прибор в целом.

Большинство современных измерений неэлектрических величин электрическими методами не требует допустимой погрешности, меньшей 0,5... 1,0%, так как часто погрешности самих преобразователей довольно велики. Но зато требуются более простые устройства с достаточно быстрым отсчетом измеряемой величины непосредственно по шкале измерительного устройства. В практике измерения неэлектрических величин часто применяют мостовые и компенсационные схемы.

**Включение преобразователей в мостовые схемы.** В зависимости от требований к чувствительности мостовой схемы и к линейности функции преобразования можно различить три способа включения преобразователей в мостовую схему (рис. 6.7).

Мост с преобразователем, включенным в одно плечо моста ( $R_{np} = R_1$ ) (см. рис. 6.7, а). В этом случае при симметрии  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$  и выполнении условий оптимального режима работы моста ток в гальванометре

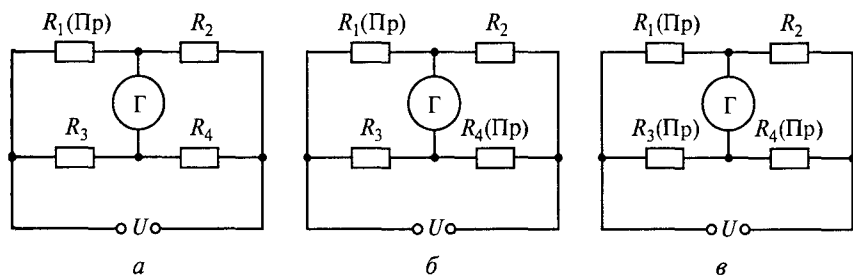


Рис. 6.7. Способы включения преобразователей в мостовую схему:  
*a* — в одно плечо моста; *б* — в противоположные плечи; *в* — в два соседних плеча

$$I_{\Gamma} = U \frac{\varepsilon}{4R_1 \left( \frac{1 + \varepsilon}{2 + \varepsilon} + \frac{1}{2} \right)}. \quad (6.13)$$

Это уравнение показывает, что при таком включении преобразователя имеет место большая степень нелинейности функции преобразования ( $\varepsilon = \Delta R_1 / R_1$  входит в числитель и знаменатель), достигающая 2...3 %.

Мост с двумя рабочими преобразователями, включенными в противоположные плечи ( $R_{\text{пр}} = R_1 = R_4$ ) (см. рис. 6.7, *б*). Данное включение применяют, если хотят увеличить чувствительность схемы. Действительно, как известно, отклонение стрелки гальванометра пропорционально разности  $R_1 R_4 - R_2 R_3$ . Если сопротивления  $R_1$  и  $R_4$  увеличатся (или уменьшатся) на одну и ту же величину, то чувствительность схемы возрастет вдвое по сравнению со схемой с одним рабочим преобразователем. При таком включении преобразователей для компенсации температурной погрешности требуется включение в остальные два плеча нерабочих преобразователей, аналогичных  $R_1$  и  $R_4$ .

Недостатком включения рабочих преобразователей является большая нелинейность функции преобразования. Действительно, при  $R_1 R_4 = R_2 R_3$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  и  $\Delta R_1 = \Delta R_4$  сила тока в гальванометре определяется по формуле

$$I_{\Gamma} = U \frac{\varepsilon}{4R \left( 1 + \frac{3}{4} \varepsilon \right)}. \quad (6.14)$$

Из этого уравнения видно, что в данном случае нелинейность шкалы будет гораздо больше, чем в предыдущем случае (7...10 %).

Мост с двумя рабочими преобразователями, включенными в два соседних плеча моста ( $R_{\text{пр}} = R_1 = R_3$ ) (см. рис. 6.7, *в*). Это преобразователи дифференциально-

го типа. Два сопротивления (активных, реактивных или полных) под действием неэлектрической величины изменяются с противоположными знаками. Тогда ток в гальванометре будет пропорционален разности:

$$I_{\Gamma} = c[(R_1 + \Delta R_2)R_4 - (R_2 - \Delta R_2)R_3],$$

где  $c$  — коэффициент пропорциональности.

При этом чувствительность схемы по сравнению со случаем включения преобразователя в одно плечо увеличится в два раза. Одновременно достигается и температурная компенсация.

При выполнении оптимальных условий (при симметрии  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_4$ ) получим

$$I_{\Gamma} = U \frac{2\varepsilon}{(2 + \varepsilon^2/2)}, \quad (6.15)$$

откуда видно, что шкала прибора с дифференциальным преобразователем имеет наибольшую линейность по сравнению с двумя предыдущими схемами (изменение сопротивления  $\varepsilon$  входит в знаменатель в квадрате и при достаточно малом  $\Delta R$  является бесконечно малой величиной). Максимальная степень нелинейности может быть около 0,5 %.

Таким образом, для достижения наибольшей чувствительности мостовой схемы в сочетании с наименьшей нелинейностью функции преобразования нужно пользоваться схемой с дифференциальным преобразователем.

Все случаи, рассмотренные выше, могут быть отнесены к мостам как постоянного, так и переменного тока, с той лишь разницей, что в мостах переменного тока вместо активного сопротивления  $R$  вводится комплексное сопротивление  $Z$ , а при балансировке моста необходимо компенсировать еще и фазовые сдвиги между током и напряжением в плечах моста.

**Выбор оптимальных параметров мостовых схем.** Известно, что если мостовая цепь работает на указатель конечного сопротивления, то для получения наибольшей чувствительности необходимо согласовывать сопротивление указателя с выходным сопротивлением моста.

**Симметричные мостовые схемы.** В практике измерения неэлектрических величин часто применяют симметричные мостовые схемы (см. рис. 6.7, а). Имеются два вида симметрии мостовых схем:

$$1) R_1 = R_2, R_3 = R_4;$$

$$2) R_1 = R_3, R_2 = R_4.$$

Первый вид симметрии получается, если активными элементами моста считать плечи  $R_1$  и  $R_2$ ; тогда максимальная сила тока в указателе будет при  $R_3 = R_4 \rightarrow 0$ . Второй вид симметрии получается,

Если активными элементами моста считать  $R_1 = R_3$ ; тогда максимальный прирост напряжения на указателе будет при  $R_2 = R_4 \rightarrow \infty$ .

Оптимальные соотношения между сопротивлениями мостовой цепи различны для каждого вида симметрии.

При симметрии  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_4$  получим выражение для мощности, получаемой указателем:

$$P_{\text{ук}} = U^2 \frac{\varepsilon^2}{32(R_{\Gamma} + R_3)},$$

где  $\varepsilon$  — чувствительность моста.

Максимум этого выражения будет при  $R_1 = R_4 \rightarrow 0$ , а условие согласования сопротивления измерителя и выходного сопротивления моста, имеющего общий вид

$$R_{\Gamma} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}, \quad (6.16)$$

окажется следующим:  $R_{\Gamma} = R_1 / 2$ . Однако при выполнении этого условия источник тока, питающий мост, должен обладать бесконечной мощностью. Если же мощность источника ограничена, то с точки зрения наилучшего использования источника тока (т.е. получение максимального КПД) наиболее выгоден равноплечий мост:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_{\Gamma}.$$

На практике большой интерес представляет соотношение мощности, получаемой указателем, к мощности преобразователя  $P_{\text{пр}}$ :

$$P_{\text{ук}}/P_{\text{пр}}.$$

При  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_4 \rightarrow 0$  мощность, получаемая указателем, оказывается равна  $P_{\text{ук}} = P_{\text{пр}}\varepsilon^2/8$ . Тогда, как в случае равноплечего моста,  $P_{\text{ук}} = P_{\text{пр}}\varepsilon^2/16$ . Таким образом, при симметрии  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$  целесообразно уменьшать величины сопротивлений  $R_3$  и  $R_4$  до значений, ограниченных мощностью источника тока.

Для симметрии  $R_1 = R_3$ ;  $R_2 = R_4$  максимум  $P_{\text{ук}}$  достигается при  $R_4 = R_1/2$  и, соответственно,  $R_{\text{ук}} = (2/3)R_1$ . При этом  $R_{\text{ук max}} = R_{\text{пр}}\varepsilon^2/24$ , т.е. меньше, чем при симметрии первого вида, и если мощность источника не ограничена, то целесообразна следующая симметрия  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$ .

Применение симметричных схем дает возможность избавиться от температурной погрешности преобразователя, так как соседнее с преобразователем плечо ( $R_2$  или  $R_3$ ) выполняется идентично. Действительно, уравнение равновесия моста выражается в виде  $R_1 R_4 = R_2 R_3$ .

Если, например, в случае первой симметрии, равные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  одновременно изменят свои величины на  $\Delta R$ ,

то, очевидно, равновесие моста не нарушится. Это свойство, правда, не относится к преобразователям, удаленным от измерительной схемы, и к термометрам сопротивлений.

Компенсационные схемы постоянного и переменного токов. Для измерения неэлектрических величин кроме мостовых схем большое распространение получили компенсационные схемы постоянного и переменного токов. Компенсационные схемы, не имеющие потребления и обладающие высокой чувствительностью, применяются для измерения малых ЭДС, развиваемых преобразователями, например термопарами. Используемые на практике самоуравновешивающиеся компенсаторы отличаются от компенсаторов с ручным управлением только тем, что часть рабочей цепи выполнена в виде реохорда, по которому скользит движок, управляемый реверсивным электродвигателем, который начинает вращаться при разбалансировке компенсационной схемы.

Индикаторы приборов для измерения неэлектрических величин могут быть разделены на две группы: указатели нуля и указатели текущего значения. Для равновесных мостов и компенсаторов постоянного тока в качестве индикаторов применяют магнитоэлектрические гальванометры. Эти гальванометры выбирают по величине сопротивления гальванометра для согласования с выходным сопротивлением схемы и по внешнему критическому сопротивлению гальванометра с тем, чтобы не создать «переуспокоенный» или «недоуспокоенный» режим движения подвижной части гальванометра.

В качестве индикаторов для равновесных мостов переменного тока служат вибрационные гальванометры, электронные приборы, телефоны, различные устройства с выпрямителями.

При выборе индикатора для неравновесных мостов руководствуются теми же требованиями, что и для равновесных. Кроме того, необходимо учитывать точность указателя, так как его погрешность в неравновесных мостах целиком входит в погрешность измерения. Для неравновесных мостов постоянного и переменного токов могут служить показывающие приборы соответственно постоянного и переменного токов всех систем.

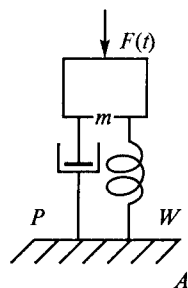
При регистрации особо быстрых процессов (ударов, взрывов и т. п.) в качестве указателей используют электронные осциллографы и результаты измерений фотографируют с экрана электронно-лучевой трубки. Такие приборы регистрируют процессы с частотами до 100 кГц и выше.

### 6.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

При выборе преобразователей для измерения переменных во времени величин (давления, ускорения и т. п.) нужно помнить о

Рис. 6.8. Физическая модель измерительного преобразователя:

$F(t)$  — внешняя переменная сила;  $P$  — демпфер (успокоитель)



погрешностях, связанных с динамическим режимом работы преобразователей и обусловленных их инерционными свойствами. Общий вид модели измерительного преобразователя представлен на рис. 6.8. Внешняя переменная сила  $F(t)$  действует на массу  $m$ , связанную с неподвижным телом  $A$  упругим элементом (например пружиной  $W$ ). В преобразователях такого вида могут быть погрешности двух типов: амплитудная и фазовая.

**Амплитудная погрешность.** Если к массе  $m$  приложена переменная сила  $F(t)$ , то при ее воздействии амплитуда колебаний массы  $m$  оказывается больше по сравнению с амплитудой перемещения ее при единичном воздействии силы. Исследования уравнения движения подвижной части преобразователей в динамическом режиме, при синусоидальном законе изменения силы  $F(t)$ , дали кривые зависимости  $\Delta = f(\lambda)$  (рис. 6.9).

*Амплитудная погрешность вынужденных колебаний* — отклонение наибольшей амплитуды колебаний в динамическом режиме (вынужденные колебания) к амплитуде перемещения подвижной части при единичном воздействии силы:

$$\Delta = X_{\max \text{ д}} / X_{\max \text{ ед}}$$

При синусоидальном колебании подвижной части амплитудная погрешность

$$\Delta = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^2 + 4\beta^2\lambda^2}},$$

где  $\lambda = \omega/\omega_0$  — отношение угловой частоты вынужденных колебаний к частоте  $\omega_0$  собственных колебаний подвижной части;  $\beta = P/P_{\text{кр}}$  — степень успокоения подвижной части;  $P_{\text{кр}}$  — коэффициент успокоения при критическом режиме движения массы, т. е. при наименьшем времени успокоения.

Из кривых на рис. 6.9 видно, что при малых значениях  $\beta$  максималь-

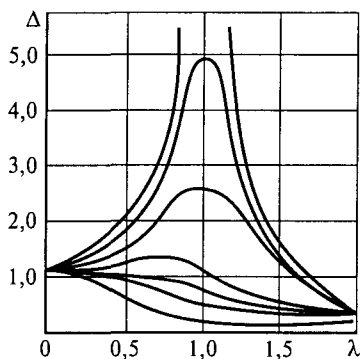


Рис. 6.9. Амплитудная погрешность преобразователей

ная амплитудная погрешность имеет место при  $\lambda = 1$ , т. е. при резонансе ( $\omega = \omega_0$ ). Поэтому преобразователи перемещений и сил, работающие в динамическом режиме, должны иметь  $\lambda = \omega/\omega_0$  много меньше единицы, т. е. должны иметь собственную частоту  $\omega_0$  больше частоты измеряемого процесса  $\omega$ .

Если собственная частота преобразователя  $\omega_0$  будет меньше частоты измеряемого процесса  $\omega$ , деталь (масса  $m$ ) может выйти из соприкосновения с силой  $F$  и измерения будут неверными. Из кривых на рис. 6.9 видно, что амплитудная погрешность  $\Delta$  зависит также от степени успокоения подвижной части преобразователя и имеет наименьшее значение при  $\beta = 0,6 \dots 0,7$ .

**Фазовая погрешность.** Фазовая погрешность преобразователей выражается в запаздывании вынужденных колебаний подвижной части от колебаний измеряемой величины (рис. 6.10). Из рисунка видно, что при  $\beta = 0,7$  изменение фазовой погрешности имеет почти линейную зависимость от  $\lambda$ , а  $\Psi$  меньше при малом  $\lambda$ . Фазовую погрешность можно вычислить по формуле

$$\Psi = \arctg \frac{2\beta\lambda}{\lambda^2 - 1}.$$

Таким образом, при измерении переменных во времени механических величин во избежание больших амплитудных и фазовых погрешностей важно так подобрать параметры преобразователя, чтобы обеспечить соответствующее соотношение частоты собственных колебаний преобразователя и частоты измеряемого процесса (вынужденных колебаний), а также степень успокоения подвижной части преобразователя  $\beta = 0,6 \dots 0,7$ .

**Погрешности системы преобразования.** Основная погрешность прибора, состоящего из цепи измерительных преобразователей, складывается главным образом из двух составляющих:

- инструментальной погрешности, обусловленной погрешностями элементов, входящих в каждое звено (например, погрешность подгонки сопротивлений, трение в подвижных частях механизма, недостаточная тщательность исполнения деталей звена);

- погрешности из-за недостаточной чувствительности усилителя и индикаторов.

Каждое из звеньев цепи вносит свою долю в результирующую основную погрешность прибора, причем при прямом преобразовании все звенья равноценны по степени влияния на общую погрешность. Поэтому стремятся всегда уменьшить число звеньев цепи преобразования.

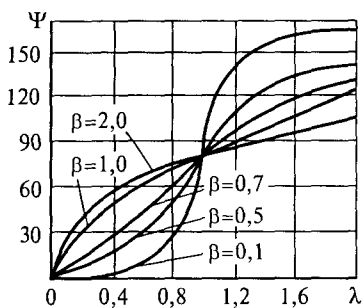


Рис. 6.10. Фазовая погрешность преобразователей



Точность измерения неэлектрической величины зависит также и от ряда дополнительных факторов, которые также необходимо учитывать. К ним относятся изменения напряжения, частоты и формы кривой напряжения питания, а также окружающей температуры, влажности и вибрации.

Влияние дополнительных факторов можно оценить чувствительностью каждого звена к тому или иному фактору, т.е. отношением изменения выходной величины преобразователя данного звена к изменению дополнительного фактора (относительно его значения при градуировке).

Дополнительные факторы вызывают дополнительную составляющую погрешности нуля и чувствительности прибора. Действительно во всех мостовых цепях (кроме равновесных мостов) при изменении питающего напряжения появляется погрешность чувствительности; в усилителях изменяется чувствительность. При изменении температуры изменяются жесткость упругих элементов, индукция постоянных магнитов, магнитные свойства ферромагнитных материалов. Кроме того, погрешности нуля и чувствительности прибора могут быть вызваны изменением во времени параметров отдельных элементов схемы, шумами в элементах схемы, наводками промышленной частоты и т.д.

Для уменьшения дополнительных погрешностей прибегают к стабилизации напряжения и частоты источников питания, к различным приемам коррекции этих погрешностей и особенно заботятся о стабильности во времени физических свойств и параметров элементов прибора.

Кроме того, при анализе погрешностей сложных измерительных устройств, состоящих из целого ряда самостоятельных звеньев, не всегда можно строго разграничить погрешности на систематические и случайные.

Например, погрешность измерения от колебаний напряжения питающей сети с первого взгляда представляется систематической, так как на каждые  $\pm 10\%$  питающего напряжения прибор может иметь  $\pm 1\%$  изменения чувствительности. Однако мгновенные изменения питающего напряжения сети происходят хаотически и погрешность измерения, возникающая из-за этого, хотя и является однозначной функцией этого напряжения, но будучи функцией случайной величины, представляет собой также случайную величину. Это сильно затрудняет суммирование погрешностей измерительных устройств. Поэтому при анализе и выборе метода и суммирования погрешностей сложных измерительных устройств следует делить погрешности не на систематические и случайные, а по признаку их сильной или слабой взаимной корреляционной связи. Если ряд погрешностей одного или нескольких преобразователей вызывается одной общей причиной, в результате чего они оказываются сильно связаны между собой, то эти погрешности будут

распределены по одному и тому же закону, а форма результирующего закона распределения будет также соответствовать этому закону. Поэтому внутри каждой из этих групп погрешности должны складываться алгебраически с учетом их знака.

Результирующие погрешности, полученные после суммирования в каждой из групп, уже не имеют между собой сильных корреляционных связей и должны рассматриваться как независимые, следовательно, должны складываться геометрически.

#### 6.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Преобразователи обычно классифицируются по принципу работы или практическому применению.

По назначению измерительные преобразователи делят на первичные преобразователи (датчики), унифицированные и промежуточные.

*Первичный преобразователь* является первым в измерительной цепи и включает в себя чувствительный элемент (зонд, мембрану) и другие необходимые элементы для преобразования входной неэлектрической величины в выходную электрическую величину. Датчик может состоять из одного или нескольких измерительных преобразователей, объединенных в единую конструкцию. На датчик непосредственно воздействует измеряемая неэлектрическая величина (сила, давление, уровень, температура и т.д.).

*Унифицированный преобразователь* состоит из датчика и схемы согласования, измеряемая физическая величина преобразуется с использованием источника энергии в нормированную выходную величину. Нормированные сигналы постоянного тока находятся в диапазоне  $0... \pm 5$  мА или  $0... \pm 20$  мА. Для устройств со смещенным нулем диапазон тока сужен:  $\pm 1... \pm 5$  мА или  $\pm 4... \pm 20$  мА.

При необходимости регулирования границы диапазона токовых сигналов лежат в пределах: нижняя  $0... 5$  мА, верхняя  $12... 25$  мА. В устройствах с нормированными токовыми сигналами допускается применение различных измерительных приборов с внутренним сопротивлением не более  $1$  кОм. Нормированные значения диапазонов сигналов напряжения составляют  $0... \pm 1$  В и  $0... \pm 10$  В, причем внутреннее сопротивление измерительных приборов не должно быть менее  $1$  кОм. При использовании в качестве выходной величины частоты рекомендуемый диапазон ее изменения составляет  $5... 25$  Гц. В пневматических системах нормировано давление газа. Оно должно находиться в диапазоне  $0,02... 0,1$  МПа.

*Промежуточный преобразователь* получает сигнал измерительной информации от предшествующего преобразователя и передает после преобразования этот сигнал последующему преобразователю.

По характеру преобразования входной величины измерительные преобразователи делят на *линейные* и *нелинейные*. У линейных преобразователей функциональная зависимость между входной и выходной величинами линейная; у нелинейных преобразователей — нелинейная.

По принципу действия датчики делятся на *генераторные* и *параметрические*. Выходным сигналом генераторных датчиков являются ЭДС, напряжение, ток или электрический заряд, функционально связанные с измеряемой величиной, например ЭДС термопары. В параметрических датчиках измеряемая величина вызывает пропорциональное ей изменение параметра электрической цепи ( $R, L, C$ ), например сопротивления реостатного датчика. К генераторным относятся: индукционные, пьезоэлектрические, термоэлектрические и некоторые разновидности электрохимических датчиков. Остальные датчики являются параметрическими.

По принципу действия их также подразделяют на типы:

*резистивные*, в которых измеряемая величина преобразуется в изменение его сопротивления;

*электромагнитные*, в которых измеряемая величина преобразуется в изменение индуктивности или взаимной индуктивности;

*емкостные*, в которых измеряемая величина преобразуется в изменение емкости;

*пьезоэлектрические*, в которых динамическое усилие преобразуется в электрический заряд;

*гальваномагнитные*, основанные на эффекте Холла и преобразующие действующее магнитное поле в ЭДС;

*тепловые*, в которых измеряемая температура преобразуется в ЭДС или в величину термосопротивления;

*оптоэлектронные*, в которых оптические сигналы преобразуются в электрические.

Для датчиков основными характеристиками являются: тип, диапазон измеряемой величины, диапазон рабочих температур и погрешность в этом диапазоне, обобщенное входное и выходное сопротивление, частотная характеристика.

Области применения датчиков чрезвычайно разнообразны. Благодаря внедрению новых технологий изготовления (высоковакуумное напыление, распыление, химическое осаждение из газовой фазы, фотолитография и т.д.) и новых материалов непрерывно расширяются сферы их применения. Рассмотрим лишь некоторые из них.

В промышленной технике стандартные датчики используют для измерения: расхода, объема; давления; температуры; уровня; химического состава.

Тип преобразователя	Применение								
	Давление (сила)	Смещение	Положение	Скорость	Ускорение	Вибрация	Температура	Магнитный поток	Оптические измерения
Тензодатчик	•	•	•	•	•	•			
Потенциометрический	•	•	•	•	•				
Линейный дифференциальный трансформатор	•	•	•	•	•				
Переменная индуктивность		•	•	•	•	•			
Эффект Холла		•	•					•	
Вихревой ток		•	•	•					
Магнито-резистивный		•	•					•	
Емкостный датчик	•	•	•		•	•			
Пьезоэлектрический*	•	•		•	•	•			
Термометр сопротивления							•		
Термистор							•		
Термопара*							•		
Фотоэлемент									•
Фотосопротивление									•
Фотогальванический элемент*									•

\* Автогенерирующие, или активные, приборы.

Из стандартных датчиков все большим спросом пользуются датчики новых типов, например:

- датчики положения, перемещения и изображения;
- оптические и волоконно-оптические датчики;
- биодатчики (биотехнология);
- многокоординатные датчики (распознавание образов).

Для современных производств характерна тенденция применения датчиков в интерактивном режиме, т. е. когда результаты измерений сразу же используются для регулирования процесса. Благодаря этому в любой момент обеспечивается корректировка технологического процесса, что естественно ведет к более рациональному производству. При промышленном применении определяющим фактором является погрешность, которая при регулировании процессов должна быть не более 1 ... 2 %, а для задач контроля — 2 ... 3 %.

В робототехнике, которая в принципе представляет собою сложную информационную систему, робот обеспечивает получение, обработку и преобразование информации. При получении информации через датчики роботу требуется прежде всего способность «видеть» и «ощупывать», т. е. использование оптических и многокоординатных датчиков.

При изготовлении датчиков для автомобильной электроники все в большей мере применяют современные технологии, обеспечивающие экономичное изготовление датчиков минимальных размеров для отдельных систем автомобиля (рулевое управление, двигатель, тормоза, электроника кузова), для обеспечения безопасности и надежности (система блокировки и противоугонная система), информационная система (расход топлива, температура, маршрут движения и т. д.). С помощью этих датчиков измеряются различные физические параметры — температура, давление, скорость вращения, ускорение, влажность, перемещение или угол, расход и т. д. Требования к этим датчикам в отношении воздействия окружающей среды достаточно высокие. В табл. 6.1 приведены области применения некоторых типов датчиков.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите достоинства электрических методов измерения неэлектрических величин.
2. Изобразите графически структурную схему:
  - а) прибора прямого преобразования;
  - б) прибора уравнивающего преобразования;
  - в) прибора с отрицательной обратной связью.
3. Запишите аналитическое выражение:
  - а) для определения чувствительности прибора;
  - б) для определения эффективности преобразования прибора.

4. Изобразите графически эквивалентную схему измерительной цепи прибора.

5. Дайте определение эффективности преобразования, характеристического сопротивления, обобщенного входного и выходного сопротивлений преобразователя.

6. Сформулируйте преимущества равновесных мостовых схем.

7. Сформулируйте основное отличие равновесных мостовых схем от неравновесных.

8. Приведите способы включения преобразователей в мостовые схемы.

9. Перечислите основные виды симметрии мостовых схем и условия оптимального выбора параметров.

10. Как осуществляется выбор индикаторов к мостовым и компенсационным схемам?

11. Приведите классификацию первичных преобразователей.

12. Какие преобразователи относятся к генераторным?

13. Какие преобразователи относятся к параметрическим?

14. Перечислите погрешности преобразователей в динамическом режиме их работы.

15. Приведите физическую модель измерительного преобразователя

16. Опишите основные источники погрешности приборов для измерения неэлектрических величин.

17. Как находится общая погрешность системы преобразования?

18. Приведите примеры использования датчиков для различных областей применения.

# ГЛАВА 7

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 7.1. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

*Фотоэлектрическими* называются такие преобразователи, у которых выходной сигнал изменяется в зависимости от светового потока, падающего на преобразователь. Явление фотоэффекта было открыто русским ученым А. Г. Столетовым в 1888 г.

Фотоэлектрические преобразователи или, как мы будем их называть в дальнейшем, фотоэлементы делятся на три типа: фотоэлементы с внешним фотоэффектом, фотоэлементы с внутренним фотоэффектом и фотогальванические преобразователи.

Рассмотрим отдельные типы фотоэлементов с точки зрения их характеристик и применения.

**Фотоэлементы с внешним фотоэффектом.** Они представляют собой вакуумные или газонаполненные сферические стеклянные баллоны, на внутреннюю поверхность которых наносится слой фоточувствительного материала, образующий катод. Анод выполняется в виде кольца или сетки из никелевой проволоки. В затемненном состоянии через фотоэлемент проходит темновой ток, как следствие термоэлектронной эмиссии (порядка  $10^{-12}$  А) и утечки между электродами (порядка  $10^{-10} \dots 10^{-7}$  А). При освещении фотокатод под влиянием фотонов света имитирует электроны. Если между анодом и катодом приложено напряжение, то эти электроны образуют электрический ток. При изменении освещенности фотоэлемента, включенного в электрическую цепь, изменяется соответственно фототок в этой цепи. Выходные токи вакуумных фотоэлементов не превышают нескольких микроампер. Значительное усиление тока фотоэмиссии (порядка 1 мА) получают в фотоумножителях.

Газонаполненный фотоэлемент аналогичен вакуумному, но имеет определенное газовое наполнение. Благодаря ионизации газа происходит повышение чувствительности фотоэлемента и увеличение тока фотоэмиссии. К газонаполненным фотоэлементам относятся, например, кислородно-цезиевые типа ЦГ; к вакуумным — кислородно-цезиевые типа ЦВ и сурьмяно-цезиевые типа СЦВ.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом, как правило, требуют применения усилителей, так как их мощность очень мала.

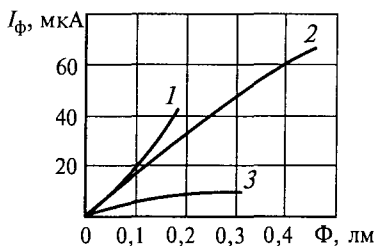


Рис. 7.1. Световая характеристика фотоэлемента:

- 1 — кислородно-цезиевого типа ЦГ;  
 2 — сурьмяно-цезиевого типа СЦВ;  
 3 — вакуумного типа ЦВ

Чувствительность газонаполненных фотоэлементов значительно выше вакуумных и составляет 100... 250 мкА/лм.

Вольт-амперные характеристики вакуумных и газонаполненных фотоэлементов (рис. 7.2, а, б) имеют различный характер кривых насыщения. Преобразование светового потока в ток в вакуумных фотоэлементах зависит от напряжения питания фотоэлемента весьма незначительно, а это значит, что в данном случае динамическое сопротивление фотоэлемента остается практически неизменным.

Чувствительность газонаполненных фотоэлементов (см. рис. 7.2, б) сильно зависит от напряжения питания, поэтому оно должно стабилизироваться и не превышать 100... 240 В, так как выше этого значения идет область самостоятельного разряда.

На практике широко используют вакуумные фотоэлементы, имеющие бесспорные преимущества перед газонаполненными: независимость в определенном диапазоне от питающего напряжения, высокая температурная устойчивость, меньшая утом-

Как видно из световых характеристик фотоэлементов различных типов (рис. 7.1), пропорциональность между фототоком и световым потоком сохраняется не на всем протяжении кривых 1—3, что важно учитывать для получения линейной шкалы измерительного прибора.

Отношение тока, усиленного за счет ионизации, к первичному фототоку называется *коэффициентом газового усиления*, который может достигать значения 6... 7. Чув-

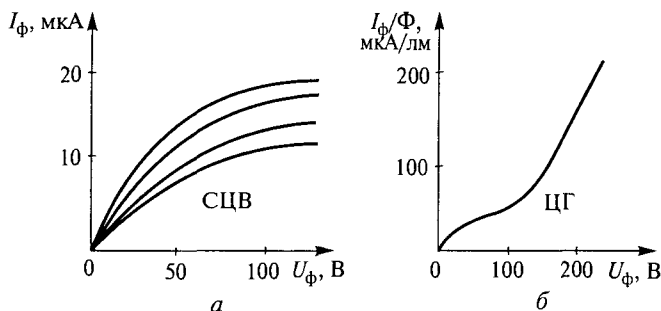


Рис. 7.2. Вольт-амперные характеристики фотоэлементов:  
 а — вакуумных; б — газонаполненных



ляемость и инерционность (преобразование светового потока в ток в них осуществляется практически безынерционно).

### **Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы).**

Они представляют собой однородную полупроводниковую пластинку с контактами, например из селенида кадмия, которая под действием светового потока изменяет свое сопротивление. Внутренний фотоэффект заключается в появлении свободных электронов, выбитых квантами света из электронных орбит атомов, остающихся свободными внутри вещества. Появление свободных электронов в материале, например в полупроводнике, эквивалентно уменьшению электрического сопротивления. Фоторезисторы имеют высокую чувствительность и линейную вольт-амперную характеристику (ВАХ), т. е. их сопротивление не зависит от приложенного напряжения. Темновое сопротивление, чувствительность, инерционность зависят от температуры. Для уменьшения температурной погрешности рекомендуется включать фоторезисторы в смежные плечи моста.

Внутренний фотоэффект наиболее сильно выражен у таких полупроводников, как селен Se, сернистый свинец PbS, сернистый кадмий CdS, селенид кадмия CdSe и др. В зависимости от силы света электрическое сопротивление фоторезистора изменяется в пределах от 100 Ом до 1 кОм. Спектральная чувствительность определяется выбором материала. Так, CdS обладает максимальной чувствительностью в зеленой области спектра, поэтому он особенно пригоден для применения в измерителях освещенности. В противоположность этому максимум спектральной чувствительности CdSe находится в красной области, а у фоторезисторов из PbS/PbSe — в инфракрасной области. Фоторезисторы могут иметь самые разнообразные конструктивные решения, обеспечивающие разнообразие возможностей применения. Они обладают высокой удельной чувствительностью (до 7000 мкА/лмВ), что в некоторых случаях дает возможность обойтись без усилителей, низким тем-

пературным коэффициентом  $\left(-0,2\% \frac{1}{\text{град}}\right)$ , сравнительно большой мощностью рассеивания (0,6...0,7 Вт); имеют практически неограниченный срок службы и достаточно стабильны. К недостаткам этих фотоэлементов можно отнести значительную инерционность и сравнительно высокий уровень шумов.

**Фотогальванические преобразователи (фотодиоды и фототранзисторы).** Данные преобразователи представляют собой активные светочувствительные полупроводники, создающие при поглощении света вследствие фотоэффектов в запиорном слое свободные электроны и ЭДС.

*Фотодиод* (ФД) может работать в двух режимах — фотодиодном и генераторном (вентильном). *Фототранзистор* — полупро-

водниковый приемник лучистой энергии с двумя и бóльшим числом  $p-n$ -переходов, в которых совмещен фотодиод и усилитель фототока.

Фототранзисторы, как и фотодиоды, применяются для преобразования световых сигналов в электрические. Однако в фототранзисторах наличие второго  $p-n$ -перехода увеличивает собственные шумы. Их чувствительность почти в два раза выше, чем у фотодиодов, и они обладают электрической и технологической совместимостью с интегральными схемами.

**Вентильные фотоэлементы.** Из них наибольшее распространение получили селеновые и сернисто-серебряные. Эти фотоэлементы обладают тем свойством, что под действием лучистой энергии они становятся источниками тока. По этому признаку их можно было бы отнести к генераторным преобразователям, однако, чтобы не разбивать группу фотоэлектрических преобразователей, их целесообразно рассмотреть в данном разделе.

Работу фотоэлементов можно оценить по следующим характеристикам:

*световая характеристика* — зависимость фототока от интенсивности светового потока, падающего на фотоэлемент  $I_{\Phi} = f(\Phi)$ ;

*спектральная характеристика* — зависимость фототока от длины волны световых лучей  $I_{\Phi} = f(\lambda)$ ;

*частотная (инерционная) характеристика* — зависимость фототока от частоты изменения интенсивности падающего светового потока  $I_{\Phi} = f(f_{\text{п}})$ .

*вольт-амперная характеристика (ВАХ)* — зависимость фототока от напряжения  $I_{\Phi} = f(U)$ ;

*температурная характеристика* — изменение фототока от температуры фотоэлемента  $I_{\Phi} = f(t^{\circ})$ . Однако от изменения температуры зависит и спектральная характеристика фотоэлемента;

*усталость фотоэлемента* — изменение характеристик фотоэлементов в зависимости от времени его работы.

В фотодиодном режиме к ФД приложено запирающее напряжение. При отсутствии облучения под действием этого напряжения проходит лишь небольшой темновой ток, а при освещении  $p-n$ -перехода этот ток линейно увеличивается в зависимости от интенсивности облучения. В фотодиодном режиме ФД может рассматриваться как резистор и включаться в схемы делителей или мостовые измерительные цепи, позволяющие уменьшить влияние дрейфа темнового тока. Фотодиоды по напряжению питания хорошо согласуются с полупроводниковыми электронными элементами, поэтому используются в схемах совместно с операционными усилителями. Фоторезисторы широко применяются в преобразователях перемещений.

В генераторном (вентильном) режиме ФД сам является источником тока. Высокая чувствительность вентильных

фотоэлементов во многих практических случаях вполне позволяет обойтись без усиления фототоков.

Наиболее распространенными являются селеновые, сернисто-серебряные и кремниевые фотоэлементы. У селеновых фотоэлементов чувствительность составляет примерно 400...500 мкА/лм, а у сернисто-серебряных и кремниевых — 7000 мкА/лм. Селеновые фотоэлементы более стабильны и имеют большой срок службы. Кремниевые фотоэлементы практически безынерционны ( $\tau = 10^{-6}$  с), стабильны и имеют низкий уровень шумов. Сила тока на выходе преобразователя с вентильным фотоэлементом на линейном участке характеристики (рис. 7.3) определяется по формуле

$$I_{\text{вых}} = S_{\Phi} \Phi,$$

где  $S_{\Phi}$  — чувствительность фотоэлементов (с учетом нагрузки);  $\Phi$  — световой поток.

До освещенности 1000 лк чувствительность кремниевых фотодиодов постоянна и составляет 0,1...2 мкА/лк. Они имеют энергетический КПД до 11 %, поэтому применяются также для электропитания электронных измерительных приборов, например, в виде солнечных элементов кварцевых часов, батарей на спутниках и т.д. Они могут использоваться при температурах до 150°C.

Упрощенная принципиальная схема включения вентильного элемента приведена на рис. 7.4. Здесь измеритель И включается непосредственно к зажимам фотоэлемента  $\Phi$ , который под действием света является источником тока.

Принципиальная схема включения фотоэлемента в фотодиодном режиме изображена на рис. 7.5.

В зависимости от степени освещенности фотоэлемента меняются показания вольтметра  $V$ . Схемы с усилителями постоянного тока очень чувствительны к помехам и к нестабильности напряжения источника питания. Это вызывает большие погрешности измерения, поэтому для усиления фототоков часто приме-

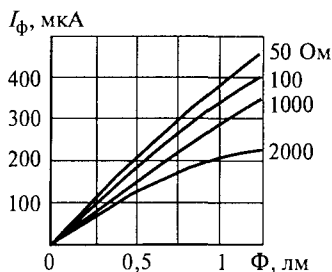


Рис. 7.3. Зависимость  $I = f(\Phi)$  для кремниевых фотоэлементов

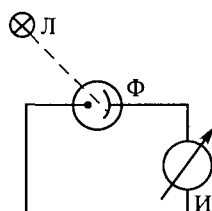


Рис. 7.4. Схема включения вентильного элемента

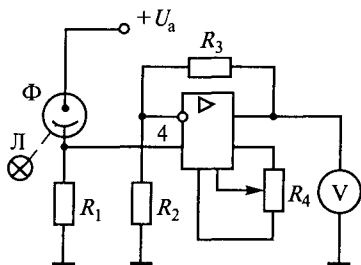


Рис. 7.5. Схема включения фотоэлемента

Для исключения этих погрешностей применяют дифференциальные фотоэлектрические преобразователи. Наилучший результат дает применение дифференциальных преобразователей в нулевом режиме метода сравнения (рис. 7.6). Здесь распределение напряжения между двумя фотоэлементами  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  определяется отношением падающих на них световых потоков и не зависит от абсолютного значения последних.

Следует отметить, что избавление от погрешностей дает применение дифференциальных преобразователей лишь в нулевом режиме схемы сравнения. Погрешности, обусловленные изменением напряжения питания  $U$  фотоэлементов, а также изменением характеристик фотоэлементов во времени у приборов с дифференциальными преобразователями, работающими в неравновесном режиме, имеют место в той же мере, что и у приборов с недифференциальными преобразователями.

Добиться исключения влияния непостоянства характеристик можно, используя дифференциальный преобразователь с одним фотоэлементом (рис. 7.7). Свет от лампы Л разделяется на два пучка. При помощи дополнительных зеркал З оба пучка попадают на фотоэлемент  $\Phi$ . На пути обоих пучков света помещен вращающийся от синхронного двигателя Дв диск с зубцами D. Диск выполнен таким образом, что его зубцы поочередно перекрывают то один, то другой пучок, модулируя таким образом световой поток.

При равенстве световых потоков освещения фотоэлемента остается постоянным; при их неравенстве возникает переменная составляющая фототока, усиливаемая электронной цепью.

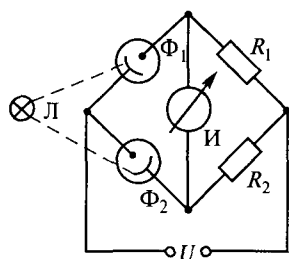


Рис. 7.6. Включение преобразователей по дифференциальной схеме

Фотоэлектрические преобразователи в настоящее время широко применяют для измерения различных неэлектрических величин, особенно в системах автоматического контроля и регулирования: температуры тела, качества поверхности, скорости вращения, концентрации растворов и т.д. Рассмотрим принцип использования фотоэлементов для измерения неэлектрических величин.

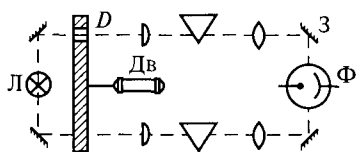


Рис. 7.7. Дифференциальный преобразователь с одним фотоэлементом

**Фотоэлектрические тахометры.** Принцип действия фотоэлектрических тахометров состоит в измерении частоты переменного тока фотоэлемента, освещенного световым потоком, модулированной вращающимся объектом измерения.

На рис. 7.8 изображен принцип использования фотоэлемента для измерения угловой скорости вращения  $\omega_x$  вала. Здесь прерывание светового потока, падающего на фотоэлемент  $\Phi$  от источника питания  $L$ , осуществляется с помощью диска  $D$  с прорезями, который вращается вместе с валом. Далее сигнал усиливается  $OY$ , поступает на двоичный счетчик  $Cт2$ , дешифратор  $ДС$ .

Счетчик  $HL$  регистрирует число затемнений фотоэлемента, которое является функцией скорости вращения вала.

**Нефелометры.** Фотоэлектрические приборы, измеряющие мутность растворов, называются *нефелометрами*. На рис. 7.9 показана оптическая схема прибора для контроля мутности исследуемой среды ИС методом сравнения с образцовой средой ОС.

Свет от источника  $L$  при помощи зеркал  $З_1$  и  $З_2$  и линз  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_4$  направляется через кювету с испытуемым раствором на фотосопротивление  $\Phi C_1$  и через образцовую среду — на фотосопротивление  $\Phi C_2$ . Диафрагмы  $D_1$  и  $D_2$  регулируют освещенность фотосопротивлений. Во время измерений сопротивление

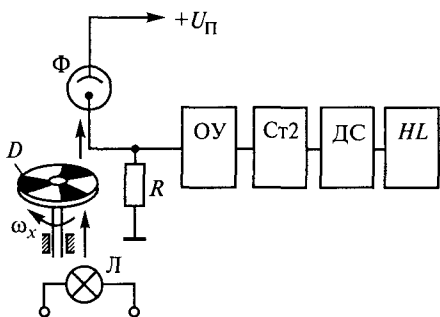


Рис. 7.8. Схема измерения угловой скорости вращения вала

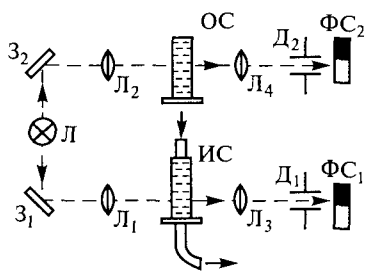


Рис. 7.9. Схема прибора для контроля мутности растворов

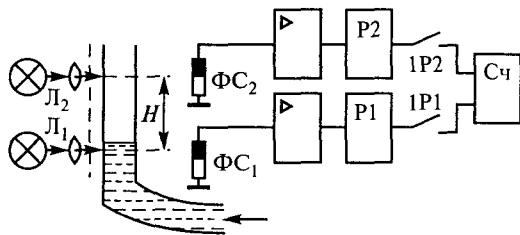


Рис. 7.10. Принципиальная схема расходомера

$\Phi C_2$  остается неизменным, а  $\Phi C_1$  изменяется в зависимости от большего или меньшего поглощения светового потока исследуемой средой.

При изменении сопротивления  $\Phi C_1$ , т. е. при увеличении мутности раствора ИС, в схему управления поступает сигнал о нарушении режима или управляющий импульс для приведения в действие регулирующего органа.

**Фотоэлектрические расходомеры.** Применение фотоэлементов позволило создать ряд надежных и простых расходомеров жидкостей и газов.

На рис. 7.10 представлена схема расходомера, принцип действия которого основан на автоматическом измерении длительности наполнения объема определенной величины. Действие такого расходомера заключается в следующем: при достижении уровня нижнего фотосопротивления  $\Phi C_1$  жидкость поглощает часть световой энергии, направленной на  $\Phi C_1$ , его сопротивление возрастает, реле P1 выключается, и через контакт 1P1 запускается счетчик времени Сч. При заполнении жидкостью калиброванной трубки до уровня верхнего фотосопротивления  $\Phi C_2$  выключается реле P2 и его контакт 1P2 отключает счетчик.

Объемный расход жидкости

$$\theta = \frac{\pi d^2 H}{4\tau},$$

где  $d$  — внутренний диаметр трубы;  $H$  — расстояние между оптическими осями  $\Phi C_1$  и  $\Phi C_2$ ;  $\tau$  — время, отсчитанное счетчиком Сч.

При постоянном значении  $H$  показания счетчика будут соответствовать определенному расходу жидкости.

## 7.2. ЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Емкостный преобразователь представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется под действием измеряемой неэлектрической величины.

В качестве емкостного преобразователя широко используют плоский конденсатор, емкость которого можно выразить формулой

$$C = \epsilon_0 \epsilon S / \delta, \quad (7.1)$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная воздуха ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора;  $S$  — площадь обкладки;  $\delta$  — расстояние между обкладками.

Так как измеряемая неэлектрическая величина может быть функционально связана с любым из этих параметров, то устройство емкостных преобразователей может быть самым различным в зависимости от области применения. Для измерения уровней жидких и сыпучих тел используют цилиндрические или плоские конденсаторы; для измерения малых перемещений, быстроизменяющихся сил и давлений — дифференциальные емкостные преобразователи с переменным зазором между обкладками. Рассмотрим принцип использования емкостных преобразователей для измерения различных неэлектрических величин.

**Емкостный уровнемер.** На рис. 7.11 показано устройство емкостного преобразователя для измерения уровня — емкостный уровнемер. Он представляет собой коаксиальный конденсатор.

Его электроды 1 и 2 изолированы друг от друга. Емкость  $C$  такого преобразователя может быть определена как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов; один из них  $C_1$  образован частью электродов и диэлектриком — жидкостью, уровень которой измеряется, а другой  $C_2$  — остальной частью электродов и диэлектриком — воздухом:

$$C = C_1 + C_2 = [l\epsilon + (l_0 - l)\epsilon_0] \frac{2\pi}{\ln(R_1/R_2)}, \quad (7.2)$$

где  $l_0$  — полная длина преобразователя, м;  $l$  — длина преобразователя, заполненного жидкостью, м;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная воздуха, Ф/м;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость жидкости;  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы внешнего и внутреннего цилиндров, м.

Таким образом, по мере заполнения преобразователя жидкостью, его емкость будет изменяться в функции от уровня.

**Толщиномер.** На рис. 7.12 представлен принцип действия емкостного толщиномера, измеряющего толщину ленты 2 из диэлектрика (например резины).

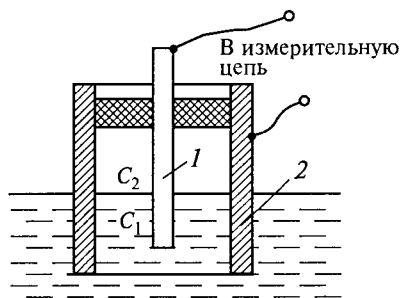


Рис. 7.11. Емкостный уровнемер:  
1, 2 — электроды

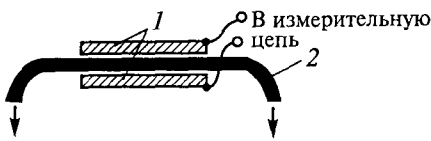


Рис. 7.12. Емкостной толщиномер:  
1 — обкладки конденсатора; 2 — лента

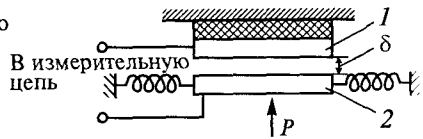


Рис. 7.13. Измеритель перемещения  
1, 2 — обкладки преобразователя

Лента протягивается между обкладками 1 конденсатора, и в зависимости от ее толщины изменяется диэлектрическая проницаемость межэлектродного пространства. Если обозначить длину зазора между обкладками конденсатора через  $\delta$ , толщину ленты диэлектрика  $\delta_d$ , а диэлектрическую проницаемость ленты через  $\epsilon_d$ , то емкость можно выразить формулой

$$C = \frac{S}{\frac{\delta - \delta_d}{\epsilon_0} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}}$$

**Измерители силы и перемещений.** При измерении механической силы или перемещения используют зависимость емкости от расстояния  $\delta$  между обкладками 1 и 2 преобразователя (рис. 7.13).

Зазор  $\delta$  изменяется в зависимости от величины измеряемого усилия или перемещения.

Схемы с дифференциальным преобразователем (рис. 7.14) имеют большую чувствительность и точность. Обкладка 2 закреплена на пружинах и перемещается параллельно самой себе под воздействием измеряемой силы  $P$ . Обкладки 1 и 3 неподвижны. Емкость между обкладками 2 и 3 увеличивается, а между обкладками 1 и 2 уменьшается.

Емкостные преобразователи для измерения малых перемещений (порядка  $10^{-6} \dots 10^{-3}$  м) отличаются высокой чувствительностью, линейностью, малыми погрешностями и одновременно простотой конструкции и легкостью подвижной части, что в ряде случаев делает их незаменимыми.

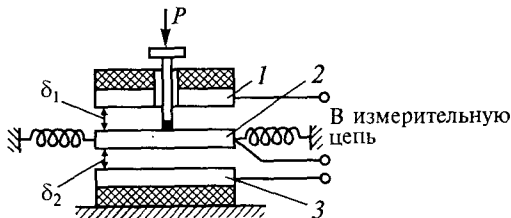


Рис. 7.14. Дифференциальный измеритель силы  $P$ :  
1 — 3 — обкладки измерителя



**Измеритель угла поворота.** На рис. 7.15 изображен принцип устройства емкостного преобразователя для измерения угла поворота вала.

Подвижная обкладка измерителя 2, жестко скрепленная с валом 3, перемещается относительно неподвижной обкладки 1 так, что зазор между обкладками сохраняется неизменным, а изменяется действующая площадь обкладок, а следовательно, и емкость преобразователя. Рабочий зазор  $\delta$  несоизмеримо мал по отношению к зазору  $\delta_1$ .

Путем соответствующего выбора формы пластин можно получить любую функциональную зависимость между изменением емкости и входным угловым перемещением. Подобного типа преобразователи применяют и для измерения линейных перемещений.

**Измеритель влажности.** Емкостные преобразователи используют для измерения влажности различных веществ: пряжи, волокна, кожи, зерна и т. д. На рис. 7.16 представлено устройство преобразователя для измерения влажности волокна или пряжи.

Цилиндрический конденсатор заполняется исследуемой пряжей или волокном и включается в одно из плеч измерительного моста.

Так как вода имеет очень высокую относительную диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon_{H_2O} = 81$ ) по сравнению с  $\epsilon$  для остальных веществ ( $\epsilon = 1 \dots 6$ ), то в зависимости от влажности испытуемого вещества диэлектрическая проницаемость, а следовательно, и емкость преобразователя будут изменяться.

**Измерительные цепи с емкостными преобразователями.** В большинстве случаев емкостные преобразователи включаются в мостовые цепи переменного тока. Для повышения точности и чувствительности емкостный преобразователь делается дифференциальным и включается в соседние плечи моста (рис. 7.17).

Для того чтобы реализовать преимущества емкостных преобразователей, необходимо выполнить ряд требований к измерительной цепи.

Емкостные преобразователи, как правило, имеют малую емкость (десятки — сотни пикофарад) и поэтому при промышленной частоте обладают весьма малой мощностью. Например,

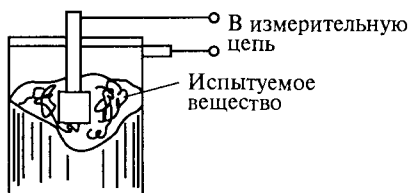
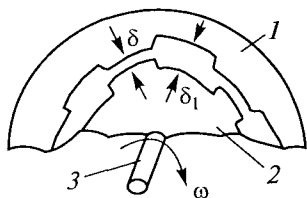


Рис. 7.15. Измеритель угла поворота вала:

1, 2 — соответственно неподвижная и подвижная обкладки измерителя;  
3 — вал

Рис. 7.16. Измеритель влажности вещества

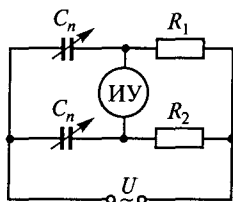


Рис. 7.17. Дифференциальная схема включения емкостных преобразователей

если преобразователь имеет емкость  $C = 100$  пФ, то при частоте  $f = 50$  Гц и напряжении питания  $U = 50$  В получаем

$$P_{\text{Пр}} = U^2 \omega C = 50^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-12} = 80 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Так как мощность измерителя должна быть меньше мощности преобразователя, то, очевидно, в качестве измерителя можно использовать только электронный прибор.

Сопротивление емкостного преобразователя очень велико. Для приведенного выше преобразователя имеем

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \cong 30 \text{ МОм}.$$

Такое сопротивление преобразователя требует большого сопротивления в выходной диагонали моста. Этому условию удовлетворяют электронные приборы, имеющие высокое входное сопротивление. Кроме того, при таком большом сопротивлении преобразователя должны быть очень высокими требования к изоляции измерительной цепи и измерителя. Если сопротивление преобразователя сравнимо с сопротивлением изоляции цепи измерителя, то токи утечки будут сравнимы с током в преобразователе. Поэтому емкостные преобразователи часто применяют в цепях повышенной частоты, что сильно увеличивает его мощность и уменьшает сопротивление.

Во избежание наводок все подводящие провода необходимо тщательно экранировать, а точки заземления экранов выбрать так, чтобы в цепи не было элементов, шунтирующих рабочие емкости.

Напряжение питания преобразователя должно быть ограничено из-за опасности пробоя воздушного промежутка. Обычно допустимое напряжение составляет 700 В/мм. Напряжение можно увеличить, если поместить между обкладками конденсатора тонкую слюдяную пластинку, так как слюда имеет пробивное напряжение около  $10^3$  кВ/мм. Наличие такой пластинки способствует получению более линейной зависимости выходного напряжения от усилия или изменения зазора  $U = f(\Delta\delta)$ .

**Погрешности емкостных преобразователей.** При использовании емкостных преобразователей нужно помнить о том, что между подвижной и неподвижной пластинами действует сила электростатического притяжения

$$F_3 = \frac{1}{2} \frac{U^2}{\delta^2} \epsilon S,$$

которая может внести погрешность в измерения. Если входное сопротивление цепи, включенной в диагональ моста, бесконечно велико и рабочие емкости ничем не шунтируются, то погрешность можно избежать, применяя дифференциальный преобразователь (см. рис. 7.14), в котором силы, действующие между парами пластин, направлены встречно и полностью компенсируют друг друга. Уменьшение или увеличение зазора вызывает пропорциональное уменьшение или увеличение напряжения между соответствующими пластинами, а сила, действующая между ними, остается неизменной, т.е. разность сил равна нулю, независимо от перемещения.

При колебаниях температуры окружающего воздуха будут изменяться геометрические размеры преобразователя, что может привести к большой погрешности измерения. Особенно это имеет место, если детали преобразователя выполнены из разных металлов, имеющих различные температурные коэффициенты расширения.

Температурную погрешность можно значительно уменьшить правильным выбором геометрических размеров деталей преобразователя, а также их температурных коэффициентов расширения.

Изменение влажности воздуха следует учитывать при измерениях емкостными преобразователями. Если, например, градуировка прибора производилась в сухом помещении, а измерения будут проводиться при влажном воздухе, то может возникнуть систематическая погрешность из-за изменения диэлектрической проницаемости воздушного промежутка преобразователя.

### 7.3. ТЕПЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Тепловой преобразователь представляет собой проводник или полупроводник с током, с большим температурным коэффициентом, находящийся в теплообмене с окружающей средой. Имеется несколько путей теплообмена: конвекцией; теплопроводностью среды; теплопроводностью самого проводника; излучением.

Интенсивность теплообмена проводника с окружающей средой зависит от следующих факторов: скорости газовой или жидкой среды; физических свойств среды (плотности, теплопроводности, вязкости); температуры среды; геометрических размеров проводника. Эту зависимость температуры проводника, а следовательно, и его сопротивления от перечисленных факторов можно использовать для измерения различных неэлектрических величин, характеризующих газовую или жидкую среду: температуры, скорости, концентрации, плотности (вакуума).

**Материал преобразователей.** Тепловым преобразователем может служить проводник с высоким и стабильным температурным коэффициентом электрического сопротивления. Этим требованиям

удовлетворяют в основном проводники из химически чистых металлов, так как большинство из них обладает положительным температурным коэффициентом, колеблющимся (в интервале 0... 100 °С) от 0,35 до 0,68 % на 1 °С.

В качестве преобразователей наиболее распространены платина, медь и никель. Вопрос о выборе материала для того или иного преобразователя решается в основном химической инертностью металла в измеряемой среде и пределом изменения температуры. Так, медный преобразователь можно применять при температуре в пределах -50...+180 °С в атмосфере, свободной от влажности и газов. При более высоких температурах медь окисляется. Изоляцией для меди могут служить эмаль, винифлекс, шелк. Недостатком меди является ее малое удельное сопротивление.

Никель при условии хорошей изоляции от воздействия среды можно применять до 250... 300 °С, а при более высоких температурах зависимость  $R = f(t)$  для него неоднозначна. Линейная зависимость  $R = f(t)$  у никеля выполняется только для температур не выше 100 °С. Недостатком никелевых преобразователей является различный для каждой марки никеля температурный коэффициент (0,51... 0,58 % на 1 °С). Поэтому последовательно с никелевой проволокой обычно включают манганиновое сопротивление, снижающее температурный коэффициент до расчетного и стабилизирующее его. Достоинством никеля является большое удельное сопротивление ( $\rho = 0,075... 0,085 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ).

Наилучшими свойствами обладает платина, так как она, во-первых, химически инертна, а во-вторых, может быть использована в диапазоне температур -200... +650 °С. Однако платину нельзя применять в восстановительной среде (углерод, пары кремния, калия, натрия и т.д.).

В настоящее время все чаще применяют полупроводниковые терморезисторы (термисторы), которые изготавливают из смеси оксидов различных металлов: меди, кобальта, магния, марганца и др. В процессе изготовления преобразователь подвергают обжигу при высокой температуре. При обжиге оксиды спекаются в плотную массу в виде шарика, столбика или шайбы, на нее напыляются электроды и подпаиваются выводы из медной проволоки. Для защиты от внешних воздействий чувствительный элемент термистора покрывают защитной краской, помещают в герметический металлический корпус или запаивают в стекло.

С увеличением температуры сопротивление термисторов уменьшается. Зависимость сопротивления от температуры выражается формулой

$$R_t = Ae^{B/T}, \quad (7.3)$$

где  $A$  — постоянная, зависящая от материала, его размеров и формы;  $B$  — постоянная, зависящая от физических свойств полупро-

водника;  $T$  — температура преобразователя в градусах абсолютной шкалы.

Промышленность выпускает терморезисторы сопротивления в разнообразном конструктивном исполнении типов ММТ, КМТ-4, МКМТ.

**Достоинства:** очень высокой (отрицательный) температурный коэффициент сопротивления (2,5... 4 % на  $1^\circ\text{C}$ ), чувствительность в 6... 10 раз выше чувствительности металлического терморезистора, малая теплоемкость и инерционность.

**Недостатки:** нелинейная зависимость их сопротивления от температуры (рис. 7.18), большой разброс и нестабильность характеристик от образца к образцу. Это затрудняет получение линейной шкалы прибора и замену вышедшего из строя полупроводника. Кроме того, у них довольно мал температурный диапазон ( $-100 \dots +120^\circ\text{C}$ ).

Используя преобразователи, нужно стремиться к тому, чтобы все факторы как можно меньше влияли на изменение сопротивления преобразователя. Следовательно, требования к преобразователю, его погрешности и свойства будут определяться в зависимости от их использования. Рассмотрим принцип использования тепловых преобразователей для измерения различных неэлектрических величин.

**Термоанемометры.** Если нагреваемый током тепловой преобразователь погружен в жидкую или газовую среду, то его температура определяется режимом теплового равновесия между количеством теплоты, подводимой к проволоке и отдаваемой в окружающую среду. Если среда движется, т. е. представляет собой поток жидкости или газа, то отдача теплоты путем конвекции превышает все другие охлаждающие факторы и зависит от скорости потока.

Приборы, измеряющие скорость газового потока, называются *термоанемометрами* (рис. 7.19).

Термочувствительным элементом такого прибора служит платиновая проволочка 1, прикрепленная к манганиновым стерженькам 2, которые, в свою очередь, крепятся к ручке 3 из изолирующего материала. Для включе-

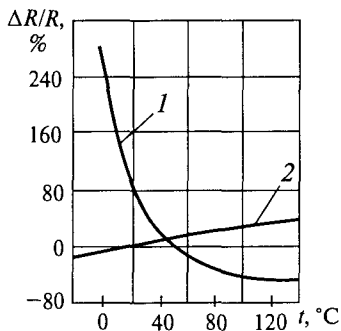


Рис. 7.18. Функции преобразования терморезистора: 1 — типа ММТ; 2 — медного

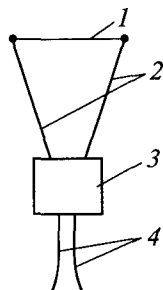


Рис. 7.19. Устройство термоанемометра:

1 — платиновая проволочка; 2 — манганиновые стерженьки; 3 — ручка; 4 — выводы

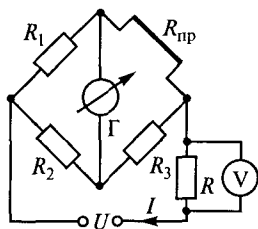


Рис. 7.20. Схема включения преобразователя термоанемометра в мостовую цепь

ния преобразователя в измерительную цепь служат выводы 4. Работа прибора основана на изменении сопротивления проволоки  $l$  в зависимости от скорости газового потока.

Потеря проволокой теплоты путем конвекции выражается формулой

$$I^2 R = \varepsilon F (t_{\text{np}} - t_{\text{cp}}),$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент теплоотдачи;  $F$  — поверхность проволоки в среде;  $t_{\text{np}}$  и  $t_{\text{cp}}$  — соответственно температура проволоки и среды.

Здесь величина  $\varepsilon$  зависит не только от скорости движения среды, но и от вязкости, теплоемкости и теплопроводности среды, поэтому ее рассчитывают с помощью теории подобия. Преобразователь термоанемометра включается обычно в мостовую цепь (рис. 7.20).

Измерение можно производить, поддерживая постоянным либо силу тока  $I$  в неразветвленной части моста, либо напряжение питания моста (при работе в неравновесном режиме), или непрерывно поддерживая соответствующее равновесию моста значение сопротивления преобразователя  $R_{\text{np}}$  термоанемометра путем изменения силы тока  $I$  (тогда мост будет находиться в режиме равновесия для каждого значения скорости  $v$ ). Градуировочная кривая  $R = f(v)$  при  $I = \text{const}$  показана на рис. 7.21. Как видно из рисунка, шкала прибора получается нелинейной.

Иногда для получения более линейной шкалы измеряют не силу тока  $I$ , а падение напряжения на платиновой проволоке  $R$ . Так как значение  $R$  вследствие нагревания проволоки током увеличивается при возрастании  $I$ , то зависимость  $IR = f(v)$  оказывается более линейной, чем зависимость  $I = f(v)$ , но при этом увеличивается инерционность.

Температуру проволоки термоанемометра можно также измерить с помощью термопары ТП (рис. 7.22).

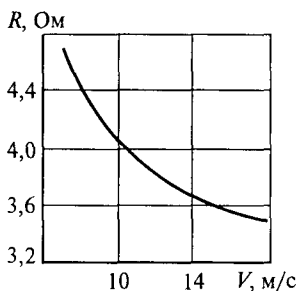


Рис. 7.21. Градуировочная кривая шкалы прибора термоанемометра

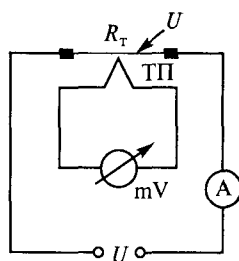


Рис. 7.22. Схема измерения температуры нагревателя

Рабочий спай термопары приварен к середине нагреваемой проволоки  $R_T$  и милливольтметр  $mV$  измеряет развиваемую термопарой термоЭДС, зависящую от температуры сопротивления  $R_T$ , а, следовательно, от скорости потока  $v$ , т. е.

$$E = f(t) = f_1(v).$$

Для того чтобы обеспечить достаточную чувствительность прибора, необходимо нагревать проволоку термоанемометра до температуры 600... 800 °С. Особенно это важно для термоанемометров с термопарой, так как термоЭДС растет с увеличением температуры рабочего спая. Так как не все материалы можно нагревать до такой температуры, то чаще всего в качестве термопреобразователя термоанемометра используют платину.

*Погрешности термоанемометра.* Погрешностью от потерь, обусловленных теплопроводностью самого проводника, можно пренебречь, если взять отношение его длины к диаметру  $l/d \geq 500$  (обычно берется проволока длиной 5... 20 мм и диаметром 0,02... 0,06 мм). Потерями на излучение можно также пренебречь, если термопреобразователь работает в открытом газовом потоке или если температура проволоки отличается от температуры окружающей среды или стенок камеры не больше, чем на 100 °С.

Если потерями на теплопроводность и лучеиспускание пренебречь нельзя, их можно учесть градуировкой при условии, что эти потери сохраняют свое значение во время работы.

Как известно, коэффициент теплоотдачи  $\epsilon$  зависит не только от скорости, но и от теплопроводности среды. Следовательно, если в процессе эксплуатации прибора состав и теплопроводность исследуемого газового потока будут меняться, то будут меняться коэффициент  $\epsilon$  и температура проволоки, что может внести заметную погрешность в измерения. Поэтому нужно следить за тем, чтобы состав среды во время градуировки и эксплуатации прибора был один и тот же.

Проволока термоанемометра должна быть расположена по возможности перпендикулярно направлению потока. Отклонение от этого положения более чем на 10 °С вызывает значительное изменение показаний.

**Газоанализаторы.** Приборы, предназначенные для определения процентного содержания компонента газовой смеси, называются *газоанализаторами*. Принцип их действия основан на изменении сопротивления проводника в зависимости от теплопроводности смеси газов. Теплопроводность газовых смесей, состоящих из газов, не вступающих в реакцию друг с другом, примерно равна среднему арифметическому их составляющих. Для смеси из двух газов

$$\lambda_{см12} = \frac{\lambda_{см1}a + \lambda_{см2}b}{100}, \quad (7.4)$$

где  $\lambda_{см12}$ ,  $\lambda_{см1}$ ,  $\lambda_{см2}$  — соответственно теплопроводности смеси и компонент;  $a$  и  $b$  — процентное содержание компонентов смеси.

Если необходимо определить процентное содержание газа, имеющего теплопроводность  $\lambda_{см1}$ , в смеси с другим газом, имеющим теплопроводность  $\lambda_{см2}$ , то формулу (7.4) можно записать иначе:

$$\lambda_{см12} = \frac{\lambda_{см1}a + \lambda_{см2}(100 - a)}{100}, \quad (7.5)$$

т.е., измерив  $\lambda_{см12}$  смеси и зная табличные значения  $\lambda_{см1}$  в  $\lambda_{см2}$  газов, образующих смесь, можно определить  $a$  (процентное содержание одного из газов).

Выражение (7.4) дает лишь приближенную зависимость теплопроводности смеси от ее состава, поэтому на практике целесообразнее производить градуировку электрических газоанализаторов экспериментально, либо путем сравнения с образцовыми газоанализаторами, либо приготавливая в газгольдере смеси газов различных концентраций.

Выражение (7.5) представляет собой зависимость теплопроводности от двухкомпонентной смеси. Измерение концентрации одного из компонентов более сложных смесей возможно лишь в том случае, когда все остальные компоненты газовой смеси имеют практически одинаковую теплопроводность, либо когда концентрация остальных компонентов постоянная.

На рис. 7.23 показано принципиальное устройство газоанализатора. Проволока 1, закрепленная в камере 2, обтекается исследуемым газом, теплопроводность которого изменяется в зависимости от состава.

Материал проводника выбирается из тех же соображений, что и для термоанемометра. Измерительные цепи аналогичны цепям термоанемометра.

*Погрешности газоанализаторов.* Для уменьшения погрешностей газоанализаторов нужно стремиться к тому, чтобы тепловое равновесие проволоки в камере определялось в основном теплопроводностью газовой смеси, остальные же виды теплообмена должны быть сведены к минимуму.

Потери на лучеиспускание и теплопроводность самой проволоки исключаются тем же путем, что и в термоанемометрах, т.е. соответствующим выбором размеров проводника ( $l = 50 \dots 60$  мм;  $d = 0,03 \dots 0,05$  мм) и градуировкой.

Потери на конвекцию, которые зависят от скорости протекания газа, можно учесть градуировкой, если скорость газа постоянна. Если же скорость газа не является

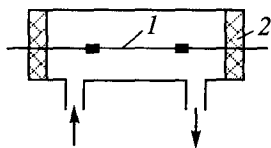


Рис. 7.23. Устройство газоанализатора:

1 — проволока; 2 — камера



постоянной величиной, то может возникнуть погрешность измерения, которую можно подсчитать, если известна зависимость коэффициента теплоотдачи  $\epsilon$  от скорости. В противном случае стремятся к уменьшению скорости газа.

Погрешность, обусловленная потерями теплоты на конвекцию, может быть сведена к нулю, если газ в камеру попадает только в процессе диффузии. Однако инерция подобных преобразователей так велика, что время измерения достигает 15 мин, что неудобно в работе. Обычно, стремясь уменьшить зависимость показаний от скорости, допускают время измерения до 5... 8 мин. Потери на конвекцию, а следовательно, и погрешность прибора зависят от положения проволоки в камере. Если проволока во время эксплуатации сместится относительно того положения, которое она имела при градуировке, то изменятся условия теплового равновесия и температура самой проволоки. Поэтому преобразователь обычно изготавливают в виде прямой проволоки и механически обеспечивают постоянство ее расположения вдоль оси камеры.

**Термометры сопротивления.** Эти приборы используют как датчики для измерения температуры. По материалу чувствительного элемента их подразделяют на термометры сопротивления платиновые (ТСП) и термометры сопротивления медные (ТСМ).

Рассмотрим устройство термометров сопротивления на примере платинового проводникового преобразователя (рис. 7.24).

Преобразователь представляет собой голую платиновую проволоку 2 диаметром 0,05...0,07 мм, намотанную на каркас 1 размером 100×10 мм. Обмотка укладывается в зубчатую нарезку на краях каркаса. В качестве каркаса используют материалы, обладающие термостойкостью и высокими электроизоляционными свойствами: слюду, кварц, фарфор.

К концам обмотки припаиваются выводы 3 из серебряной проволоки, которые изолируют фарфоровыми бусами. В термометрах сопротивления, предназначенных для измерения температуры до 100 °С, возможно применение выводов из меди. При более высокой температуре спай меди с платиной образует термопару и развиваемая ею термоЭДС будет служить источником погрешности.

Обмотку с каркасом заключают между двух слюдяных прокладок 4, затем всю конструкцию собирают в пакет серебряной лентой и заключают в тонкостенную алюминиевую трубку, а затем в чехол из нержавеющей стали. Выводы датчика подключают к зажимам

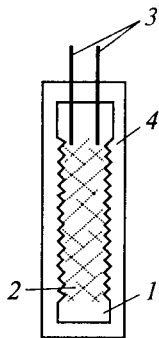


Рис. 7.24. Устройство термометра сопротивления:

1 — каркас; 2 — платиновая проволока; 3 — выводы; 4 — прокладки

специальной платы, установленной в головке защитного чехла. Чувствительный элемент медного термометра сопротивления наматывают на пластмассовый каркас изолированной медной проволокой диаметром 0,1 мм в несколько слоев. Затем поверхность покрывают глифталевым лаком, а выводы обмотки изолируют фарфоровыми бусами. Плату с обмоткой заключают в тонкостенную металлическую гильзу длиной 105 мм, а затем в защитный чехол.

Термометры сопротивления бывают одинарные и двойные. В двойных термометрах сопротивления встроены два изолированных друг от друга чувствительных элемента, применяемые для одновременного измерения температуры одной точки двумя приборами. Медные и платиновые термометры сопротивления выпускают со строго определенными значениями сопротивлений, соответственно своих типов и градуировок. Наиболее распространенными преобразователями температуры являются медные термометры сопротивления градуировок 50М и 100М, платиновые — градуировок 50П и 100П. Числа 50 и 100 обозначают сопротивление чувствительного элемента при 0 °С (50, 100 Ом), а буквы М и П — материал обмотки термометра сопротивления — соответственно медь и платина.

При измерении температуры электрическое сопротивление термометров определяют градуировочными данными и приближенной формулой:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

где  $R_t$  — сопротивление термометра при нагревании на  $t$  °С;  $R_0$  — сопротивление термометра при 0 °С;  $\alpha$  — температурный коэффициент (для меди  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}$ ).

Основные факторы, влияющие на погрешность измерения температуры технологических объектов, — это инерционность термодатчиков, неправильная их установка, нарушение условий монтажа и эксплуатации приборов.

Инерционность термодатчиков проявляется с увеличением скорости изменения температуры объекта, так как возникает значительная разница в показаниях прибора и истинной температурой объекта.

При использовании термодатчиков в агрессивной среде и высоких давлениях за счет использования соответствующих защитных гильз значительно увеличивается их инерционность. Для уменьшения инерционности зазор между датчиком и установочной гильзой по всей длине заполняют средой с большой теплопроводностью. При рабочей температуре 0... 200 °С используют компрессионное масло, при температуре свыше 200 °С — чугунные или бронзовые опилки.

Термометры сопротивления по точности подразделяют на три класса; по инерционности — на малоинерционные (до 9 с), среднеинерционные (10... 80 с), высокоинерционные (до 4 мин).

В соответствии с требованиями производства датчики температур имеют различную монтажную (установочную) длину в интервале 60...3200 мм.

**Измерительные цепи.** Во всех термометрах сопротивления используется принцип измерения сопротивления, изменяющего свою величину в зависимости от изменения температуры окружающей среды. Поэтому в комплекте с термометрами сопротивления имеются приборы, измеряющие электрическое сопротивление (омметры). К таким приборам относятся логометры и мосты, шкалы которых отградуированы в градусах Цельсия. Широкое распространение получили неравновесные мостовые схемы измерения с логометром в качестве измерителя (рис. 7.25). Здесь  $R_1, R_2, R_3$  — сопротивления плеч моста, выполненные из манганина;  $R'_0, R''_0$  — сопротивления рамок логометра;  $R_4$  — сопротивление, компенсирующее температурную погрешность логометра;  $R_0$  — сопротивление для подгонки нулевой точки шкалы;  $R_{\text{л}}$  — сопротивление, дополняющее сопротивление проводов, соединяющих термометр с измерительной цепью до значения, принятого при градуировке термометра (обычно это значение равно 5 Ом);  $R_{\text{т}}$  — преобразователь термометра сопротивления.

Наиболее существенной погрешностью термометров сопротивления является погрешность, обусловленная изменением сопротивления линии вследствие колебания температуры окружающей среды. При больших расстояниях между объектом измерения и измерительной схемой сопротивление линии может быть 5 Ом, тогда как начальное сопротивление термосопротивлений обычно составляет 50 или 100 Ом. В связи с этим изменение сопротивления линии может внести существенную ошибку в измерения.

Для уменьшения этой погрешности подключение термометра сопротивления  $R_{\text{т}}$  к прибору выполняется по трехпроводной схеме (рис. 7.26).

Одна из вершин диагонали питания перенесена непосредственно к преобразователю. Благодаря этому сопротивление провода 2 суммируется с сопротивлением плеча  $R_1$ , а сопротивление провода 1 — с плечом преобразователя  $R_{\text{т}}$ . Одинаковое изменение сопротивления в соседних плечах почти не отразится на равновесии моста в случае его работы в равновесном режиме.

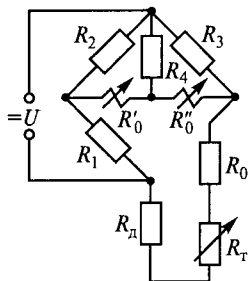


Рис. 7.25. Неравновесный мост с логометрическим измерителем

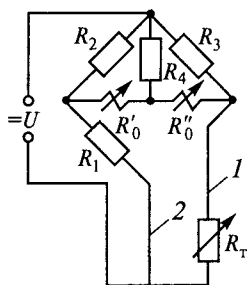


Рис. 7.26. Трехпроводная схема включения термометра сопротивления:

1, 2 — провода

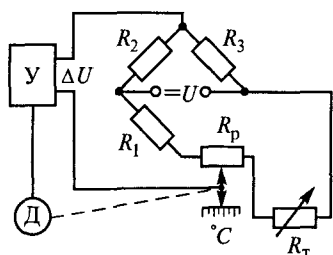


Рис. 7.27. Схема автоматически уравниваемого моста

При работе в неравновесном режиме погрешность также будет значительно меньше, чем в случае двухпроводной линии.

Нагрев преобразователя термометра протекающим по нему током также создает погрешность. Для уменьшения этой погрешности следовало бы снижать ток до минимальной величины. Однако это приведет к потере чувствительности мостовой цепи и нужно будет применять высокочувствительный индикатор, поэтому допустимый ток через термопреобразователь составляет 10... 15 мА.

Часто применяются также автоматически уравниваемые мосты, у которых при выходе из равновесия напряжение разбаланса  $\Delta U$ , усиленное усилителем  $У$ , поступает на управляющую обмотку двигателя  $Д$ . Двигатель перемещает движок реохорда  $R_p$  до тех пор, пока мост снова не придет в равновесие при новом значении измеряемой температуры.  $С$  реохордом связан указатель отсчетного устройства, отградуированного в  $t^{\circ}C$  (рис. 7.27).

**Измерители плотности газа (вакуумметры).** Измерение малых плотностей газа при помощи термосопротивлений основано на зависимости теплопроводности сильно разреженных газов от степени разрежения.

При плотностях газа, соответствующих области атмосферного давления, теплопроводность газа практически не зависит от плотности. Молекула газа, ударившись о нагретое термосопротивление, получает добавочную кинетическую энергию, определяемую температурой нагретого тела. Затем, по мере перемещения от нагретой поверхности к холодной молекула сталкивается с рядом других молекул. Таким образом, в передаче теплоты от нагретой поверхности к холодной участвует много молекул, что статистически приводит к постоянству среднего по объему значения теплопроводности среды.

Однако при уменьшении концентрации, т. е. количества газа или воздуха в замкнутой камере, возрастает длина свободного пробега молекулы. Когда средняя длина свободного пробега молекулы становится величиной одного порядка с расстоянием между термосопротивлением и стенками камеры, теплопроводность газа определяется количеством оставшихся молекул, т. е. плотностью (концентрацией) молекул в камере, практически независимо от температуры и давления газа. Таким образом, естественной входной величиной таких преобразователей является концентрация, т. е. число молекул, находящихся в камере, выходной величиной — температура (или сопротивление) термосопротивления. Принципиальное устройство вакуумметра изображено на рис. 7.28.

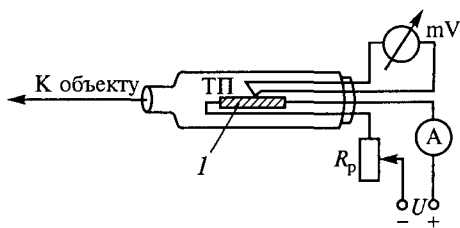


Рис. 7.28. Устройство вакуумметра:

$I$  — лента

Термосопротивлением является лента  $I$ , нагреваемая постоянным током. Амперметр  $A$  и реостат  $R_p$  предназначены для установки и поддержания постоянным значения нагревающего тока, которое было принято при градуировке прибора. Температуру термосопротивления измеряют термопарой ТП, рабочий спай которой приварен к середине термосопротивления, термоЭДС — милливольтметр  $mV$ .

## 7.4. ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

*Ионизационными преобразователями* называют такие преобразователи, в которых измеряемая неэлектрическая величина функционально связана с током электронной и ионной проводимости газовой среды.

Поток электронов и ионов получается в ионизационных преобразователях либо ионизацией газовой среды под воздействием того или иного ионизирующего агента, либо путем термоэлектронной эмиссии, либо путем бомбардировки молекул газовой среды электронами и т. д.

Обязательные элементы любого ионизационного преобразователя — источник и приемник излучений.

**Ионизирующие агенты.** В качестве ионизирующих агентов применяются  $\alpha$ -,  $\beta$ -частицы,  $\gamma$ -лучи и рентгеновские лучи:

- $\alpha$ -частицы представляют собой ядра гелия и несут положительный заряд. Это более тяжелые частицы, поэтому они обладают большей энергией и являются наиболее сильным ионизирующим агентом. Однако проникающая способность их очень мала. Наибольшая длина пробега  $\alpha$ -частиц в воздухе равна 90 мм, а в твердых телах они поглощаются уже в слоях порядка единиц или десятков микрон (например, для алюминия длина пробега 0,05 мм). Поэтому при использовании  $\alpha$ -частиц в качестве ионизирующего агента излучатель помещается внутри преобразователя;

- $\beta$ -частицы представляют собой поток отрицательно заряженных частиц (электронов). Они обладают меньшим запасом энер-

гии, но проникаемость их достигает нескольких миллиметров в твердых телах (например, для алюминия длина пробега равна 1,75 мм), поэтому в измерительной технике используют в основном проникающую способность  $\beta$ -частиц, и излучатель помещается вне преобразователя;

- $\gamma$ -лучи представляют собой электромагнитные колебания весьма малой длины волны. Электромагнитная энергия излучается непрерывно, а квантами или фотонами, которые не несут электрического заряда и потому не отклоняются ни электрическим, ни магнитным полем;  $\gamma$ -лучи распространяются со скоростью света и обладают наибольшей проникающей способностью (например, у алюминия — до 12 см);

- рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные колебания, но большей длины волны. Они обладают теми же свойствами, что  $\gamma$ -лучи и могут излучаться почти всеми веществами, если последние подвергаются бомбардировке электронами или другими частицами достаточной энергии. Использование этих лучей в измерительной технике основано на их способности проникать через светонепроницаемые тела.

**Ионизационная камера.** Преобразователи, в которых применяется метод ионизации газовой среды лучами радиоактивных веществ или рентгеновскими лучами, называют *ионизационными камерами и счетчиками* (рис. 7.29).

Газовая среда в камере 1 подвергается ионизации под воздействием ионизирующего агента 2. В камере расположены два электрода 4, к которым подводится напряжение  $U$ . При ионизации газа в камере возникает упорядоченное движение электронов и положительных ионов этого газа, т. е. ионизационный ток, который является функцией приложенного напряжения, свойств ионизирующего агента, ионизируемой среды, стенок камеры, а также других тел 3, находящихся на пути излучения, созданного ионизирующим агентом.

Можно применять ионизационные преобразователи для измерения различных физических и геометрических величин, используя зависимость ионизационного тока от всех этих факторов.

**Газоразрядные счетчики.** Газоразрядные счетчики служат для регистрации актов ионизации. Счетная трубка (рис. 7.30) выполняется в виде металлического или стеклянного цилиндра 1, покрытого изнутри слоем токопроводящего металла и заполненного аргоном, азотом или другими инертными газами.

Внутри цилиндра, являющегося катодом, вдоль его оси натянута металлическая, изо-

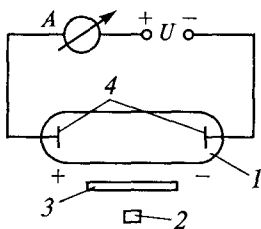


Рис. 7.29. Схема ионизационной камеры:

1 — камера; 2 — ионизирующий агент; 3 — тело; 4 — электроды

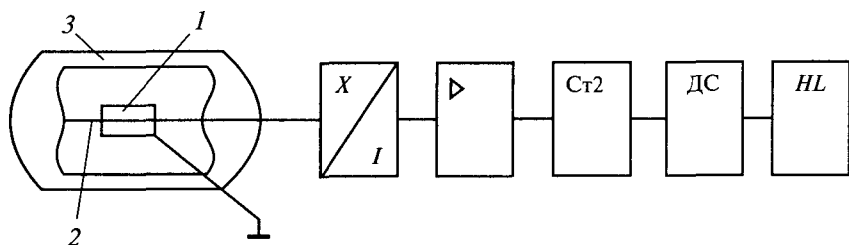


Рис. 7.30. Схема устройства ионизационной счетной трубки:

1 — стеклянный цилиндр; 2 — нить; 3 — стеклянный баллон

лированная от цилиндра нить 2, являющаяся анодом. Трубка герметизирована в стеклянном баллоне 3. Между нитью и цилиндром прикладывается напряжение (порядка 500 В), создающее в межэлектродном пространстве поле, напряженность которого резко возрастает возле анода. Электрон, возникший под действием ионизирующей частицы или излучения в области малой напряженности, дрейфует к аноду, при этом его скорость и энергия возрастают. Вблизи анода, в области повышенной напряженности, его энергия возрастает настолько, что электрон становится способным сам ионизировать газ. Эта ионизация увеличивает число вторичных электронов. Происходит увеличение импульса тока счетчика в  $10^4$  раз и более. Это дает возможность регистрировать каждую пару ионов, образованную в трубке. По импульсу тока счетчика можно определить вид излучения ( $\alpha$  или  $\beta$ ). Правда, такой счетчик может регистрировать отдельные акты ионизации только в том случае, если возникающий самостоятельный разряд будет гаситься до возникновения следующего акта ионизации, для чего существуют различные методы гашения разряда.

**Сцинтилляционные счетчики.** Принцип действия сцинтилляционных счетчиков основан на возникновении в некоторых веществах (люминофорах) под действием проникающей радиации слабых световых вспышек — сцинтилляций, которые, попадая на светочувствительный фотокатод, вызывают фототок. Комбинация люминофора, фотокатода и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в общем светонепроницаемом корпусе называется *сцинтилляционным счетчиком*.

Люминофоры изготовляют из смеси кристаллов сульфида цинка и сульфида кадмия, активированных серебром. Сцинтилляционные счетчики применяют для измерения числа заряженных частиц,  $\gamma$ -квантов, нейтронов, для исследования спектра  $\gamma$ - и нейтронного излучения.

**Масс-спектрометры.** Преобразователи масс-спектрометров предназначены для анализа газовой смеси методом получения спектра масс всех положительно заряженных ионов исследуемой газовой смеси.

В основе разделения ионов по их массам лежит одновременное воздействие на ионы электрического и магнитного полей, благодаря которым ионы различных масс движутся по разным траекториям.

Связь между массами и параметрами электрического и магнитного полей описывается уравнением

$$\frac{m}{e} = \frac{B^2 r^2}{2U}, \quad (7.6)$$

где  $m$  — масса иона;  $e$  — заряд иона;  $B$  — индукция магнитного поля;  $r$  — радиус траектории, описываемой ионом под действием электрического и магнитного полей;  $U$  — напряжение электрического поля.

Испытуемый газ вводится под небольшим давлением в ионизационную камеру (рис. 7.31), где он подвергается бомбардировке пучком электронов. Образованные при бомбардировке положительные ионы под воздействием электрического поля, созданного разностью потенциалов  $\Delta U$ , получают ускорение. Вылетая через щель 3 ионизационной камеры, они попадают через щель 2 в камеру, где действует магнитное поле с индукцией  $B$ .

Магнитное поле, в зависимости от величины  $m/e$ , отклоняет ионы, и они движутся по траекториям с радиусами  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  и т.д. Ионы, радиус траектории которых  $r_3$ , пройдут через щель 1 и попадут на коллектор. Он соединен через сопротивление  $R$  с землей. Ток, значение которого определяется количеством ионов, отдающих свой заряд коллектору в единицу времени, создает на сопротивлении  $R$  падение напряжения, которое усиливается усилителем постоянного тока и регистрируется самопишущим прибором  $V$ .

Изменяя индукцию магнитного поля  $B$  при  $U = \text{const}$  или, наоборот, изменяя напряжение электрического поля  $U$  при  $B = \text{const}$ , можно добиться того, что ионы различных масс будут попадать через щель 1 на коллектор и таким образом в достаточно широких пределах на диаграмме можно записать кривую, имеющую ряд пиков (рис. 7.32). Высота каждого пика является критерием концентрации ионов данной массы в газовой смеси.

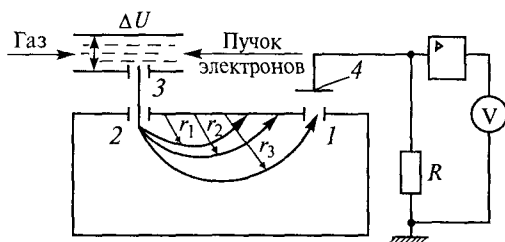


Рис. 7.31. Устройство масс-спектрометра:

1—3 — щели; 4 — коллектор



В связи с тем, что значение ионизационных токов мало ( $10^{-9} \dots 10^{-12}$  А), а входное сопротивление измерительной цепи должно быть достаточно высоким ( $10^{12} \dots 10^{15}$  Ом), чтобы токи утечек были меньше ионизационных хотя бы на 2—3 порядка. Этому основному и важному требованию удовлетворяют электронные измерительные цепи, входное сопротивление которых порядка  $10^{12} \dots 10^{13}$  Ом.

*Достоинства:* дают возможность измерять без непосредственного контакта с измеряемым объектом. Вследствие этого с их помощью можно производить измерения в агрессивных средах, при высокой температуре, давлении и т. д.

Погрешности измерения с помощью ионизационных преобразователей прежде всего определяются несовершенством используемой измерительной аппаратуры. Особенно велика погрешность, вносимая усилителем постоянного тока. Поэтому часто для уменьшения этой погрешности приборы с ионизационными преобразователями выполняются по нулевому методу с автоматическим уравновешиванием посредством следящего привода с реверсивным двигателем. Кроме того, нужно учитывать погрешность, обусловленную постепенным распадом радиоактивного вещества и, следовательно, нестабильностью источника излучения во времени.

Активность источника излучения  $A$  изменяется во времени по закону

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{0,5}} t},$$

где  $A_0$  — начальная активность источника;  $T_{0,5}$  — период полураспада.

По допустимой погрешности

$$\gamma = \left( 1 - e^{-\frac{\ln 2}{T_{0,5}} t} \right) \leq \gamma_{\text{доп}} \quad (7.7)$$

и периоду полураспада  $T_{0,5}$  определяется время смены изотопов.

Радиоактивные изотопы характеризуются тем, что число распадов в равные промежутки неодинаково и колеблется около некоторого среднего значения. Поэтому при конечном времени измерения это приводит к возникновению большой случайной погрешности, среднее квадратическое значение которой определяется формулой

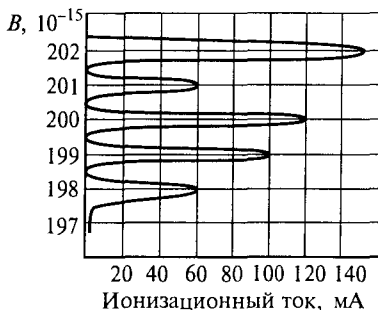


Рис. 7.32. Диаграмма прохождения ионов через щель камеры масс-спектрометра

$$\sigma = \sqrt{1/n}, \quad (7.8)$$

где  $n = f_N t_{\text{изм}} \mu$  — число частиц, зарегистрированных приемником за время измерения  $t_{\text{изм}}$ ;  $f_N$  — частота попадания частиц в приемник;  $\mu$  — эффективность приемника, т. е. отношение поглощенных лучей к падающим.

Погрешность  $\sigma = \sqrt{1/(f_N t_{\text{изм}} \mu)}$  очевидно будет тем меньше, чем больше время измерения и чем больше активность источника  $A$ , определяющая частоту  $F_N$  частиц, попадающих в приемник.

Таким образом, для повышения точности или быстродействия этих приборов нужно значительно увеличить мощность источника. Это возможно в тех случаях, когда зона расположения источника недоступна для человека или хорошо защищена экранами. Но это связано с резким утяжелением аппаратуры. Так для стократного ослабления интенсивности излучения необходим свинцовый экран толщиной 90 мм.

В зависимости от свойств ионизирующих агентов ионизационные преобразователи используются в приборах для измерения различных величин. Например, ионизационные преобразователи с  $\alpha$ -излучателями могут применяться для измерения перемещения, так как ток ионизационной камеры зависит от расстояния между электродами; плотности газов; скорости течения газов и количества дымовых примесей и влажности газа.

Ионизационные преобразователи с  $\beta$ -излучателями могут применяться вместо  $\alpha$ -излучателей в некоторых вышеперечисленных случаях, а также для измерения бесконтактным методом толщины листового материала и толщины покрытий.

Ионизационные преобразователи с  $\gamma$ -излучателями, обладающими большой проникающей способностью, используются для измерения плотности вещества, толщины, уровня, для дефектоскопии деталей.

**Ионизационный расходомер.** На рис. 7.33 изображен принцип действия ионизационного расходомера с  $\alpha$ -излучателем.

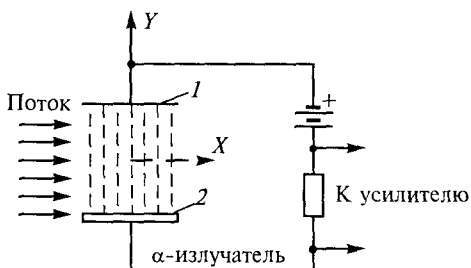
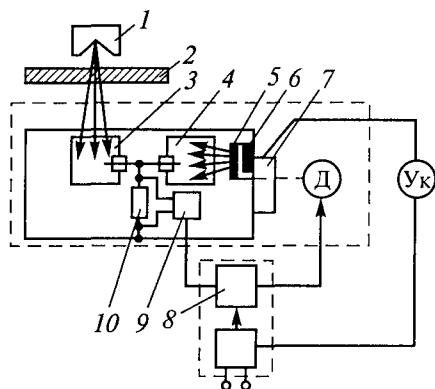


Рис. 7.33. Схема ионизационного расходомера с  $\alpha$ -излучателем:

1 — электрод-приемник; 2 — электрод-излучатель

Рис. 7.34. Схема ионизационного расходомера:

1 и 6 — соответственно рабочий и компенсационный источники излучения; 2 — объект измерения; 3, 4 — ионизационные камеры; 5 — диафрагма; 7 — следящее устройство; 8 — усилитель; 9 — преобразователь; 10 — сопротивление



В испытуемый поток помещаются два электрода, на один из которых нанесен слой радиоактивного вещества, ионизирующего пространство между электродами. Под воздействием напряжения, приложенного к электродам, образующиеся ионы движутся со скоростью, определяемой этим напряжением и скоростью потока, так как часть ионов уносится потоком. В этом случае ионизационный ток является функцией скорости потока:

$$i = f(v_{\text{потока}}).$$

**Ионизационный толщиномер.** Примером применения ионизационного преобразователя с использованием  $\beta$ -излучателя может служить толщиномер (рис. 7.34).

Толщиномер построен на принципе уравнивания и основан на явлении поглощения  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучей листом стального проката, толщина которого измеряется.

Прибор имеет два источника излучения — рабочий 1 и компенсационный 6, потоки которых воспринимаются соответственно ионизационными камерами 3 и 4. Разностный ток ионизационных камер протекает через сопротивление 10. Падение напряжения на этом сопротивлении, преобразованное в переменное в преобразователе 9, усиливается усилителем 8 и поступает на управляющую обмотку двигателя Д.

Рабочий поток источника излучения 1 поглощается объектом измерения 2, а компенсационный 6 регулируется до достижения равенства его с рабочим потоком диафрагмой 5 с переменным отверстием, шторка которой перемещается реверсивным двигателем. Угол поворота шторки диафрагмы служит мерой толщины контролируемого изделия. Имеется и вы-

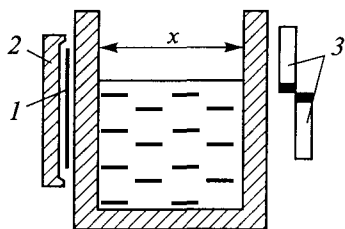


Рис. 7.35. Схема ионизационного уровнемера ИУ-3:

1 — источник излучения; 2 — защитная камера; 3 — трубка

носной указатель Ук, связанный со шторкой следящим устройством 7.

**Ионизационный уровнемер.** Излучатель  $\gamma$ -лучей применяется часто в ионизационных уровнемерах. Принципиальная схема уровнемера типа ИУ-3 приведена на рис. 7.35.

На противоположных сторонах объекта, в котором измеряется уровень жидкости, расположены источник и приемник  $\gamma$ -лучей. Источник излучения 1 в виде проволоки из кобальта, толщиной 0,7...0,9 мм и длиной 150 мм располагается в защитной камере 2. С другой стороны объекта располагается счетная трубка 3. При изменении уровня жидкости изменяется величина поглощения  $\gamma$ -лучей средой, а следовательно, и ионизационный ток.

Ионизационные уровнемеры являются приборами, не требующими непосредственного контакта с испытуемой средой. Поэтому они применяются в наиболее трудных условиях измерения, например при высоких давлениях, высоких температурах (измерение уровня расплавленного металла), а также в случаях измерения уровня различных агрессивных сред.

## 7.5. РЕОСТАТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЛИ ДАТЧИКИ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Реостатный преобразователь (рис. 7.36) представляет собой реостат, движок которого перемещается под действием измеряемой неэлектрической величины. Следовательно, входной величиной реостатных преобразователей является перемещение движка реостата, механически связанного с измеряемой неэлектрической величиной, а выходной величиной — активное сопротивление.

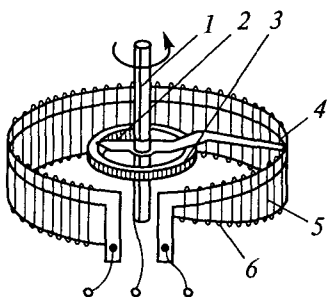


Рис. 7.36. Устройство реостатного преобразователя:

1 — приводной валик; 2 — добавочная щетка; 3 — токосъемное кольцо; 4 — щетка; 5 — проволока; 6 — каркас

На каркас 6 из изоляционного материала намотана с равномерным шагом проволока 5. Изоляция проволоки на верхней границе каркаса зачищается, и по металлу скользит щетка 4. Добавочная щетка 2 скользит по токосъемному кольцу 3. Обе щетки изолированы от приводного валика 1.

Реостатные преобразователи выполняются как с проводом, намотанным на каркас, так и реохордного типа. В качестве материала провода применяют нихром, манганин, константан и др. В ответственных случаях, когда требования к износостойкости контактных поверхностей очень велики или когда контактные давления

очень малы, применяют сплавы платины с иридием, палладием и т.д. Провод реостата должен быть покрыт либо эмалью, либо слоем оксидов для изоляции соседних витков друг от друга. Движки бывают из двух-трех проволочек (платина с иридием) с контактным давлением 0,003...0,005 Н или пластинчатые (серебро, фосфористая бронза) с усилием 0,05...0,1 Н. Контактная поверхность намотанного провода полируется; ширина контактной поверхности равна двум-трем диаметрам провода. Каркас реостатного преобразователя выполняется из текстолита, пластмассы или из алюминия, покрытого изоляционным лаком, или оксидной пленкой. Формы каркасов разнообразные. Реактивное сопротивление реостатных преобразователей очень мало и им обычно можно пренебречь на частотах звукового диапазона.

При использовании реостатных преобразователей для измерения неэлектрических величин часто возникает задача получить линейную зависимость угла отклонения  $\alpha$  указателя от измеряемой неэлектрической величины  $F$ , несмотря на то, что ряд звеньев прибора между преобразователем и указателем, осуществляющих промежуточные преобразования, характеризуется нелинейной функцией преобразования.

В подобных случаях применяются функциональные реостатные преобразователи с нелинейным распределением сопротивления вдоль каркаса. Такого распределения сопротивления достигают, например, изменяя высоту каркаса, шунтируя части линейного реостата постоянными сопротивлениями, используя намотку с переменным шагом, намотку отдельных участков каркаса проводами разного диаметра или с разными удельными сопротивлениями и т.д.

Рассмотрим варианты построения приборов с реостатными преобразователями. Для схемы на рис. 7.37, а силу тока  $I$  можно выразить формулой

$$I = \frac{U}{R_0 + R_p (1 - l/l_{\text{ном}})}, \quad (7.9)$$

где  $l$  — отклонение движка, соответствующее текущему значению измеряемой величины;  $l_{\text{ном}}$  — номинальное отклонение, при котором сопротивление линейного реостата  $R_p = 0$ . Если отклонение движка угловое, то вместо  $l$  и  $l_{\text{ном}}$  следует поставить  $\varphi$  и  $\varphi_{\text{ном}}$ .

Как видно из приведенной зависимости, связь тока с отклонением движка оказывается нелинейной, поэтому цепь, изображенную на рис. 7.37, а, применяют редко.

В цепи на рис. 7.37, б реостатный преобразователь включен по схеме делителя напряжения:

$$U = \frac{U\varphi/\varphi_{\text{ном}}}{R/R_p + 1 - \frac{\varphi/\varphi_{\text{ном}}}{1 + R_0/(R_p\varphi_{\text{ном}}/\varphi)}}. \quad (7.10)$$

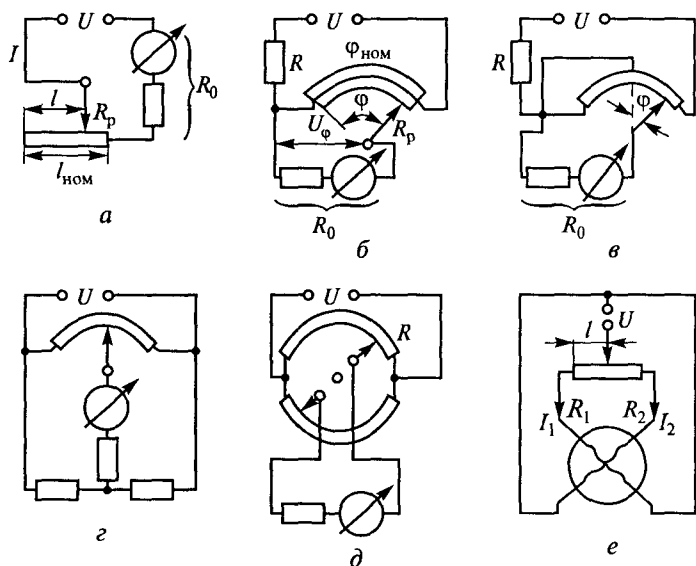


Рис. 7.37. Схемы приборов с реостатными преобразователями: *a* — с последовательным включением; *б* — *д* — по схеме делителя напряжения; *e* — с использованием логометра

Наличие в знаменателе члена  $\varphi_{\text{ном}}/\varphi$  приводит к нелинейной зависимости входного напряжения  $U_{\varphi}$  от отклонения  $\varphi$ . Однако при очень большом значении сопротивления отсчетного устройства  $R_0$  (при использовании указателя, включенного через усилитель) этот член оказывается равным нулю, и связь между выходным напряжением  $U$  и углом  $\varphi$  становится линейной:

$$U = \frac{U_{\varphi} / \varphi_{\text{ном}}}{R / R_p + 1}. \quad (7.11)$$

Цепи на рис. 7.37, *в*, *г* характеризуются нелинейностью, но позволяют при применении указателя с двухсторонней шкалой измерять отклонение измеряемой величины в обе стороны от нуля.

Нелинейность при включении преобразователя по схеме на рис. 7.37, *д* достаточно мала.

Показания прибора, изображенного на рис. 7.37, *e*, где в качестве указателя использован логометр, не зависят в известной степени от постоянства напряжения источника питания, так как отклонение логометра является функцией отношения токов, а следовательно, перемещения движка  $l$ :

$$\alpha = f_1(I_1/I_2) = I_2(R_1/R_2) = f(l).$$

Зависимость токов  $I_1$  и  $I_2$  от перемещения  $l$  в этой цепи нелинейна. Но, изменяя форму полюсных наконечников или сердечника измерительного механизма логометра, можно получить нужный вид зависимости  $\alpha = f_1(I_1/I_2)$ , а следовательно, и требуемый характер шкалы  $\alpha = f(l)$  измерительного устройства.

**Реостатный уровнемер.** Наиболее широкое распространение получили реостатные преобразователи в приборах для измерения уровня — реостатные уровнемеры, которые используются в самолетах, автомобилях и т. д. На рис. 7.38 представлена измерительная цепь реостатного уровнемера — бензиномера.

Измерителем здесь является магнитоэлектрический логометр, рамки которого включены последовательно с сопротивлениями  $R_3$  и  $R_4$  реостатного преобразователя. При изменении положения движка, связанного с поплавком  $I$ , токи в обеих рамках изменяются с различными знаками, вследствие чего изменяется отношение этих токов, а следовательно, и отклонение стрелки указателя. Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  служат для регулировки прибора на заданный предел измерения. Шкала указателя градуируется в литрах.

**Пружинный акселерометр.** На рис. 7.39 представлена принципиальная схема пружинного датчика ускорения (акселерометра) с реостатным преобразователем.

Масса  $m$  подвешена на пружинах  $C$ . При наличии вертикального ускорения под действием силы инерции  $F = mx$  движок  $Д$ , связанный с массой, перемещается по реостату  $R$ . Выходное напряжение пропорционально действующему ускорению. Предел измерения прибора определяется жесткостью пружин  $C$  и величиной массы.

Реостатные преобразователи могут быть использованы для измерения виброускорений и виброперемещений с ограниченным частотным диапазоном.

С изменением температуры изменяется сопротивление преобразователя, что обусловлено температурным изменением удельного сопротивления провода. При включении преобразователя по потенциометрической схеме в режиме холостого хода изменение температуры не меняет распределения напряжений и температурная погрешность отсутствует.

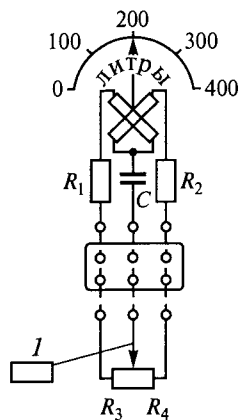


Рис. 7.38. Схема реостатного уровнемера:  
 $I$  — поплавок

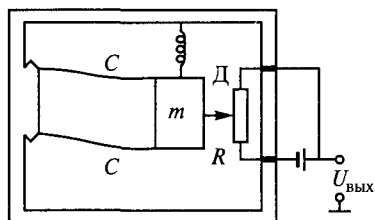


Рис. 7.39. Схема пружинного датчика ускорения с реостатным преобразователем

Реостатные преобразователи являются ступенчатыми (дискретными), за исключением преобразователей реохордного типа, так как непрерывному изменению измеряемой неэлектрической величины соответствует ступенчатое изменение сопротивления  $\Delta R$  при переходе движка с одного витка на другой.

Погрешность дискретности в этом случае составляет

$$\gamma_R = \pm \Delta R / (2R_p),$$

где  $R_p$  — полное сопротивление преобразователя.

Если преобразователь имеет пропорциональную функцию преобразования, то «скачки» сопротивления будут одинаковы по всему диапазону перемещения движка. В этом случае

$$R_p = n\Delta R; \gamma_R = \pm 1/2n,$$

где  $n$  — число витков в обмотке реостатного преобразователя, обычно  $n = 100 \dots 200$ .

## 7.6. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В основе работы тензорезисторных преобразователей лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при деформации сжатия — растяжения. При деформации проводника изменяются его длина  $l$  и площадь поперечного сечения  $Q$ ; при деформации кристаллической решетки — удельное сопротивление  $\rho$ . Эти изменения приводят к изменению сопротивления проводника

$$R = \rho l / Q.$$

Важная характеристика тензоэффекта материала — коэффициент относительной чувствительности  $S_{отн}$ , определяемый как отношение изменения сопротивления к изменению длины проводника:

$$S_{отн} = \epsilon_R / \epsilon_l,$$

где  $\epsilon_R = \Delta R / R$  — относительное изменение сопротивления проволоки;  $\epsilon_l = \Delta l / l$  — относительное изменение длины проводника.

Основным требованием к материалу тензопреобразователей является возможно большее значение коэффициента относительной чувствительности  $S_{отн}$ . Это объясняется тем, что относительное изменение сопротивления  $\epsilon_R$  у большинства тензорезисторов мало, не превышает  $(5 \dots 7)10^{-3}$ . Нагрев преобразователя может вызвать изменение его сопротивления, соизмеримое с рабочим изменением. Другое требование — возможно меньшее значение температурного коэффициента сопротивления материала, что определяет температурную погрешность преобразователя. Третье требование — это высокое удельное сопротивление материала, из которого изготавливается преобразователь, что необходимо для умень-



шения габаритных размеров преобразователя. Наиболее часто применяемые для изготовления тензорезисторов материалы: константан, нихром, манганин, никель, хромель, висмут, титаноалюминиевый сплав и полупроводниковые материалы (соединения германия, кремния и т. д.). В настоящее время наиболее широко применяют проволочные, фольговые, пленочные и полупроводниковые тензорезисторы.

**Проволочные тензопреобразователи.** В проволочных тензопреобразователях для измерений используются:

- тензоэффект проводника, находящегося в состоянии объемного сжатия, когда естественной входной величиной преобразователя является давление (газ или жидкость), а выходной — изменение активного сопротивления. На этом принципе строятся манометры для измерения высоких и сверхвысоких давлений;

- тензоэффект растягиваемой проволоки из тензочувствительного материала. При этом тензорезисторы применяются в виде «свободных» преобразователей и в виде наклеиваемых. «Свободные» тензопреобразователи выполняются в виде одной или группы проволок, закрепленных по концам между подвижной и неподвижной деталями, и, как правило, выполняющих одновременно роль упругого элемента. Естественной входной величиной является очень малое перемещение подвижной детали, а выходной величиной преобразователя — изменение его сопротивления. Устройство преобразователя приведено на рис. 7.40.

На полоску тонкой бумаги или лаковую пленку 1 наклеивается уложенная зигзагообразно тонкая проволока 2 диаметром 0,02... 0,05 мм. К концам проволоки присоединяются (сваркой или пайкой) выводные медные проводники 4, служащие для включения преобразователя в измерительную цепь. Сверху преобразователь покрывается слоем лака или заклеивается бумагой 3 или фетром. Такой преобразователь приклеивается к испытываемой детали так, что проволока воспринимает деформацию поверхностного слоя испытываемой детали, вследствие чего изменяется сопротивление проволоки. Таким образом, естественной входной величиной является деформация поверхностного слоя испытываемой детали, а выходной — изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации. Измерительной базой преобразователя является длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5... 20 мм, обладающие

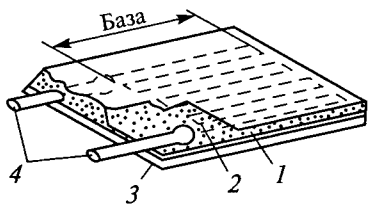


Рис. 7.40. Устройство наклеиваемого проволочного тензорезистора:

1 — лаковая пленка; 2 — проволока; 3 — бумага; 4 — медные проводники

сопротивлением 30...500 Ом. Кроме петлевой конструкции существуют и другие. При необходимости уменьшения измерительной базы преобразователя (до 3...1 мм) тензорезистор изготавливают витковым способом, который заключается в том, что на оправке круглого сечения на трубку из тонкой бумаги наматывается спираль из тензочувствительной проволоки. Затем эта трубка проклеивается, снимается с оправки, расплющивается и к ее концам прикрепляются выводы.

Когда надо получить от цепи с тензопреобразователем ток большой величины (например, при работе на вибраторе осциллографа), используют проволочные преобразователи из большого числа (30...50) параллельно соединенных проволочек. Они отличаются большими габаритными размерами (длина базы 150...200 мм), но дают возможность увеличить пропускаемый через преобразователь ток.

**Фольговые преобразователи.** Они представляют собой тонкую лаковую пленку, на которую нанесена фольговая тензочувствительная решетка из константана толщиной 4...12 мкм. При изготовлении таких преобразователей путем травления можно получить любой рисунок решетки, что является достоинством фольговых преобразователей. На рис. 7.41, *а*, *б* представлены разновидности фольговых тензорезисторов.

Большим преимуществом фольговых преобразователей является возможность увеличивать сечение их концов, что позволяет осуществить надежное припаивание (приваривание) выводов, а также возможность изготовить фольговые преобразователи большего сечения, чем проволочные, что позволяет пропускать через преобразователи большие токи, и, следовательно, делать приборы с тензопреобразователями более чувствительными.

При отношении ширины к толщине полоски, равном 10, допустимый ток в преобразователе из фольги в 1,4 раза больше, чем в преобразователе из проволоки того же сечения.

**Пленочные тензорезисторы.** Металлические пленочные тензорезисторы изготавливаются методом вакуумной возгонки тензочувствительного материала и последующей конденсации его на подложку (рис. 7.42). Форма тензорезистора задается маской, через которую производится напыление.

Действие датчика основано на изменении омического сопротивления тензочувствительной обмотки 2 при деформации упругого элемента 1 под воздействием измеряемой силы. Тензочувствительная

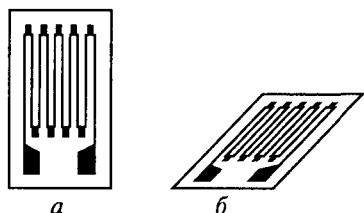


Рис. 7.41. Фольговые тензорезисторы

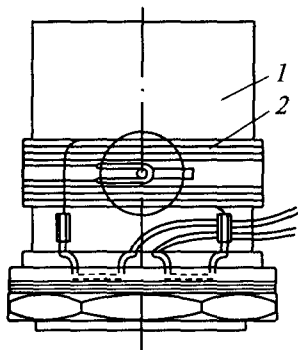


Рис. 7.42. Пленочные тензорезисторы:

1 — упругий элемент; 2 — обмотка

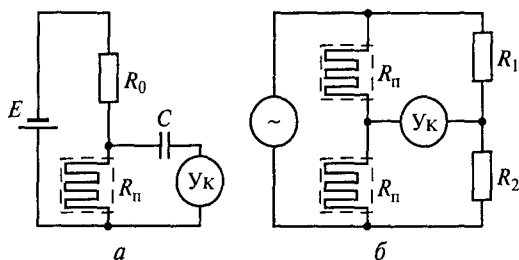


Рис. 7.43. Схемы включения тензорезисторов:

а — делитель напряжения; б — мостовая цепь

обмотка (напыленная или намотанная из константана) включается в плечо мостовой схемы.

Чаще всего измерительной цепью является делитель напряжения либо мостовая цепь (рис. 7.43).

Делитель напряжения с питанием постоянным током (см. рис. 7.43, а) применяют лишь в том случае, когда интересуются только переменной составляющей измеряемой величины. При этом постоянная составляющая падения напряжения на сопротивлении  $R_n$  тензопреобразователя, в сотни раз превышающая переменную составляющую, отфильтровывается разделительным конденсатором  $C$ . В других случаях в качестве измерительной цепи используется цепь моста (см. рис. 7.43, б), питаемого постоянным или переменным током. Чаще применяется неравновесный режим работы мостовой цепи. При динамических измерениях в качестве указателя применяют самописец или осциллограф, включаемые через усилитель.

**Полупроводниковые тензорезисторы.** Полупроводниковый чувствительный элемент в полупроводниковых тензорезисторах состоит из кремниевой полоски с  $n$ - или  $p$ -проводимостью, обладающей пьезоэффектом, при котором механическая нагрузка вызывает положительное или отрицательное изменение сопротивления. Полупроводниковый тензорезистор шириной 0,2 мм и толщиной около 0,02 мм может быть изготовлен на подложке или использоваться без нее. Преимуществом таких тензодатчиков является высокая чувствительность, которая постоянна только в узком диапазоне. Его характеристика нелинейна, величина  $\epsilon_R = \Delta R/R$  сильно изменяется при изменении удлинения  $\epsilon_l = \Delta l/l$  и температуры. Полупроводниковые тензорезисторы имеют высокую стоимость, что учитывается при их использовании.

**Погрешности приборов с тензопреобразователями.** Эти погрешности тесно связаны с градуировкой приборов. При невозможности градуировать непосредственно рабочий преобразователь погрешность, обусловленная неидентичностью преобразователей и качеством наклейки рабочих и градуируемых тензорезисторов, может достигать до 3...5 %, а общая погрешность всего прибора (включая погрешность указателя, усилителя и т.д.) — 10...15 %. При градуировке рабочего преобразователя и при возможности контроля чувствительности усилителя погрешность прибора может быть снижена до 0,2...0,5 % при статических и до 1,0...1,5 % при динамических измерениях.

Для уменьшения самой существенной для тензорезисторов температурной погрешности, которая носит в основном аддитивный характер, используют дифференциальную схему включения преобразователей — в соседнее плечо моста включают такой же преобразователь, наклеенный на тот же самый материал и помещенный в те же температурные условия.

В ряде случаев можно разместить на детали и включить в соседние плечи моста два преобразователя, испытывающих равную деформацию разного знака (рис. 7.44). При этом одновременно достигается температурная коррекция и повышается вдвое чувствительность измерительной цепи.

В тензорезисторных приборах высокой точности и для получения датчиков с унифицированными характеристиками, чтобы обеспечить их взаимозаменяемость, используют мостовые схемы с нормирующими резисторами, позволяющие регулировать параметры и характеристики тензорезистивного моста и прибора в целом. При использовании мостовых схем с нормирующими резисторами погрешность датчиков с фольговыми тензорезисторами снижается до 0,03...0,005 %, а у датчиков с полупроводниковыми тензорезисторами — до 0,1 %.

*Применение:* для измерения деформаций и механических напряжений, а также других статических и динамических механических величин, которые пропорциональны деформации вспомога-

тельного упругого элемента (пружины), например пути, ускорения, силы, изгибающего или вращающего момента, давления газа или жидкости и т.д. По этим измеряемым величинам можно определить производные величины, например массу (вес), степень заполнения резервуаров и т.д. Проволочные тензорезисторы на бумажной основе, а также фольговые и пленочные при-

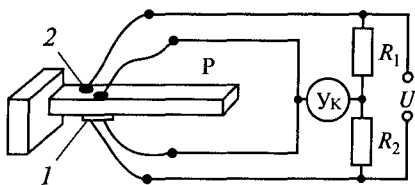


Рис. 7.44. Схема включения тензорезисторов с температурной коррекцией:

1 — сжатие; 2 — растяжение

меняют для измерения относительных деформаций от 0,005...0,02 до 1,5...2%. Свободные проволочные тензорезисторы могут быть использованы для измерения деформаций до 6...10%. Тензорезисторы практически безынерционны и применяются в диапазоне частот 0...100 кГц.

Измерительные цепи тензорезисторов весьма разнообразны. Преимущественное распространение получили приборы с усилителями, называемые *тензоусилителями* или *тензостанциями*. Они обладают рядом достоинств: возможностью одновременно измерять статические и динамические деформации; простотой изготовления и наладкой усилителей; малой чувствительностью к помехам от электрических и магнитных полей. Рассмотрим принцип использования тензорезисторных преобразователей для измерения различных неэлектрических величин.

**Измерение деформации.** На рис. 7.45 приведена типичная структурная схема одного канала прибора для измерения деформации.

Измерительный мост  $M$  питается переменным напряжением от генератора  $\Gamma$  несущей частоты. Модулированный сигнал несущей частоты с измерительной диагонали моста попадает на вход усилителя  $Ус$ . Усиленный сигнал демодулируется фазочувствительным демодулятором  $Д$  и через фильтр  $\Phi$  поступает в указатель  $Ук$ . Усилитель и генератор несущей частоты питаются от источника  $В$ . Для проверки чувствительности служит устройство  $П$ , которое в некоторых приборах осуществляется автоматически, а для предварительного уравнивания моста — устройство  $Р$ . Для одновременного определения деформации во многих точках тензостанции выполняются многоканальными.

**Измерение давлений.** Для измерения давлений ( $100 \text{ Н/мм}^2 \dots 3 \text{ кН/мм}^2$ ) используют манганиновые тензорезисторы. При изме-

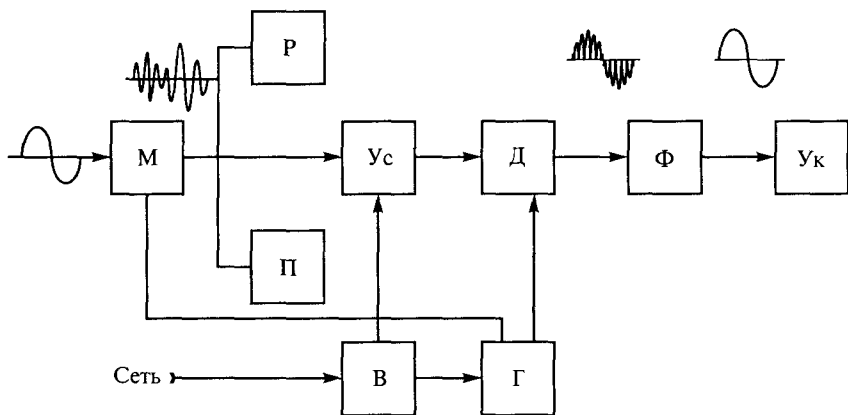


Рис. 7.45. Структурная схема канала измерителя деформации

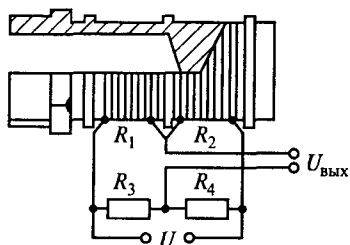


Рис. 7.46. Манометр с температурной коррекцией

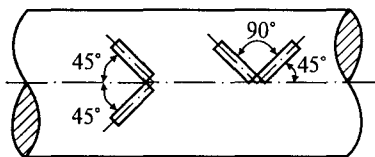


Рис. 7.47. Схема расположения тензорезисторов для измерения крутящего момента вала

рении давлений они могут быть установлены непосредственно на стенках сосуда, давление в котором измеряется, а для повышения чувствительности — на мембранах, сильфонах и т.д. В манометрах с тензосопротивлениями в качестве упругого элемента используется металлический стакан с утолщенным дном. На наружной поверхности стакана наклеиваются два рабочих преобразователя, а на донной поверхности — два для температурной коррекции. На рис. 7.46 приведена конструкция упругого элемента, поверхность которого изолирована и обмотана тензочувствительной проволокой: половина ее  $R_1$  является рабочей, а вторая половина  $R_2$  служит для температурной коррекции.

Величина относительного удлинения проволоки при толщине стенки трубки  $\delta$  и внутреннем радиусе  $r$  под действием давления  $P$  определяется по формуле

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{Pr}{\delta} \frac{1}{E} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right), \quad (7.12)$$

где  $E$  и  $\mu$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона.

**Измерение крутящего момента.** Крутящий момент можно определить путем измерения напряжения в материале вала при помощи тензорезисторов, наклеенных так, как показано на рис. 7.47.

Крутящий момент

$$M_{кр} = \tau W_{п},$$

где  $\tau$  — измеренное напряжение;  $W_{п} = \pi r^3/2$  — полярный момент сопротивления сплошного круглого вала.

При включении преобразователей в два соседних плеча моста влияние деформаций изгиба вала на результат измерения практически исключается, поскольку при изгибе деформации обоих преобразователей одинаковы по величине и по знаку. Погрешность измерения тензодатчиками в этом случае составляет 5...10 %, но может быть снижена до 1...2 % при предварительной их градуировке непосредственно на валу.

## 7.7. ИНДУКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

*Индуктивным* называют такой преобразователь, который преобразует значение измеряемой (механической) величины в значение индуктивности. Он представляет собой катушку индуктивности, полное сопротивление которой изменяется при взаимном относительном перемещении элементов магнитопровода. На рис. 7.48 изображен самый распространенный преобразователь с малым воздушным зазором  $\delta$ , длина которого изменяется под действием измеряемой величины  $P$  (сосредоточенная сила, давление, линейное перемещение), а вследствие этого — магнитное сопротивление магнитной цепи и индуктивность катушки, надетой на сердечник и включенной в цепь переменного тока. Индуктивность  $L$  катушки

$$L = \frac{w^2}{R_M} \quad \text{или} \quad L = \frac{w^2}{R_{M,ст} + R_\delta} = \frac{w^2}{R_{M,ст} + \frac{2\delta}{\mu_0 Q}},$$

где  $w$  — число витков катушки;  $R_M$  — полное сопротивление магнитной цепи;  $R_{M,ст}$  — магнитное сопротивление участков из стали;  $R_\delta$  — магнитное сопротивление воздушных зазоров;  $\delta$  — воздушный зазор;  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м — магнитная проницаемость воздушного зазора;  $Q$  — площадь воздушного зазора.

Таким образом, у данного преобразователя естественной входной величиной является перемещение сердечника 1, а выходной — изменение индуктивности обмотки 2. Изменение индуктивного сопротивления катушки ведет к изменению ее полного сопротивления  $Z$ . В связи с этим возникает функциональная зависимость между измеряемой механической величиной  $P$  и электрическим сопротивлением  $Z$  преобразователя

$$Z = f(P) \quad \text{и} \quad \Delta Z = f(\Delta P).$$

На рис. 7.49, а представлен преобразователь с изменяющейся в соответствии со значением измеряемой величины площадью воз-

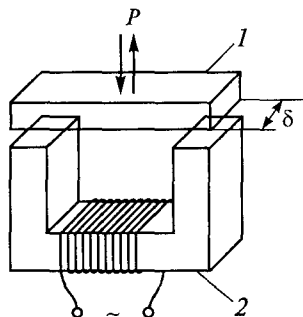


Рис. 7.48. Устройство индуктивного преобразователя:

1 — сердечник; 2 — обмотка

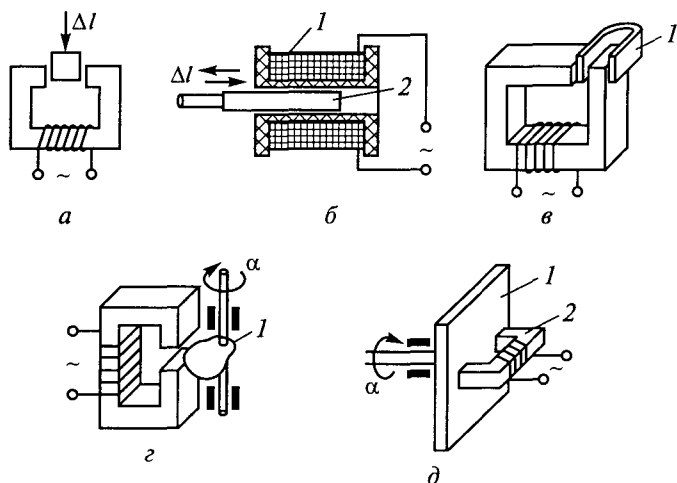


Рис. 7.49. Разновидности индуктивных преобразователей:

*a* — с изменяющейся площадью воздушного зазора; *б* — с разомкнутой магнитной цепью (*1* — катушка; *2* — сердечник); *в* — разновидность преобразователя при введении в воздушный зазор витка *1*; *г* — с изменяющимся профилем диска; *д* — для измерения угловых перемещений до  $90^\circ$  (*1*, *2* — сердечники)

душного зазора. Преобразователи такого типа применяются при измерении перемещений  $\Delta l$  порядка  $5 \dots 20$  мм.

На рис. 7.49, *б* представлен преобразователь с разомкнутой магнитной цепью. Он состоит из катушки *1*, внутри которой помещен стальной сердечник *2*. Вследствие перемещения сердечника, изменяется индуктивность катушки, которая является функцией измеряемой механической величины.

В преобразователе (рис. 7.49, *в*) при введении в воздушный зазор коротко замкнутого витка *1* индуктированные в витке токи создают активные потери, что эквивалентно введению в магнитную цепь реактивного магнитного сопротивления  $X_M$ . Введение  $X_M$ , наряду с уменьшением площади рабочего воздушного зазора, увеличивает общее магнитное сопротивление, пропорциональное перемещению витка.

Изменяя профиль диска в преобразователе (рис. 7.49, *г*), можно получить любой вид зависимости индуктивности от угла поворота диска. Преобразователи данного типа используются для измерения угловых перемещений до  $180 \dots 360^\circ$ .

В преобразователе, применяемом для измерения угловых перемещений до  $90^\circ$  (рис. 7.49, *д*), магнитопровод состоит из неподвижного сердечника *2* и подвижного, поворачиваемого, сердечника *1*. Оба сердечника выполняются из шихтованной стали. При совпадении направлений шихтовки вторичные токи в пластинах



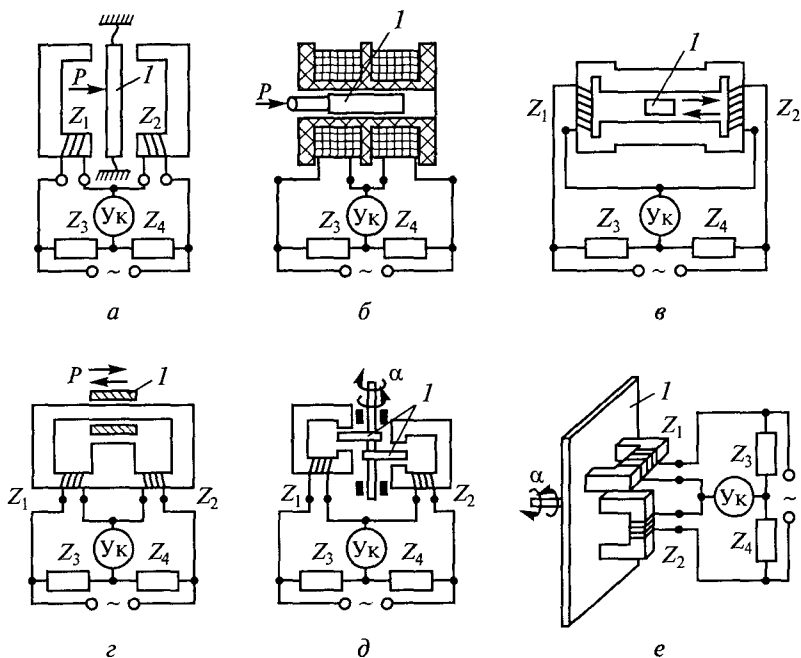


Рис. 7.50. Разновидности дифференциальных преобразователей:

*a* — с подвижным сердечником; *б* — с разомкнутой магнитной цепью; *в* — с замкнутой магнитной цепью; *г* — с подвижной катушкой; *д* — с изменяющимся профилем диска; *е* — для измерения угловых перемещений; *l* — якорь

сердечника *l* будут минимальными, а индуктивность обмотки — максимальной. Если повернуть сердечник *l* относительно сердечника 2, то размагничивающее действие вторичных токов будет возрастать, а индуктивность обмотки уменьшаться.

**Недостатки:** функции преобразования нелинейны, аддитивные погрешности (например температурная погрешность, связанная с изменением активного сопротивления обмотки) велики и сила притяжения якоря значительна.

**Дифференциальные преобразователи.** Этих недостатков лишены дифференциальные преобразователи, которые состоят из двух одинаковых одинарных преобразователей, имеющих общий подвижный элемент. Примеры схем таких преобразователей приведены на рис. 7.50, *a—e*. При перемещении якоря *l* индуктивность плеча  $Z_1$  возрастает, а плеча  $Z_2$  уменьшается. Благодаря использованию дифференциальных цепей уменьшается аддитивная погрешность, улучшается линейность функции, в два раза возрастает чувствительность и уменьшается сила притяжения якоря.

Электрическое сопротивление индуктивного преобразователя можно выразить в виде

$$L = R + j\omega \frac{w^2}{Z_{\text{м.ст}} + \delta/\mu_0 S},$$

где  $Z_{\text{м.ст}}$  — комплексное магнитное сопротивление стали.

Нетрудно видеть, что сопротивление  $Z$  связано с длиной  $\delta$  воздушного зазора гиперболической зависимостью (рис. 7.51), вследствие чего при начальном зазоре  $\delta_0$  линейный участок характеристики ограничен значением  $\Delta\delta$ , равным  $(0,1 \dots 0,15) \delta_0$ .

Увеличение линейного участка характеристики дает возможность использовать дифференциальные преобразователи, у которых обе катушки преобразователей включены обычно в два соседних плеча. При  $P=0$  (см. рис. 7.50, а) якорь  $I$  расположен симметрично относительно обеих катушек и магнитные сопротивления для потоков, создаваемых катушками, одинаковы. Изменения магнитных сопротивлений, происходящие под воздействием измеряемой величины, имеют противоположные знаки. Сила тока в измерительной диагонали моста

$$I_{\text{ук}} = k(Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3),$$

где  $k$  — постоянный множитель, В/Ом<sup>2</sup>;  $Z_1$  и  $Z_2$  — полные сопротивления катушек преобразователя, Ом.

При начальном значении измеряемой неэлектрической величины мост уравновешен ( $Z_1 = Z_2$ ). При использовании симметричного моста ( $Z_3 = Z_4$ ) под действием измеряемой величины сила тока изменяется согласно выражению

$$I_{\text{ук}} = k(Z_1 - Z_2).$$

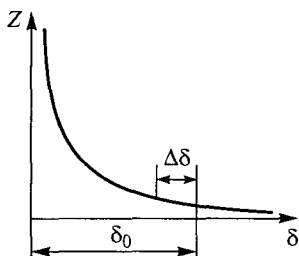


Рис. 7.51. Изменение магнитного сопротивления стали от величины воздушного зазора

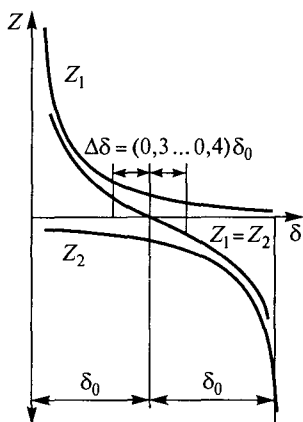


Рис. 7.52. Зависимости  $Z = f(\delta)$  при дифференциальном включении преобразователей

На рис. 7.52 изображены функции  $Z_1 = f_1(\delta)$ ;  $Z_2 = f_2(\delta)$  и  $Z_1 - Z_2 = f_3(\delta)$  применительно к рис. 7.50, а. Из характера функций видно, что линейный участок характеристики дифференциального преобразователя расширился по сравнению с одинарным преобразователем.

Дифференциальная схема включения преобразователей позволила увеличить рабочее перемещение  $\Delta\delta$  якоря до  $\Delta\delta = 0,3 \dots 0,4$  (см. рис. 7.52). Широкое применение дифференциальных преобразователей объясняется не только большей линейностью функции преобразования, но значительно меньшими погрешностями.

**Трансформаторные преобразователи.** *Взаимоиндуктивными* или *трансформаторными* называются преобразователи, преобразующие значение измеряемой величины в значение взаимной индуктивности.

При наличии двух обмоток на магнитной цепи при изменении магнитного сопротивления  $R_M$  будет изменяться взаимная индуктивность  $M$  между обмотками катушек

$$M = w_1 w_2 / l_M.$$

Различают два вида трансформаторных преобразователей: с изменяющимся магнитным сопротивлением (рис. 7.53, а)

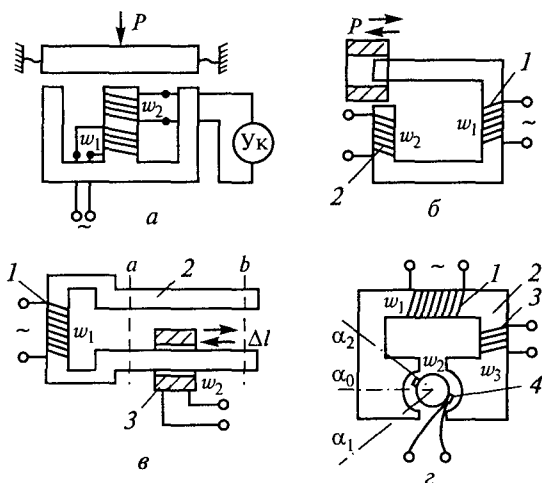


Рис. 7.53. Разновидности трансформаторных преобразователей:

а — с подвижным сердечником; б — с подвижной катушкой (1 и 2 — обмотки трансформатора); в — для измерения больших линейных перемещений (1 — обмотка возбуждения; 2 — магнитопровод; 3 — подвижная обмотка); г — для измерения больших угловых перемещений (1, 3, 4 — обмотки; 2 — магнитная цепь)

и постоянным магнитным сопротивлением и подвижной обмоткой (рис. 7.53, б, в).

На рис. 7.53, а представлен трансформаторный преобразователь с подвижным сердечником. Обмотка  $w_1$  питается переменным током (частотой  $\omega$ ). Если МДС  $F_1$ , т.е. ток  $I_1$ , поддерживать постоянным, то поток  $\Phi$  и индуцированная во вторичной обмотке ЭДС будут функциями длины воздушного зазора, связанной с силой  $P$  соотношением:

$$E_2 = \omega w_2 \Phi = \omega w_2 \frac{F_1}{Z_M} = f(P).$$

В преобразователе рис. 7.53, б под воздействием измеряемой величины перемещается коротко замкнутый виток, с которым сцепляется определенная часть потока. Поток, сцепляющийся с витком, индуцирует в нем токи, зависящие от положения витка в зазоре, создает активные потери, т.е. вносит дополнительное реактивное магнитное сопротивление. При этом поток сцепления обмоток 1 и 2 изменяется и изменяет ЭДС во вторичной обмотке.

Преобразователь (см. рис. 7.53, в) предназначен для измерения больших линейных перемещений  $\Delta l$  и состоит из магнитопровода 2 с рабочей частью в виде двух параллельных полос, обмотки возбуждения 1 и подвижной обмотки 3. При перемещении обмотки 3 от положения а до положения б индуцированная в обмотке 3 ЭДС возрастает.

Преобразователи типа (рис. 7.53, г) можно применять для измерения больших угловых перемещений. Обмотка  $w_1$  включается в цепь переменного тока, имеющего частоту  $\omega$  и создает магнитный поток. Часть его проходит через обмотку 4 и наводит в ней  $E_2$ . Обмотка 4 в таком преобразователе выполнена в виде рамки, имеющей возможность поворачиваться в кольцевом зазоре магнитной цепи 2. При крайних положениях рамки ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) индуцированная в ней ЭДС  $E_2$  имеет максимальное значение. По мере поворота рамки в горизонтальное положение ЭДС  $E_2$  линейно уменьшается до нуля. При переходе рамки через горизонтальное положение фаза  $E_2$  изменяется на  $180^\circ$ . Обмотка 3 включается последовательно с обмоткой 4 рамки для получения изменения ЭДС преобразователя от нуля до максимума при повороте рамки от  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$ .

Для расширения линейного участка характеристики  $E = f(\delta)$  трансформаторные преобразователи с подвижным сердечником (рис. 7.54, а) и подвижным короткозамкнутым витком (рис. 7.54, б) выполняют в виде дифференциальных трансформаторных преобразователей.

Расчет индуктивных и взаимно индуктивных преобразователей складывается из определения полного магнитного сопротивления

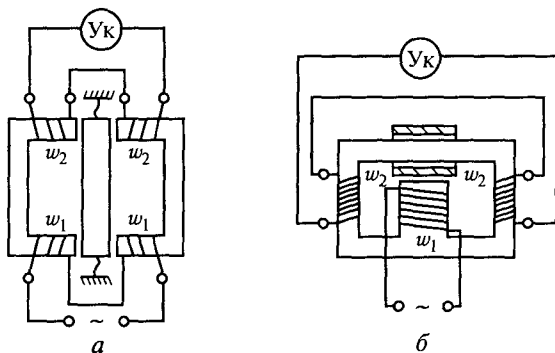


Рис. 7.54. Дифференциальные трансформаторные преобразователи:  
*а* — с подвижным сердечником; *б* — с подвижным витком

$R_m$ , т.е. расчета его магнитной цепи и последующего вычисления электрических параметров ( $L$ ,  $M$ ) преобразователя.

Выбор МДС катушки определяется рядом факторов, так как от МДС зависят, по крайней мере, четыре величины, учет которых необходим при проектировании преобразователя:

- значение полной мощности преобразователя, которую в первом приближении можно принять равной его реактивной мощности:

$$P_{\text{пр}} = \omega \Phi F,$$

где  $P_{\text{пр}}$  — полная мощность преобразователя;  $\omega$  — круговая частота;  $\Phi$  — магнитный поток;  $F$  — МДС.

Если мощность указателя задана, то мощность преобразователя должна быть в десятки — сотни раз больше мощности указателя;

- габаритные размеры преобразователя, так как сила тока в проволоке и число витков катушки определяют габаритные размеры катушки;

- температура нагрева катушки, так как она зависит от удельной потери активной мощности  $P'$  в преобразователе

$$P' = P/S,$$

где  $P$  — активная мощность преобразователя;  $S$  — поверхность охлаждения катушки.

Так как относительное изменение сопротивления  $\Delta Z/Z$  катушки, обусловленное рабочим перемещением якоря, не превышает практически 10... 20 %, то изменение сопротивления постоянному току вследствие нагрева должно быть минимальным, поэтому величину  $P$  рекомендуется ограничивать значением 50... 100 Вт/м<sup>2</sup>;

- электромеханическая сила  $F_3$  притяжения якоря к сердечнику

$$F_3 = (Iw)^2 \frac{\Delta \gamma_\delta}{\Delta \delta},$$

где  $\gamma_{\delta} = S\mu_0/\delta$  — магнитная проводимость воздушного зазора.  
Отсюда

$$F_3 = \frac{S\mu_0}{8^2} (Iw)^2.$$

Необходимо, чтобы электромеханическая сила была много меньше усилия, вызывающего измеряемое перемещение. В противном случае работа преобразователя будет неустойчивой.

Выбранное значение МДС может быть обеспечено либо малым током при большом числе витков, либо большим током при малом числе витков. При определении числа витков катушки заданными величинами являются МДС и площадь сечения окна катушки. Ни полная мощность, ни относительная чувствительность преобразователя от числа витков не зависят:

$$P = I^2 Z; \quad k = \frac{\Delta Z/\Delta Z}{\Delta \delta} = \frac{\varepsilon}{\Delta \delta}.$$

При выборе числа витков катушки необходимо правильно сочетать сопротивления указателя и цепи, элементом которой является преобразователь.

**Погрешности индуктивных преобразователей.** В основном они обусловлены колебаниями напряжения и частоты источника питания, а также колебаниями температуры преобразователя. Для дифференциальных преобразователей с идеальной симметрией равновесного моста отсутствуют погрешности, вызванные внешними факторами. Однако идеальной симметрии обеих половин преобразователя достигнуть практически невозможно, поэтому эти погрешности имеют место и в дифференциальных преобразователях.

Зависимость параметров преобразователя от величины и частоты питающего напряжения обусловлена нелинейностью магнитного сопротивления стальной части магнитной цепи и резко зависит от индукции и режима работы преобразователя. При работе преобразователя в цепи равновесного моста значение индукции в сердечнике целесообразно выбирать соответствующим  $\mu_{\max}$ , так как в этом случае работа измерительной цепи преобразователя практически не зависит от колебания напряжения источника питания.

При измерении динамических процессов частота источника питания должна быть в 8... 10 раз больше частоты измеряемого процесса, чтобы запись измеряемой величины проводилась без искажений. При низких частотах измеряемого процесса преобразователи питаются током промышленной частоты.

При использовании сердечника, сделанного из листовой стали, можно увеличить частоту питания до 1... 2 кГц, а при использовании ферритовых сердечников — до 100... 300 кГц.

Радикальное средство уменьшения погрешностей от внешних факторов — увеличение относительной чувствительности преобразователя к измеряемой величине, так как чувствительность преобразователя к внешним факторам не зависит от измеряемой величины.

Индуктивные преобразователи широко применяют в основном для измерения линейных и угловых перемещений. Рассмотрим принцип использования индуктивных преобразователей для измерения различных неэлектрических величин.

**Индуктивный микрометр.** Предназначен для измерения линейных размеров и для измерения отклонения от заданных размеров. Преобразователи индуктивных микрометров можно выполнить как с рычажной передачей от измерительного штока к якорю, так и без нее.

Преобразователи безрычажной передачи конструктивно проще, но обладают малой относительной чувствительностью, а следовательно, большими погрешностями, так как здесь перемещение якоря равно измеряемому перемещению. В преобразователе с рычажной передачей перемещение якоря в десятки раз больше, чем измеряемое перемещение, что приводит к большим значениям относительной чувствительности и к малым погрешностям измерения. Наименьший предел измерения у подобных микрометров достигает 100 мкм, в то время как у безрычажных микрометров наименьший предел измерения составляет 300...400 мкм.

**Индуктивный толщиномер** (рис. 7.55). Он предназначен для измерения толщины гальванических покрытий в диапазоне 2...60 мкм.

Преобразователь представляет собой трансформатор  $TV_1$  с разомкнутой магнитной цепью, магнитный поток которого замыкается через испытуемую деталь  $I$ . Величина магнитного потока трансформатора при заданной МДС первичной обмотки зависит от толщины ее покрытия, следовательно, индуцированная во вторичной обмотке ЭДС будет функцией толщины покрытия. Магнитоэлектрический измеритель включен через выпрямительный узел. Реостат позволяет регулировать равновесие цепи. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В через трансформаторы  $TV_2$ ,  $TV_3$  и бареттер Б.

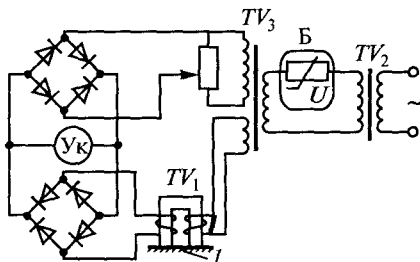


Рис. 7.55. Схема прибора для измерения толщины гальванических покрытий:

$I$  — испытуемая деталь

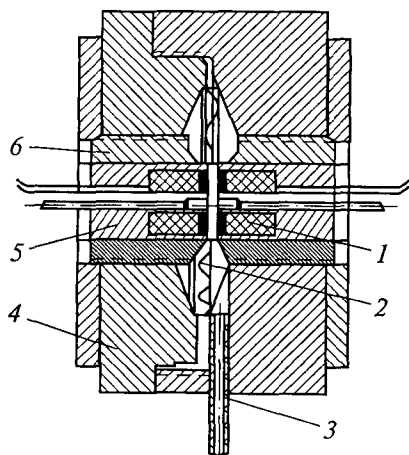


Рис. 7.56. Устройство индуктивного датчика манометра:

1 — катушка; 2 — мембрана; 3 — трубка; 4 — корпус преобразователя; 5 — сердечник; 6 — стакан

**Индуктивный манометр** (рис. 7.56). Его применяют для измерения малых давлений воздуха (от  $15 \text{ Н/м}^2$ , т.е. 1,5 мм вод.ст.), изменяющихся с частотой до 800 Гц. Измеряемое давление воздействует через трубку 3 на тонкую гофрированную мембрану 2, припаянную к корпусу преобразователя 4. Магнитный поток, создаваемый катушками 1, замыкается через сердечник 5, стаканы 6 и мембрану 2. При воздействии измеряемого давления на мембрану с одной стороны она прогибается, и магнитное сопротивление для потока одной катушки уменьшается, а для потока другой катушки увеличивается. Катушки преобразователя включают в соседние

плечи моста, благодаря чему устраняются погрешности, обусловленные влиянием изменения окружающей температуры.

Существуют индуктивные уровнемеры, виброметры, акселерометры и др.

## 7.8. МАГНИТОУПРУГИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Магнитоупругие преобразователи являются разновидностью электромагнитных преобразователей. Они основаны на явлении изменения магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнитных тел в зависимости от возникающих в них механических напряжений  $\sigma$ , связанных с воздействием на ферромагнитные тела механических сил  $P$  (растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих). Изменение магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника вызывает изменение магнитного сопротивления сердечника  $R_m$ . Изменение же  $R_m$  ведет к изменению индуктивности катушки  $L$ , находящейся на сердечнике. Таким образом, в магнитоупругом преобразователе имеем следующую цепь преобразований:

$$P \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_m \rightarrow L. \quad (7.13)$$

Магнитоупругие преобразователи могут иметь две обмотки (трансформаторного типа). Под действием силы вследствие изменения магнитной проницаемости изменяется взаимная индуктив-



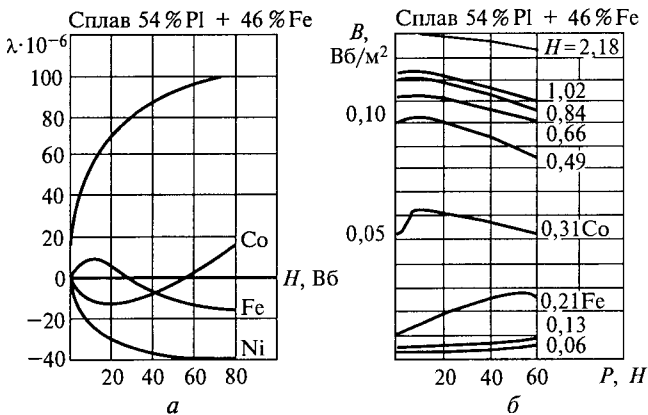


Рис. 7.57. Зависимости  $\lambda = f(H)$  (а) и  $B = f(P)$  (б)

ность  $M$  между обмотками и наводимая ЭДС вторичной обмотки  $E$ . Цепь преобразования в этом случае имеет вид

$$P \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_M \rightarrow M \rightarrow E. \quad (7.14)$$

Эффект изменения магнитных свойств ферромагнитных материалов под влиянием механических деформаций называют *магнитоупругим эффектом*.

Существует и обратное явление: ферромагнитное тело, внесенное в магнитное поле, изменяет свои размеры, иначе говоря, внешнее магнитное поле вызывает механические деформации ферромагнитного тела. Явления, возникающие вследствие взаимной зависимости между механическими и магнитными состояниями ферромагнитных тел, называются *магнитострикционными*. Под численным значением магнитострикции понимают относительное изменение  $\Delta l/l = \lambda$  длины  $l$  стержня, обусловленное воздействием внешнего магнитного поля. Опыт показывает, что магнитострикционные и магнитоупругие явления не однозначны. Некоторые ферромагнитные тела имеют положительную магнитострикцию, т.е. увеличивают размеры в направлении магнитного поля, некоторые — отрицательную, т.е. тела уменьшают свои размеры в направлении магнитного поля. Величина магнитострикции и ее знак зависят от материала магнитной цепи, его термообработки, температуры и напряженности магнитного поля.

Характер зависимости магнитострикции  $\lambda = \Delta l/l$  от напряженности  $H$  намагничивающего поля для различных ферромагнитных материалов показан на рис. 7.57, а.

Магнитоупругий эффект также неоднозначен. Для одного и того же материала под воздействием механического напряжения магнитная проницаемость в слабых полях может возрастать, в то время как в сильных полях падать. На рис. 7.57, б приведены кривые

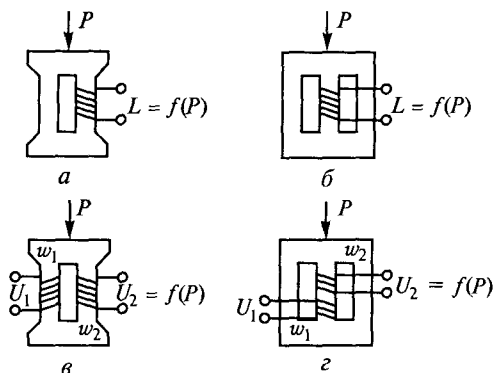


Рис. 7.58. Магнитоупругие преобразователи: индуктивного (а, б) и трансформаторного (в, з) типов

изменения индукции  $B$  в функции механической нагрузки при различных значениях напряженности поля  $H$  для проволоки из мягкой стали.

**Типы магнитоупругих преобразователей.** Магнитоупругие преобразователи могут работать как переменные индуктивные сопротивления, величина которых определяется приложенным к сердечнику механическим усилием, и как трансформаторные преобразователи с переменной взаимной индуктивностью между обмотками.

На рис. 7.58 представлены разновидности магнитоупругих преобразователей.

Магнитная цепь магнитоупругих преобразователей выполняется чаще всего из сплошного материала. Сердечник имеет щели для размещения обмотки. В разъемных конструкциях готовую катушку надевают на сердечник. На рис. 7.59, а изображен тензометрический магнитоупругий преобразователь индуктивного типа, в котором в качестве сердечника 2 катушки 1 используется проволока из пермаллоя.

На рис. 7.59, б изображена магнитная цепь преобразователя, выполненная из тонкого листа пермаллоя, наклеиваемого на испытываемую деталь.

У магнитоупругих преобразователей на переменном токе ЭДС во вторичной обмотке является функцией изменения взаимной индуктивности между катушками, обусловленной изменением магнитной проницаемости сердечника. Если первичную обмотку магнитоупругого преобразователя трансформаторного типа питать постоянным током, то он превращается в магнитоупругий преобразователь индукционного типа. В этом случае при измерении быстропеременных процессов во вторичной обмотке будет индуцироваться ЭДС, мгновенное значение которой определяется по формуле

$$e = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -cw_2 \frac{d\sigma}{dt}, \quad (7.15)$$

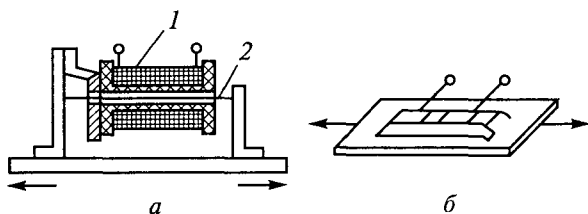


Рис. 7.59. Тензометрический магнитоупругий преобразователь индуктивного типа (а) и его магнитная цепь (б):

1 — катушка; 2 — сердечник

где  $w_2$  — число витков вторичной обмотки;  $c$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала и напряженности намагничивающего поля;  $\sigma$  — напряжение в материале сердечника.

Чувствительность магнитоупругих преобразователей можно характеризовать, подобно тензосопротивлениям, коэффициентом тензочувствительности

$$S_\epsilon = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l} = \frac{\epsilon_\mu}{\epsilon_l} \quad (7.16)$$

в тех случаях, когда магнитоупругие преобразователи используются для измерения деформации  $\Delta l$  других деталей, т. е. когда естественной входной величиной является перемещение. Обычно вследствие массивности магнитной цепи магнитоупругие преобразователи в качестве естественной величины воспринимают значение воздействующей на него силы. В этом случае относительной магнитоупругой чувствительностью материала, измеряемую в % на 1 Н/мм<sup>2</sup>, называют относительное изменение магнитной проницаемости  $\Delta\mu/\mu$ , вызываемое единицей механического напряжения  $\sigma$ , т. е.

$$S_m = \frac{\Delta\mu/\mu}{\sigma}$$

Теория ферромагнетизма дает теоретические соотношения, позволяющие обоснованно подойти к выбору материала магнитоупругого преобразователя.

**Погрешности магнитоупругих преобразователей.** Погрешности из-за нелинейности функции преобразования. Функция преобразования магнитоупругих преобразователей, как правило, нелинейна. Имеется ряд методов уменьшения этой нелинейности: при сокращении диапазона измеряемой силы, при соответствующем выборе магнитного режима преобразователя и т. д. Применение соответствующих мер позволяет уменьшить погрешность из-за нелинейности функции преобразования до 1,5...2 %.

**Магнитоупругая погрешность.** Это погрешность невоспроизводимости магнитного состояния сердечника преобразо-

зователя при нагрузке и разгрузке. Ее возникновение обусловлено магнитоупругим гистерезисом. Магнитоупругая погрешность  $\gamma_m$  уменьшается с увеличением напряженности магнитного поля в сердечнике. Для получения возможно меньшей магнитоупругой погрешности сердечник следует изготавливать из ферромагнитных материалов с узкой петлей магнитного гистерезисного цикла и высоким пределом упругости.

**Погрешность от колебания напряжения.** При изменении намагничивающего тока меняется как начальное значение магнитной проницаемости, так и величина магнитоупругого эффекта. Поэтому стабилизация напряжения питания необходима для всех типов датчиков. Иначе погрешность от колебания напряжения источника питания будет недопустимо большой.

**Температурная погрешность.** Колебания температуры преобразователя вызывают изменения: сопротивления  $R$  катушки постоянному току, начальной магнитной проницаемости и магнитострикции, а следовательно, и магнитоупругого эффекта. Эти изменения создают температурную погрешность. Но изменение активного сопротивления  $R$  мало сказывается на работе преобразователя, так как активное сопротивление значительно меньше полного сопротивления преобразователя.

Изменение магнитной проницаемости может иметь положительный и отрицательный знаки, в зависимости от материала преобразователя и рабочего значения напряженности поля. Таким образом, в зависимости от выбранного материала сердечника и рабочего значения напряженности поля, отдельные факторы при колебаниях температуры могут компенсировать друг друга в известных пределах. В случаях необходимости температурную погрешность можно скорректировать при помощи включения в соседнее плечо моста корректирующего преобразователя, идентичного с рабочим и находящегося в тех же температурных условиях, но не подвергающегося нагрузке.

**Применение магнитоупругих преобразователей.** Магнитоупругие преобразователи применяют:

- для измерения больших давлений (больше  $10 \text{ Н/мм}^2$ , или  $100 \text{ кг/см}^2$ ), так как они непосредственно воспринимают давление и не нуждаются в дополнительных преобразователях;
- для измерения силы. В этом случае предел измерения прибора определяется площадью магнитоупругого преобразователя. Данные преобразователи деформируются под действием силы очень незначительно. Так, при  $l = 50 \text{ мм}$ ,  $\Delta l \leq 10 \text{ мкм}$  они имеют высокую жесткость и собственную частоту до  $20 \dots 50 \text{ кГц}$ . Допустимые напряжения в материале магнитоупругого преобразователя не должны превышать  $40 \text{ Н/мм}^2$ .

Рассмотрим принцип использования магнитоупругих преобразователей для измерения различных неэлектрических величин.

**Измерение крутящего момента.** В качестве примера использования магнитоупругих преобразователей на рис. 7.60 приведена конструкция датчика магнитоупругого торсионметра, применяемого для измерения крутящего момента на буровом инструменте. Магнитоупругим элементом является участок рабочего вала 2, выполненный из ферромагнитного материала. Этот участок вала охвачен кольцевым статором 1. Статор имеет внутренние радиально расположенные выступы (полюсы) 4 из листовой трансформаторной стали, на которые намотаны намагничивающие катушки 6, питаемые переменным током.

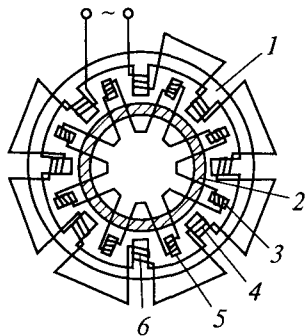


Рис. 7.60. Устройство датчика магнитоупругого торсионметра:

1 — статор; 2 — рабочий вал; 3 — измерительные катушки; 4 — полюсы; 5 — сердечник; 6 — намагничивающие катушки

Катушки соединены последовательно так, чтобы полюса чередовались. При отсутствии крутящего момента направление магнитного потока между полюсами перпендикулярно образующей вала (линия 2—2 на рис. 7.61).

Измерительные катушки 3 преобразователя (см. рис. 7.60) имеют сердечник 5 П-образной формы из трансформаторной стали. Их оси расположены вдоль образующей вала. Катушки соединены последовательно. При отсутствии крутящего момента концы сердечника 5 расположены на одной и той же относительной магнитной эквипотенциальной линии 0,5 и, следовательно, разности магнитного потенциала между ними нет. При действии крутящего момента изменится магнитная проницаемость  $\mu$  материала вала, причем в направлениях, в которых вал испытывает деформацию сжатия,  $\mu$  будет уменьшаться, а в направлениях деформации растяжения — увеличиваться. Вследствие возникшей магнитной анизотропии изменится картина поля между полюсами намагничивающих катушек, т. е. полюса 2—2 сердечника измерительной катушки уже не будут находиться на одной эквипотенциальной линии и через сердечник пойдет часть магнитного потока. При изменении знака момента картина поля изменится на обратную и на  $180^\circ$  изменится фаза потока, а следовательно, и фаза выходного напряжения, индуцированного в катушке.

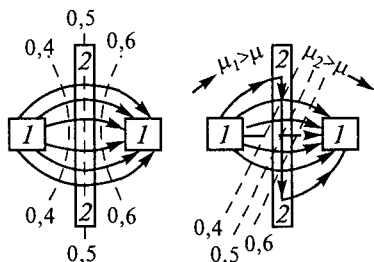


Рис. 7.61. Картина поля между полюсами 1—1, 2—2 намагничивающих катушек 1—1, 2—2

**Магнитоупругий динамометр.** Это прибор для измерения сосредото-

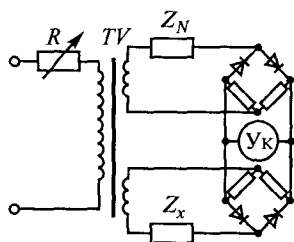


Рис. 7.62. Измерительная цепь магнитоупругого динамометра

ченных сил. На рис. 7.62 представлена измерительная цепь магнитоупругого динамометра, где  $Z_x$  — сопротивление рабочего преобразователя, а  $Z_N$  — сопротивление ненагруженного (нерабочего) преобразователя. В исходном состоянии ( $Z_x = Z_N$ ) измерительная цепь уравновешена и ток через указатель равен нулю. При  $Z_x \neq Z_N$  через указатель протекает ток. Шкала указателя может быть проградуирована в единицах измеряемой силы.

Частота собственных колебаний преобразователя достигает нескольких десятков тысяч герц, что дает возможность при соответствующем выборе частоты источника питания измерять динамические силы до частот порядка 10 кГц.

## 7.9. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Электролитические преобразователи относятся к типу электрохимических преобразователей. В общем случае электрохимический преобразователь представляет собой электролитическую ячейку, заполненную раствором с помещенными в нее электродами, служащими для включения преобразователя в измерительную цепь. Как элемент электрической цепи электролитическая ячейка может характеризоваться развиваемой ею ЭДС, падением напряжения от проходящего тока, сопротивлением, емкостью и индуктивностью. Выделяя зависимость между этими электрическими параметрами и измеряемой неэлектрической величиной, а также подавляя действие других факторов, можно создать преобразователи для измерения состава и концентрации жидких и газообразных сред, давлений, перемещений, скорости, ускорения и других величин. Электрические параметры ячейки зависят от состава раствора и электродов, химических превращений в ячейке, температуры, скорости перемещения раствора и др. Связи между электрическими параметрами электрохимических преобразователей и неэлектрическими величинами определяются законами электрохимии.

Растворы солей, кислот и оснований в воде и в ряде других растворителей обладают электропроводностью и называются *проводниками второго рода*. При растворении происходит диссоциация — расщепление молекул на положительные и отрицательные ионы. Вещества, расщепляющиеся при растворении на ионы и образующие электропроводящие растворы, называются *электролитами*. Под воздействием электрического поля положительные ионы движутся к

отрицательному электроду, а отрицательные ионы — к положительному электроду и переносят электрические заряды.

Электропроводность чистой дистиллированной воды близка к нулю и возрастает по мере повышения концентрации растворенных веществ. Растворы характеризуются:

- молярной массой  $P$ , г/моль;
- молярной концентрацией  $C$ , моль/м<sup>3</sup>;
- химической активностью  $a$ .

Активность  $a$  равна произведению эквивалентной концентрации  $C$  на коэффициент активности  $f$ , равный единице для растворов с небольшой концентрацией и уменьшающейся по мере повышения концентрации (из-за уменьшения степени диссоциации и подвижности ионов).

Удельная электропроводность раствора пропорциональна его эквивалентной химической активности:

$$\gamma = \lambda f C = \lambda a.$$

Коэффициент  $\lambda$  называется *эквивалентной электропроводностью*. Удельная электропроводность зависит нелинейно от весовой концентрации  $P$  или эквивалентной концентрации  $C$ . Зависимость проводимости электролитов от их концентрации дает возможность использовать электролитическую ячейку в качестве измерительного преобразователя. Естественной входной величиной преобразователя является значение химической активности  $a$  раствора, выходной величиной — электрическая проводимость между электродами.

**Принцип действия и погрешности электролитического преобразователя сопротивления.** Принцип действия электролитических преобразователей основан на зависимости сопротивления электролитической ячейки от состава и концентрации электролита, а также от геометрических размеров ячейки. Сопротивление столба жидкости электролитического преобразователя

$$R = \frac{\rho h}{S} = \frac{1}{\gamma} k, \quad (7.17)$$

где  $\gamma = 1/\rho$  — удельная проводимость электролита;  $k$  — постоянная преобразователя, зависящая от соотношения его геометрических размеров, определяемая обычно экспериментально.

Практически здесь можно применить любой из методов для измерения сопротивления. Измерение производится в основном на переменном токе (для того чтобы не происходило электролиза во время измерения). При включении прибора в сеть постоянного тока напряжение питания цепи должно быть достаточно велико, чтобы ЭДС поляризации не вызвала большой погрешности измерения.

Градуировку приборов для измерения концентрации растворов производят двумя методами:

- с помощью образцовых растворов;
- с помощью образцовых магазинов сопротивления, предварительно вычислив значения сопротивления для ряда заданных концентраций.

Второй способ является более простым и удобным, но сопротивление, подсчитанное по его постоянной, представляет его активное сопротивление, в то время как при работе на переменном токе показание прибора соответствует полному сопротивлению преобразователя. Различие между полным и активным сопротивлением, характеризуемое сдвигом по фазе между током и напряжением в преобразователе, может вызвать погрешность измерения прибора, достигающую в некоторых случаях до нескольких десятков процентов. Дело в том, что при прохождении через преобразователь переменного тока имеет место ряд явлений, эквивалентных в электрическом отношении влиянию емкости конденсатора, включенного последовательно или параллельно активному сопротивлению преобразователя. Это емкость двойного слоя зарядов на границе электрод — раствор, называемая *статической емкостью*, которую можно считать включенной последовательно с сопротивлением раствора. Следует также учитывать емкость, обусловленную перемещением зарядов относительно друг друга и относительно зарядов на электродах, называемую *электролитической емкостью*, которую можно считать включенной параллельно сопротивлению раствора электролита.

Для уменьшения влияния этих емкостей сопротивление преобразователей выбирается 500 ... 1000 Ом, чтобы падение напряжения на нем было в пять-шесть раз больше падения напряжения на емкости, что позволяет градуировать прибор при помощи образцовых сопротивлений.

Электропроводность раствора в значительной степени зависит от температуры. Температурный коэффициент проводимости при комнатной температуре  $\beta = 0,016^\circ\text{C}^{-1}$  для кислот,  $\beta = 0,024^\circ\text{C}^{-1}$  — для солей,  $\beta = 0,019^\circ\text{C}^{-1}$  — для оснований. С увеличением температуры значение  $\beta$  уменьшается. Существует много различных методов компенсации температурной погрешности, однако все эти методы дают несовершенную температурную компенсацию, причем погрешность от изменения температуры растет с увеличением диапазона изменения температуры и концентрации электролита.

На рис. 7.63 приведена схема электролитического преобразователя с температурной компенсацией. Погрешность компенсируется здесь путем последовательного включения компенсирующего сопротивления.

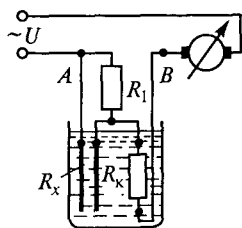


Рис. 7.63. Электролитический преобразователь с температурной компенсацией



Сопротивление  $R_1$ , включенное параллельно электродам, выполнено из манганина, а компенсирующее  $R_k$  — из меди и никеля. В исходном состоянии сопротивление преобразователя

$$R_{AB} = \frac{R_x R_1}{R_x + R_1} + R_k.$$

При повышении температуры на  $\theta$  градусов

$$R'_{AB} = \frac{R_x R_1}{(1 + \beta_x \theta) \left( \frac{R_x}{1 + \beta_x \theta} + R_1 \right)} + R_k (1 + \alpha_k \theta),$$

где  $\beta_x$  — температурный коэффициент проводимости электролита;  $\alpha_k$  — температурный коэффициент сопротивления  $R_k$ .

Компенсация будет иметь место при  $R_{AB} = R'_{AB}$ . Таким образом, получаем квадратичное уравнение относительно  $R_x$ , на основании которого заключаем, что при заданных значениях  $R_1$  и  $R_k$  компенсация для заданной температуры  $\theta$  будет иметь место при двух значениях  $R_x$ .

Может быть решена и обратная задача, т. е. определение значения  $R_1$  и  $R_k$  для заданного диапазона  $R_x$  (от  $R_{x1}$  до  $R_{x2}$ ) и заданного повышения температуры  $\theta$ .

Решая уравнение  $R_{AB} = R'_{AB}$  относительно  $R_1$  и  $R_k$  для двух значений  $R_x$  ( $R_{x1}$  и  $R_{x2}$ ) получим

$$R_1 = \sqrt{\frac{R_{x1} + R_{x2}}{1 + \beta_x \theta}}, \quad R_k = \frac{R_{x1} R_1^2 \beta_x}{[R_{x1} + R_1 (1 + \beta_x \theta)] (R_{x1} + R_1) \alpha_k}.$$

Следовательно, для любых двух значений концентрации можно подсчитать величины  $R_1$  и  $R_k$  для заданного диапазона изменения температуры. Погрешность от температуры будет тем больше, чем шире диапазон изменения концентрации и больше диапазон изменения температуры исследуемого раствора электролита. Недостатком этого метода компенсации температурной погрешности является то, что большая величина  $R_k$  затрудняет конструирование преобразователя и отвод теплоты от него. При нагреве же  $R_k$  ток его сопротивление увеличивается и компенсация нарушается.

Электролитические преобразователи в основном применяются для измерения концентрации растворов, кроме того, они используются для измерения перемещения, скорости, механических деформаций, температуры и других физических величин. Рассмотрим принцип использования электролитических преобразователей для измерения различных неэлектрических величин.

**Электромеханические преобразователи перемещения.** При постоянной концентрации электролита изменение сопротивления преобразователя может быть вызвано изменением расстояния

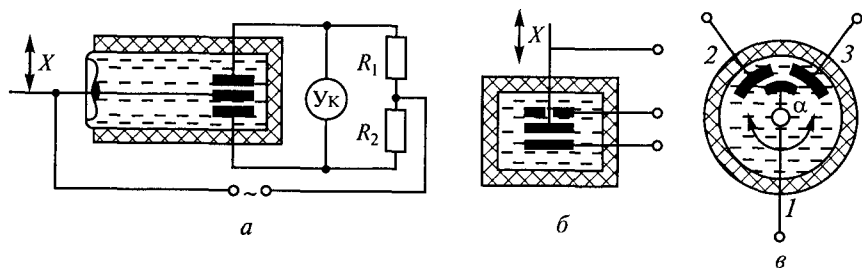


Рис. 7.64. Электролитические преобразователи линейного (а, б) и углового (в) перемещения:

1 — каучуковая трубка; 2 — электролит; 3 — электрод

между электродами или изменением сечения электролита. На этом и основано действие электролитических преобразователей перемещения. Ниже показаны два типа электролитических преобразователей линейного (рис. 7.64, а, б) и углового (рис. 7.64, в) перемещения и схема их включения в мостовую измерительную цепь.

Два плеча моста (см. рис. 7.64, а) образованы сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  дифференциального электролитического преобразователя, имеющего один подвижный электрод (средний) и два неподвижных. Основным достоинством электролитических преобразователей перемещения является то, что для перемещения электрода требуется незначительное усилие.

На рис. 7.65 приведена схема устройства электролитического тензопреобразователя, который состоит из каучуковой трубки 1 с внутренним диаметром порядка 1 мм, заполненной электролитом 2, и двух электродов 3, вставленных в концы трубки так, чтобы ее внутренний объем был полностью заполнен электролитом. При помощи зажимов 4 преобразователь крепится к исследуемому объекту.

В зависимости от состава электролита, длины и сечения канала трубки можно изготовить преобразователи с начальным сопротивлением от сотен до нескольких сотен килоом. Такие преобразователи позволяют измерять очень большие относительные деформации (до  $\Delta l/l = 0,6$ ), их коэффициент тензочувствительности

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 2.$$

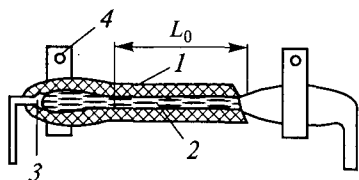


Рис. 7.65. Электролитический тензопреобразователь:

1 — трубка; 2 — электролит; 3 — электроды; 4 — зажимы

Частотная характеристика равномерна до частот 500...700 Гц. Достоинством электролитических преобразователей является возможность использования больших напряжений питания (до 500 В). Резиновый электролитический преобразователь обладает высокими изоляционными свойствами, поэтому его можно применять при измерении деформации деталей в воде и других жидких средах, не разрушающих каучук.

**Интегрирующий акселерометр.** Электролитические преобразователи используются в интегрирующих акселерометрах для измерения скорости ракет. На рис. 7.66 приведена принципиальная схема интегрирующего акселерометра с гидродинамическим подвесом инерционной массы.

Этот прибор представляет собой герметичную камеру 1, заполненную электролитом, в которой плавает поплавков 2. Камера приводится во вращение с постоянной круговой скоростью при помощи вспомогательного двигателя Д. Под действием возникающих при вращении жидкости центробежных сил поплавок устанавливается по оси симметрии камеры, вдоль которой он может перемещаться. При наличии составляющей  $X$  ускорения в направлении оси вращения  $X'X''$  на поплавок действует сила инерции

$$F_{\text{и}} = (P_{\text{ж}} - P_{\text{п}})V_{\text{п}}X'',$$

где  $P_{\text{ж}}$  — плотность жидкости;  $P_{\text{п}}$  — плотность поплавка;  $V_{\text{п}}$  — объем поплавка;  $X''$  — ускорение.

Эта сила, направленная в сторону, противоположную действию ускорения, вызывает движение поплавка и уравновешивается силой гидродинамического сопротивления жидкости, пропорциональной скорости поплавка:

$$F_{\text{г}} = kX',$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $X'$  — скорость движения поплавка.

Приравнявая правые части выражений, можно получить

$$X' = kX'',$$

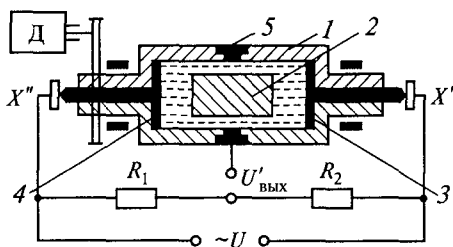


Рис. 7.66. Интегрирующий акселерометр:

1 — герметичная камера; 2 — поплавок; 3—5 — электроды

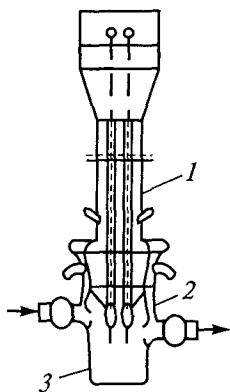


Рис. 7.67.

Электролитический концентромер:

- 1 — основание преобразователя; 2 — измерительные сосуды; 3 — электроды

Внутри камеры размещаются три электрода 3—5, от которых сделаны выводы наружу с помощью скользящих контактов. Измерительная цепь представляет собой мост, два плеча которого образованы сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , а два других плеча — сопротивлениями электролита между средним электродом и двумя торцевыми. Погрешность такого прибора в основном определяется погрешностью от непостоянства вязкости жидкости, определяемой ее температурой.

**Электролитические концентромеры.** Это преобразователи, которые используются для измерения концентрации электролитов. На рис. 7.67 представлен универсальный преобразователь для измерения концентрации по электропроводности жидкости в лабораторных условиях.

Корпус преобразователя изготовлен из химически стойкого стекла с вплавленными платиновыми ступенчатыми электродами 3. Преобразователь имеет сменные измерительные сосуды 2, которые надеваются на основание преобразователя 1. Сменные измерительные сосуды обеспечивают возможность применения преобразователя для измерений в проточной жидкости, при погружении в исследуемый раствор и путем отбора проб. Минимальное, необходимое для измерения, количество жидкости составляет 6...7 мл.

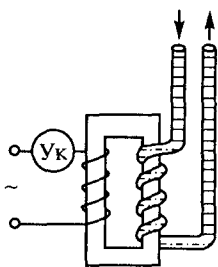


Рис. 7.68. Низкочастотный трансформаторный преобразователь с короткозамкнутым жидкостным витком

где

$$k = (P_{ж} - P_{н})V_{н}/k.$$

Таким образом, перемещение поплавка  $X$  оказывается пропорциональным интегралу во времени от измеряемого ускорения

$$X = k \int X'' dt. \quad (7.18)$$

Внутри камеры размещаются три электрода 3—5, от которых сделаны выводы наружу с помощью скользящих контактов. Измерительная цепь представляет собой мост, два плеча которого образованы сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , а два других плеча — сопротивлениями электролита между средним электродом и двумя торцевыми. Погрешность такого прибора в основном определяется погрешностью от непостоянства вязкости жидкости, определяемой ее температурой.

**Электролитические концентромеры.** Это преобразователи, которые используются для измерения концентрации электролитов. На рис. 7.67 представлен универсальный преобразователь для измерения концентрации по электропроводности жидкости в лабораторных условиях. Корпус преобразователя изготовлен из химически стойкого стекла с вплавленными платиновыми ступенчатыми электродами 3. Преобразователь имеет сменные измерительные сосуды 2, которые надеваются на основание преобразователя 1. Сменные измерительные сосуды обеспечивают возможность применения преобразователя для измерений в проточной жидкости, при погружении в исследуемый раствор и путем отбора проб. Минимальное, необходимое для измерения, количество жидкости составляет 6...7 мл. Градуировку приборов для измерения концентрации растворов можно осуществить с помощью образцовых растворов с известной концентрацией или при помощи магазинов сопротивлений, предварительно вычислив значения сопротивлений для ряда заданных концентраций.

Существуют бесконтактные электролитические преобразователи, не имеющие контакта металлических электродов с электролитом, что исключает поляризацию и другие нежелательные взаимодействия электрода и раствора. Они

разделяются на низкочастотные и высокочастотные.

На рис. 7.68 представлена схема устройства низкочастотного трансформаторного преобразователя с короткозамкнутым жидким витком, а на рис. 7.69 — схема дифференциального трансформаторного преобразователя с жидким витком 2, который связывает питающий 3 и измерительный 1 трансформаторы.

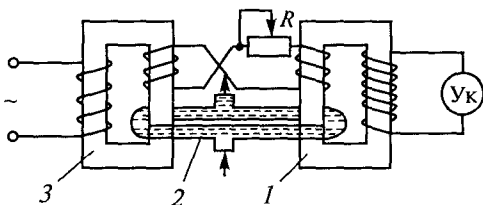


Рис. 7.69. Дифференциальный трансформаторный преобразователь с короткозамкнутым жидкостным витком:

1 и 3 — соответственно измерительный и питающий трансформаторы; 2 — жидкий виток

При начальной проводимости раствора указатель Ук регулировкой реостата R устанавливается на нуль. При повышении проводимости показания указателя соответствуют измеряемой концентрации раствора. Сигнал с измерительного трансформатора вместо указателя может быть подан в систему управления для регулирования состава электролита. Такие преобразователи используют для измерения концентрации кислот, щелочей и солей в водных растворах, электропроводность которых лежит в пределах  $10^4 \dots 10^2$  (Ом·м) $^{-1}$  при температурах до 100 °С. Недостатком низкочастотных преобразователей является сложность конструкции, обусловленная необходимостью создания жидких витков.

В последнее время для измерения весьма малых концентраций применяют высокочастотные бесконтактные преобразователи, питающиеся переменным током с частотой до нескольких десятков мегагерц. Приборы с высокочастотными бесконтактными преобразователями градуируются по образцовым электролитам с известной концентрацией.

## 7.10. ПОЛЯРОГРАФИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Полярографические преобразователи относятся к типу электрохимических преобразователей. Прохождение электрического тока через электролиты сопровождается электролизом — химическими превращениями и выделением вещества из раствора. Прохождение через электролит любого сколь угодно малого количества электричества всегда сопровождается выделением на одном электроде и растворением на другом электроде соответствующего, совершенно определенного количества вещества. В результате этого концентрация ионов вблизи электродов оказывается иной, чем в остальном растворе. Неравные концентрации стремятся к выравниванию, но скорость диффузии ограничена и поэтому чем

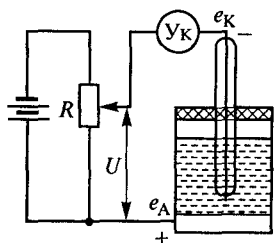


Рис. 7.70. Полярграфический преобразователь

больше плотность тока на электроде, тем больше разница концентраций. Явление поляризации заключается в изменении электродных потенциалов, вследствие изменения электродной концентрации в результате протекания через электролитическую ячейку электрического тока от внешнего источника. Потенциал, при котором в процессе электролиза выступает основная масса ионов данного вида, называется *потенциалом выделения данного иона*. Потенциалы выделения различны для всех ионов. На этом явлении основан поляризационный или полярграфический метод качественного и количественного химического анализа растворов.

Полярграфический преобразователь (рис. 7.70) представляет собой электролитическую ячейку, заполненную анализируемым раствором с двумя электродами, к которым подводится напряжение от внешнего источника питания.

Сила тока, проходящего через ячейку (выбирается равной  $10^{-6}$  А):

$$I = \frac{U - (e_A - e_K)}{R},$$

где  $e_A$  — потенциал анода;  $e_K$  — потенциал катода;  $R$  — сопротивление ячейки (не более 1000 Ом).

Для того чтобы поляризация происходила только на одном электроде, площадь поляризующегося электрода выбирается в несколько сот раз меньше площади другого электрода. Полагая потенциал неполяризующегося электрода  $e_A$  близким к нулю, а падение напряжения  $IR$  исчезающе малым по сравнению с величиной приложенного напряжения  $U$ , можно определить потенциалы  $e_K$  для разных токов как  $e_K \approx U$ .

На рис. 7.71, а показаны полярграммы восстановления одних и тех же ионов, полученные при различной концентрации  $C$  в растворе.

Как видно из кривых, потенциал выделения ионов при прочих

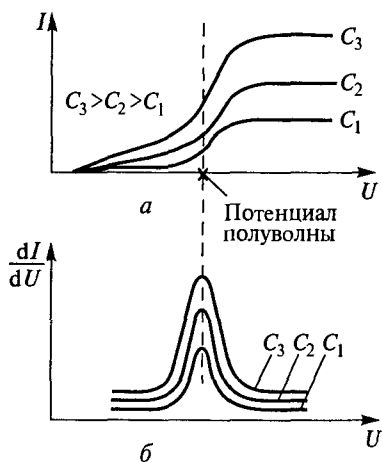


Рис. 7.71. Полярграммы восстановления ионов при различной концентрации растворов

равных условиях зависит от их концентрации. Поэтому для качественного анализа используют не потенциал начала резкого возрастания силы тока (так называемой «волны» тока), а потенциал, соответствующий середине участка повышения тока, — потенциал «полуволны», который не зависит от концентрации ионов и параметров преобразователя.

Если графически продифференцировать полярографические кривые  $I = f(U)$ , то максимумы кривых  $dI/dU = f'(U)$  (рис. 7.71, б) будут при одном и том же потенциале, соответствующем потенциалу полуволны исследуемых ионов, а высоты максимумов будут пропорциональны концентрациям. Если в исследуемом растворе содержатся ионы нескольких видов (например,  $Pb^{++}$ ,  $Cd^{++}$ ,  $Zn^{++}$ ), каждый вид ионов дает свой прирост тока — свою «волну», в результате получается многоступенчатая полярограмма (рис. 7.72).

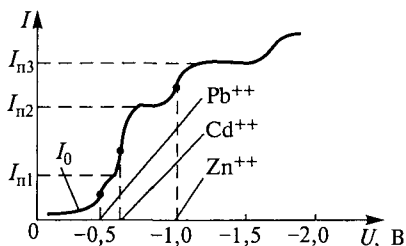


Рис. 7.72. Многоступенчатая полярограмма

При подаче на преобразователь возрастающего напряжения в начале через него идет только остаточный ток  $I_0$ , обусловленный разрядом небольшого числа ионов всех видов. При достижении напряжением потенциала разряда ионов  $Pb^{++}$  ( $-0,45$  В) сила тока через преобразователь резко возрастает и достигает значения  $I_{n1}$ , определяемого концентрацией ионов  $Pb^{++}$  в растворе. При дальнейшем росте напряжения ток остается равным  $I_{n1}$  до тех пор, пока не будет достигнут потенциал разряда ионов  $Cd^{++}$  ( $-0,6$  В), после чего ток резко возрастает до значения  $I_{n2}$ . При этом разность токов  $I_{n2} - I_{n1}$  соответствует концентрации в растворе ионов  $Cd^{++}$ . При достижении напряжением потенциала разрядов ионов  $Zn^{++}$  ( $-1,0$  В) произойдет следующий скачок и т. д. Потенциалы полуволн различных элементов, значения которых приводятся в специальных таблицах, образуют *полярографический спектр*.

Сравнивая потенциалы полуволн, полученные при исследовании неизвестного раствора, с табличными данными, можно установить химический состав исследуемого раствора. Все значения потенциалов полуволн в таблицах даются относительно потенциала нормального каломельного полуэлемента.

**Полярографический преобразователь с ртутным капаящим электродом.** Преобразователь представляет собой электрическую ячейку (рис. 7.73), состоящую из сосуда, заполненного исследуемым раствором, и двух ртутных электродов.

Анодом является ртуть, заполняющая дно сосуда, катодом — капля ртути, образующаяся на конце капиллярной трубки, наполняемой ртутью из резервуара. Под влиянием собственной тяжести

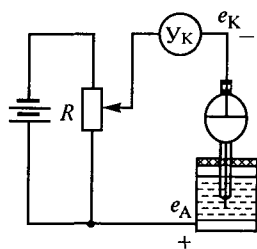


Рис. 7.73. Полярографический преобразователь с ртутным капающим электродом

капля ртути падает на дно сосуда, после чего образуется следующая капля и т. д. Таким образом, катодом является непрерывно возобновляющаяся капля ртути. На ртутном электроде создается все время одинаковая поверхность с обновляющимся приэлектродным слоем электролита. Малая поверхность капли обуславливает поляризацию электрода при небольших токах, что вызывает разложение незначительного количества растворенного вещества.

**Недостатки:** ядовитость ртути, невозможность исследования расплавленных солей, небольшое допустимое напряжение анодной поляризации ртутного электрода (до + 0,4 В), которое ограничено электрохимической реакцией растворения ртути (окисление ртути), что не дает возможности производить анализ веществ, окисляющихся труднее ртути, т. е. при положительных потенциалах (более + 0,4 В).

**Полярографический преобразователь с твердыми электродами.** В тех случаях, когда невозможно применять преобразователи с ртутным электродом, используются полярографические преобразователи с твердыми электродами (из платины, золота, серебра, ни-

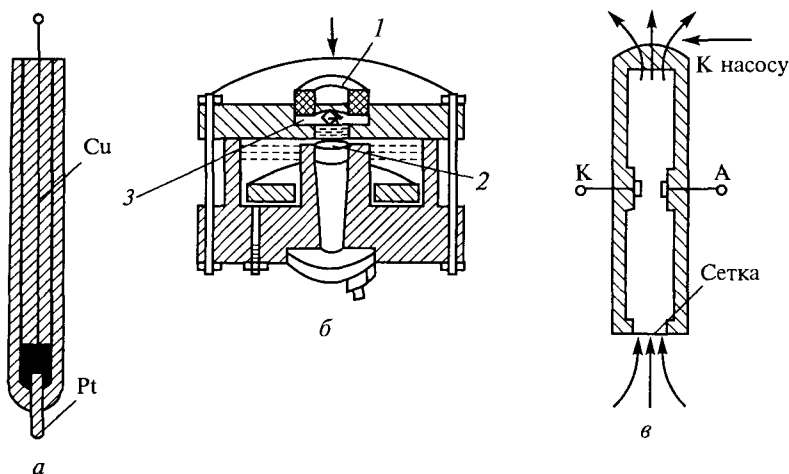


Рис. 7.74. Полярографический преобразователь с твердыми электродами: а — платиновый микроэлектрод; б — без внешнего источника питания (1 — мембрана; 2 — электрод; 3 — пластинка); в — проточный полярографический преобразователь с твердыми электродами



келя графита или с электродами, покрытыми слоем амальгамы ртути). На рис. 7.74, а представлен платиновый микроэлектрод, представляющий собой платиновую проволоку небольшой длины и толщиной 0,5 мм, впаянную в стеклянную трубку.

Для получения у электрода тонкого диффузионного слоя и обновления приэлектродного слоя электролита используются вращающиеся по окружности или вибрирующие твердые электроды.

При вращающихся электродах повышается чувствительность полярографических преобразователей, так как усиливается диффузия вещества к электроду. Предельная сила тока возрастает пропорционально корню квадратному из скорости вращения электрода. Иногда полярографический преобразователь с твердыми электродами можно использовать без внешнего источника питания, так как сама электролитическая ячейка вследствие возникновения электродных потенциалов является источником ЭДС. Такой преобразователь (рис. 7.74, б) состоит из пластмассового корпуса, заполненного электролитом (хлористый кальций), и встро-енных внутрь двух электродов.

Корпус закрыт проницаемой для газов полиэтиленовой мембраной 1, плотно прилегающей к электроду так, что под ней не остается газового пространства.

В качестве поляризующегося катода используется цилиндрический электрод 2 из золота, а анодом является пластинка 3 из кадмия, поверхность которой в 40 раз больше поверхности катода. На электродах такой гальванической цепи возникает ЭДС, необходимая для восстановления кислорода на поляризующемся катоде, и преобразователь является источником тока, величина которого пропорциональна концентрации кислорода. Такой преобразователь используют для измерения концентрации кислорода в газах.

На рис. 7.74, в представлен проточный полярографический преобразователь с твердыми электродами, которые применяются для определения концентрации кислорода в воде водоемов. В качестве электродов использованы катод К из золота и анод А из цинка.

**Погрешности полярографических преобразователей.** Для того чтобы падение напряжения  $IR$  на электролите не вносило погрешности в определение потенциалов, испытуемый раствор должен иметь большую проводимость. Для увеличения проводимости в раствор добавляют индифферентные электролиты (фоны), не вступающие в реакцию с испытуемым раствором и имеющие высокий потенциал деполяризации (хлориды, хлораты и сульфаты лития, кальция).

Для повышения чувствительности полярографических преобразователей путем исключения влияния начального тока и токов, обусловливаемых восстановлением различных посторонних веществ, присутствующих в электролите, используется разностный метод включения двух одинаковых полярографических преобразователей (рис. 7.75), один из которых содержит фон, а другой —

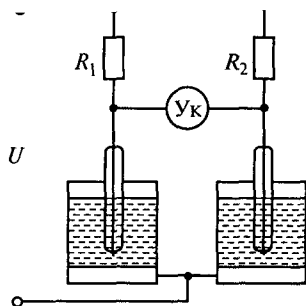


Рис. 7.75. Дифференциальное включение полярографических преобразователей

Высокая чувствительность получается при использовании переменного напряжения благодаря тому, что при этом исключается влияние начального тока, который при малых концентрациях может превышать полезный сигнал. Особенно высокую чувствительность можно получить при использовании переменного напряжения прямоугольной формы. В этом случае можно обнаружить вещества при концентрации порядка  $10^{-7}$  моль/л.

*Применение:* полярографический метод, основанный на снятии кривых поляризации — единственный, который позволяет производить качественный и количественный анализы сложных растворов без предварительного разделения компонентов. Естественной входной величиной является концентрация различных ионов.

фон и анализируемое вещество. В указатель поступает разность токов, проходящих через электролитические ячейки.

Для увеличения чувствительности полярографических преобразователей и повышения точности определения потенциала полуволны удобнее иметь зависимость  $I = f(U)$ . Для непосредственного получения дифференциальных полярограмм используют специальные дифференциальные устройства.

На рис. 7.76 показано устройство датчика концентромера с полярографическим преобразователем.

Исследуемый электролит из трубопровода 1 поступает через змеевик 2 в полярографический преобразователь 3 с ртутным каплющим катодом 4. Преобразователь вместе со змеевиком помещен в термостат 5, где автоматически поддерживается постоянная температура. Если на преобразователе поддерживать постоянное напряжение, равное потенциалу полуволны измеряемого вещества, и подать стабильное переменное напряже-

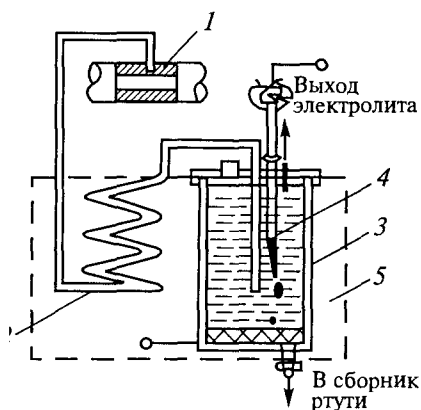


Рис. 7.76. Устройство датчика концентромера с полярографическим преобразователем:

- 1 — трубопровод; 2 — змеевик; 3 — преобразователь; 4 — ртутный катод; 5 — термостат

ние, то изменение переменной составляющей тока будет пропорционально изменению концентрации вещества в растворе, который непрерывно протекает через преобразователь. В производственных условиях погрешность измерения не превышает 4 %. При снятии полных полярограмм погрешность может быть снижена до 1,5 %.

В последние годы для снятия полярографических кривых широко используется электронный осциллограф. Напряжение на полярографическом преобразователе при этом изменяется с большой скоростью (до 100 В/с), что дает возможность получать на экране осциллографа кривые зависимости мгновенного значения тока от мгновенного значения напряжения. В некоторых случаях вместо кривой  $i = f(u)$  снимаются кривые  $I = f(t)$  и  $u = f(t)$  или  $di/dt = f(u)$  и  $du/dt = f(t)$ , по которым можно определить различные параметры физико-химических процессов.

Полярографические преобразователи градуируют по стандартным растворам с известной концентрацией. Сначала снимают полярограмму исследуемого раствора и определяют силу предельного тока  $I_x$ . Затем с этим же преобразователем снимают полярограмму раствора с известной концентрацией  $C_N$  и определяют силу предельного тока  $I_N$ . Концентрацию исследуемого раствора вычисляют по формуле

$$C_x = \frac{I_x}{I_N} C_N.$$

Для точного измерения концентрации используется метод стандартных добавок, при котором сначала снимают полярограмму исследуемого раствора и определяют предельный ток  $I_{x1} = kC_x$ , а затем в раствор добавляют определенное количество стандартного раствора с известной концентрацией и снова находят предельное значение тока

$$I_{x2} = k \frac{C_x V_x + C_N V_N}{V_x + V_N},$$

где  $V_x$  — исходный объем анализируемого вещества;  $V_N$  — объем добавленного стандартного раствора.

Из этих двух уравнений получается выражение для определения неизвестной концентрации:

$$C_x = \frac{I_{x1} C_N V_N}{I_{x2} (V_x + V_N) - I_{x1} V_x}.$$

Полярографирование производится при комнатной температуре; обычно изменение температуры на несколько градусов практически не имеет значения. Сила тока возрастает при температуре выше +25 °С и при изменении температуры от +20 до +95 °С высота пика увеличивается почти в три раза.

## 7.11. ХРОНОПОТЕНЦИОГРАФЫ С НАКОПИТЕЛЕМ

Метод хронопотенциографии (рис. 7.77) с накоплением (ХПН) заключается в электрохимическом концентрировании определяемого вещества на твердом (уголь, графит, стеклоуглерод, платина и др.) или вращающемся электроде при плотности тока выше предельной с последующим электрохимическим растворением при постоянной плотности анодного тока ( $i_a \leq i_k$ ). С помощью этого метода измеряется время, необходимое для полного растворения определяемого вещества. При этом время анодного растворения  $\tau_a$  пропорционально концентрации определяемого вещества в растворе:

$$\tau_a = k\tau_k C,$$

где  $k$  — некоторая постоянная, определяемая электрохимическими константами, параметрами электрода и параметрами процесса осаждения;  $C$  — концентрация определяемого вещества;  $\tau_k$  — время катодного осаждения, с.

Все хронопотенциографы можно характеризовать следующей обобщенной структурной схемой (рис. 7.78). Они состоят из ряда устройств, выполняющих определенные функции: устройства поддержания постоянного или изменяющегося по заданному закону тока осаждения и растворения — (гальваностата) Г; устройства поддержания постоянного или изменяющегося по заданному закону потенциала осаждения — (потенциалостата) П; устройства установления времени осаждения — (хронометра) Х; электролитической ячейки ЭЯ; измерителя-регистратора ИР процессов, протекающих на электродах; устройства управления УУ.

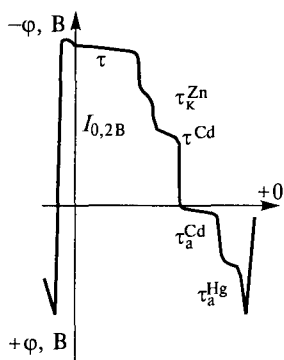


Рис. 7.77. Типичная хронопотенциограмма при определении цинка, кадмия, меди и ртути в 0,1 Н растворе серной кислоты

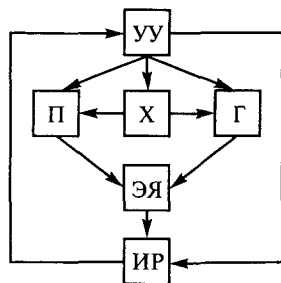


Рис. 7.78. Структурная схема хронопотенциографа

Схемы различных хронопотенциографов отличаются между собой по степени автоматизации, имеют соответственно различный вид. У лабораторных хронопотенциографов ряд блоков отсутствует, а у промышленных — блоки постоянно модернизируются. Например, лабораторный хронопотенциограф (ХПГ) может проводить исследования и анализ растворов. Технические данные ХПГ: стабилизированный регулируемый постоянный ток  $0,1 \dots 70$  мА; время осаждения — любое (регулируемое вручную) или  $10 \dots 280$  с (регулируемое автоматически); измеряемые потенциалы:  $0 \pm 2,5$ ;  $0 \pm 5,0$  В; скорость записи процесса  $60 \dots 9600$  мм/ч; питание 220 В переменного тока; потребляемая мощность 300 Вт.

### Контрольные вопросы

1. Каковы устройство, принцип работы и применение:
  - а) фотоэлектрических преобразователей;
  - б) емкостных преобразователей;
  - в) тепловых преобразователей;
  - г) ионизационных преобразователей;
  - д) реостатных преобразователей;
  - е) тензорезисторных преобразователей;
  - ж) индуктивных преобразователей;
  - з) магнитоупругих преобразователей;
  - и) электролитических преобразователей сопротивления;
  - к) полярографических преобразователей?

# ГЛАВА 8

## ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 8.1. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Пьезоэлектрические преобразователи выполняются из материалов, в которых возможен пьезоэлектрический эффект, который может быть прямым и обратным.

*Прямой пьезоэффект* заключается в возникновении электрических зарядов на гранях пьезоэлектрика при воздействии на него механической силы, вызывающей напряжение в материале. При устранении силы заряды исчезают.

*Обратный пьезоэффект* проявляется в том, что пьезоэлектрик, помещенный в электрическое поле, изменяет свои геометрические размеры. Чаще всего в качестве пьезоэлектрика применяют кварц, на примере которого и рассмотрим принцип действия пьезоэлектрического преобразователя.

В кристаллах кварца принято различать главные оси: электрическую  $X$ , механическую  $Y$  и оптическую  $Z$  (рис. 8.1). Параллелепипед, вырезанный из кристалла кварца так, чтобы его грани были параллельны главным осям, обладает следующими свойствами:

- *продольным пьезоэффектом* при воздействии силы  $F_x$ , направленной вдоль электрической оси  $X$ , на гранях  $bc$ , перпендикулярных этой оси, появляются электрические заряды;

- *поперечным пьезоэффектом* при воздействии силы  $F_y$ , направленной вдоль механической оси  $Y$ , заряды появляются также на гранях  $bc$ ;

- отсутствием зарядов при приложении механической силы вдоль оптической оси  $Z$ .

Величина зарядов, возникающих на гранях кристалла  $bc$  под действием силы  $F_x$ , не зависит от геометрических размеров кристалла и равна

$$q = d_1 F_x, \quad (8.1)$$

где  $d_1$  — постоянный коэффициент, называемый пьезоэлектрической постоянной.

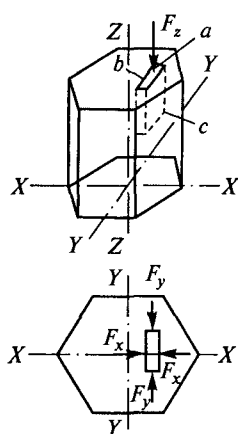


Рис. 8.1. Кристалл кварца

Величина зарядов, возникающих под действием силы  $F_y$ , зависит от геометрических размеров кристалла и имеет противоположный знак:

$$q = -d_1 F_y b/a, \quad (8.2)$$

где  $b$  и  $a$  — длина и ширина граней.

Из (8.2) видно, что в случае необходимости можно повысить чувствительность пьезоэлектрика, увеличив отношение  $b/a$ .

В случае растягивающих усилий вдоль осей  $X$  и  $Y$  возникающие заряды будут иметь знаки, противоположные случаю сжимающих усилий. В тех случаях, когда параллелепипед вырезан не вдоль осей, а под углом к ним, возникающие заряды будут меньше. Учет углов рассматривается в специальной литературе.

В качестве пьезоэлектриков наиболее часто применяют сегнетову соль, кварц, титанат бария.

Сегнетова соль обладает наибольшей пьезоэлектрической чувствительностью ( $d_1 = 3 \cdot 10^{-10}$  к/Н). Однако ряд недостатков, а именно сильная гигроскопичность, малая механическая прочность, низкое удельное электрическое сопротивление делают возможным применение ее только в лабораторных условиях для измерения быстропеременных сил и давлений.

Керамика титаната бария обладает высокой механической прочностью, и ее свойства не зависят от влажности. Пьезоэлектрическая постоянная титаната бария  $d_1 = 107 \cdot 10^{-12}$  к/Н. Недостатками пьезоэлементов из керамики титаната бария являются сильная зависимость пьезоэлектрической постоянной от температуры ( $d_1$  мало изменяется лишь в пределах температур  $+15 \dots +100$  °С), а также изменение свойств керамики во времени (старение), которое достигает 20 % в течение двух лет.

В последнее время получены новые пьезокерамические материалы, например пьезокерамика на основе свинца и бария, которые могут работать при температурах до 200 °С.

Наибольшее применение для измерительных целей получил кварц, так как он обладает высокой механической прочностью, хорошими изоляционными качествами, независимостью пьезоэлектрической постоянной от температуры в широком диапазоне (до 200 °С коэффициент  $d_1$  совсем не зависит от температуры, а в пределах 200... 500 °С зависит незначительно). Кроме того, кварц негигроскопичен.

Недостатком кварца является значительная зависимость удельного сопротивления кварца от температуры. Так, при изменении температуры в пределах  $+20 \dots +300$  °С удельное сопротивление кварца вдоль оптической оси изменяется в пределах  $1 \cdot 10^{12} \dots 6 \cdot 10^5$  Ом · м<sup>2</sup>/м.

Устройство пьезоэлектрического преобразователя схематично изображено на рис. 8.2. Здесь измеряемое давление  $P$  действует на мембрану 2, которая является одновременно дном корпуса пре-

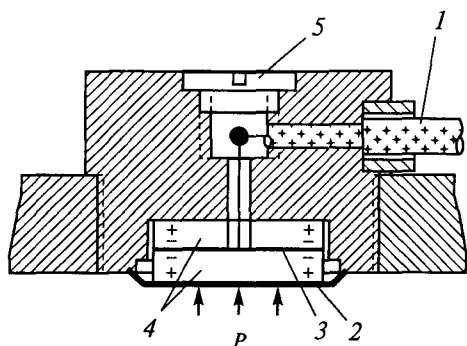


Рис. 8.2. Устройство пьезоэлектрического преобразователя:  
 1 — кабель; 2 — мембрана; 3 — латунная фольга; 4 — кварцевые пластины; 5 — пробка

образователя. Кварцевые пластины 4 соединены параллельно. Наружные обкладки кварцевых пластин заземляются, а средняя обкладка (латунная фольга 3) изолируется относительно корпуса самим кварцем, удельное сопротивление которого велико (при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1 \cdot 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}^2/\text{м}$ ).

Сигнал с кварцевых пластин снимается при помощи латунной фольги 3 и по кабелю 1 подается на вход измерительного усилителя. Для удобства соединения вывода от фольги с внутренней жилой экранированного кабеля в корпусе преобразователя предусмотрено отверстие, закрываемое пробкой 5.

Заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента под действием силы  $P$ , сохраняется лишь при отсутствии утечки, т.е. при бесконечно большом входном сопротивлении измерительной цепи. Практически это условие невыполнимо, а потому пьезоэлектрические преобразователи для измерения статических сил не применяются. При действии динамических, т.е. переменных во времени, сил количество электричества на гранях все время восполняется и становится возможным потребление тока измерительной цепью.

Тем не менее, требование к величине входного сопротивления измерительной цепи остается жестким, так как выходная мощность пьезоэлектрических преобразователей очень мала и на выход преобразователя должен быть включен усилитель с воз-

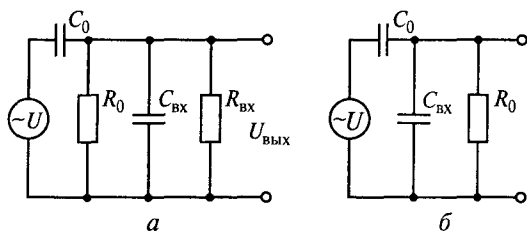


Рис. 8.3. Эквивалентные схемы пьезоэлектрического преобразователя:  
 а — полная; б — упрощенная



можно большим входным сопротивлением ( $10^{10} \dots 10^{13}$  Ом). Этому требованию обычно удовлетворяют, например, электрометрические лампы.

Полная эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя представлена на рис. 8.3, а.

Здесь  $C_0$  — собственная емкость пьезоэлектрика;  $C_{\text{вх}}$  — емкость кабеля и входная емкость измерительной цепи;  $R_0$  — сопротивление преобразователя с учетом сопротивления изоляции линии относительно земли;  $R_{\text{вх}}$  — входное сопротивление измерительной цепи.

На рис. 8.3, б приведена упрощенная эквивалентная схема, где сопротивление

$$R = \frac{R_0 R_{\text{вх}}}{R_0 + R_{\text{вх}}}.$$

Если вдоль электрической оси пьезоэлектрика приложена сила, изменяющаяся по закону синуса, т.е.  $F_x = F_{xm} \sin \omega t$ , то направление на выходе преобразователя тоже будет изменяться синусоидально.

Если бы входное сопротивление измерительной цепи было бесконечным, то напряжение преобразователя определялось бы только генерируемым количеством электричества и собственной емкостью

$$U = q / C_0 = d_1 F_{xm} \sin \omega t / C_0 \quad (8.3)$$

или в комплексной форме

$$\dot{U} = d_1 \dot{F} / C_0.$$

С учетом же конечного входного сопротивления измерительной цепи (обычно  $R_{\text{вх}} = 10^8 \dots 10^9$  Ом) напряжение, поступающее на вход преобразователя, определяется по формуле

$$\dot{U}_{\text{вх}} = d_1 \dot{F} Z_{\text{вх}} / C_0 Z_{\text{полн}}, \quad (8.4)$$

где

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}}}{\frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}} + R} \quad (8.5)$$

— входное сопротивление измерительной цепи;

$$Z_{\text{полн}} = \frac{1}{j\omega C_0} + \frac{\frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}}}{\frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}} + R} \quad (8.6)$$

— полное сопротивление эквивалентной цепи.

Подставляя (8.5) и (8.6) в формулу (8.4), найдем

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вх}} &= \frac{d_1 F}{C_0} \frac{\frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}} R}{\frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}} + R}}{\frac{1}{j\omega C_0} + \frac{\frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}} R}{\frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}} + R}} = \\
 &= d_1 F \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C_{\text{вх}} + C_0)}. \quad (8.7)
 \end{aligned}$$

Из этого выражения можно найти модуль входного напряжения

$$|U_{\text{вх}}| = \frac{d_1 F_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_{\text{вх}} + C_0)^2}}, \quad (8.8)$$

а также сдвиг фаз между входным напряжением и током

$$\alpha = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{1}{\omega (C_{\text{вх}} + C_0) R}. \quad (8.9)$$

Величина  $C_0$  обычно составляет десятки пикофарад. Величина сопротивления пластин пьезоэлектрика, например из кварца, составляет  $10^{15} \dots 10^{16}$  Ом. Поверхностное сопротивление кварца лежит в пределах  $10^9 \dots 10^{10}$  Ом. Необходимо следить за тем, чтобы поверхность пьезоэлектрика не загрязнялась, в противном случае сопротивление резко упадет.

Основными составляющими погрешностями пьезоэлектрических преобразователей являются:

- погрешность от изменения параметров измерительной цепи (например, емкости  $C_{\text{вх}}$ );
- погрешность от изменения окружающей температуры, связанная с изменением пьезоэлектрической постоянной;
- погрешность из-за неправильной установки пластин, которая может быть учтена при градуировке;
- погрешность, вызванная чувствительностью к силам, действующим вдоль механической оси;
- частотная погрешность.

Как видно из (8.8), входное напряжение пьезопреобразователя не будет зависеть от частоты изменения приложенного усилия лишь в том случае, когда

$$\omega^2 R^2 (C_{\text{вх}} + C_0)^2 \gg 1.$$

$$\text{Тогда } U_{0\text{вх}} = \frac{d_1 F_m}{(C_{\text{вх}} + C_0)}.$$

Относительная частотная погрешность может быть выражена следующим образом:

$$\begin{aligned} \gamma_t &= \frac{U_{1\text{вх}} - U_{0\text{вх}}}{U_{0\text{вх}}} = \frac{\frac{d_1 F_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_{\text{вх}} + C_0)^2}} - \frac{d_1 F_m}{(C_{\text{вх}} + C_0)}}{\frac{d_1 F_m}{(C_{\text{вх}} + C_0)}} = \\ &= \frac{\omega R (C_{\text{вх}} + C_0)}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_{\text{вх}} + C_0)^2}} - 1. \end{aligned} \quad (8.10)$$

Следовательно, нижняя граница частотного диапазона определяется величиной постоянной времени цепи  $\tau = R(C_{\text{вх}} + C_0)$ , которую можно увеличить путем повышения входного сопротивления  $R_{\text{вх}}$ . Увеличение входной емкости  $C_{\text{вх}}$  ведет к потере чувствительности преобразователя. Действительно, если  $\omega R(C_{\text{вх}} + C_0) \gg 1$ , то

$$|U_{\text{вх}}| = \frac{d_1 F_m}{(C_{\text{вх}} + C_0)}$$

и чувствительность преобразователя

$$S_{\text{пр}} = U_{\text{вх}} / F_m = d_1 / (C_{\text{вх}} + C_0). \quad (8.11)$$

Верхняя граница допустимого частотного диапазона определяется частотой собственных колебаний преобразователя. Пьезоэлектрические преобразователи могут быть выполнены с частотой собственных колебаний до 100 кГц, что позволяет использовать их для измерения механических величин, изменяющихся с частотой до 7... 10 кГц.

Пьезоэлектрические преобразователи применяют для измерения переменных сил, давлений, вибрационных ускорений.

Примером применения пьезоэлементов служат профилометры — приборы для оценки шероховатости поверхности обрабатываемой детали (рис. 8.4).

Ощупывающая алмазная игла 1, имеющая радиус закругления 1,5 мкм, укреплена на конце подвижного коромысла 2, которое может вращаться вокруг оси 3. На другом конце коромысла имеется «смычок» 4, связывающий при помощи эластичной ленточки 5 подвижное коромысло со свободным концом пластинок 6 из сегнетовой соли. Другой конец пластинок закреплен неподвижно. Пластинки соединены параллельно так, что на наружных гранях пластинок появляется заряд одного знака.

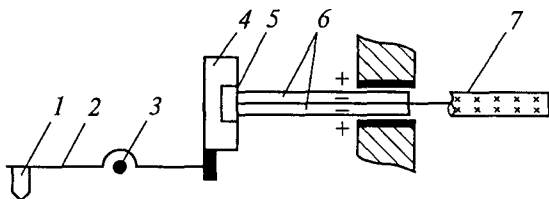


Рис. 8.4. Устройство профилометра:

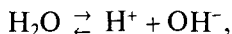
1 — алмазная игла; 2 — коромысло; 3 — ось; 4 — «смычок»; 5 — эластичная ленточка; 6 — пластинки; 7 — экранированный кабель

При перемещении алмазной иглы 1 в вертикальном направлении (из-за шероховатостей исследуемой поверхности) свободный конец пластинок 6 также перемещается, пластинки изгибаются и на поверхностях пластин появляется заряд. Гибкий экранированный кабель 7 соединяет грани пьезопреобразователя с измерительной цепью.

## 8.2. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Гальванические преобразователи применяют в основном для анализа состава водных растворов. Принцип действия их основан на зависимости ЭДС гальванической цепи от концентрации ионов в электролите. Для анализа водных растворов используют зависимость активности водородных ионов от концентрации раствора.

Вода, обладающая наибольшей по сравнению с другими веществами диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 81$ ), хорошо способствует диссоциации растворяемого вещества на ионы и сама несколько диссоциирует по схеме



чем обусловлена вполне определенная, хотя и малая электропроводность воды.

Так как распадение воды на ионы крайне незначительно, то концентрацию воды можно считать постоянной и равной единице. Произведение концентраций  $|\text{H}^+| \cdot |\text{OH}^-| = K_{\text{H}_2\text{O}}$  — величина постоянная и равная  $10^{-14}$  при  $t = +22^\circ\text{C}$ , как установлено многочисленными опытами.

Так как молекулы воды при ионизации образуют ионы водорода и гидроксила в равном количестве, то

$$|\text{H}^+| = |\text{OH}^-| = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}.$$

Растворы, в которых число ионов  $|\text{H}^+|$  и  $|\text{OH}^-|$  одинаково, называются *нейтральными*.

Если в воде растворить кислоту, то концентрация ионов  $|\text{H}^+|$  в растворе станет больше, если же растворить щелочь, то наоборот, больше станет ионов  $|\text{OH}^-|$ . Таким образом, у кислых растворов  $|\text{H}^+| > 10^{-7}$ , а у щелочных  $|\text{H}^+| < 10^{-7}$ , и в зависимости от этого можно охарактеризовать растворы как кислые, щелочные или нейтральные.

На практике концентрацию водородных ионов численно характеризуют отрицательным логарифмом концентрации — водородным показателем  $\text{pH} = -\lg |\text{H}^+|$ . Например, если  $|\text{H}^+| = 10^{-3}$ , то  $\text{pH} = 3$ .

Приборы для измерения показателя  $\text{pH}$  называют  $\text{pH}$ -метрами. Наиболее точным и универсальным методом измерения  $\text{pH}$  является электрометрический метод, суть которого заключается в следующем.

Если в раствор какого-либо вещества внести электрод из этого же вещества, то на границе «электрод — раствор» возникает пограничный электрический потенциал (так называемый электродный потенциал), величина которого зависит от степени концентрации раствора.

Гальванические преобразователи, являющиеся датчиками  $\text{pH}$ -метров, в качестве входной величины имеют значение концентрации водородных ионов, выраженное в единицах  $\text{pH}$ , а в качестве выходной величины — гальваническое напряжение, равное разности электродных потенциалов. Так как практически потенциал одного электрода измерить невозможно, то гальванический преобразователь всегда состоит из двух полуэлементов: измерительного электрода, помещенного в раствор, и образцового полуэлемента.

Принципиальное устройство  $\text{pH}$ -метра показано на рис. 8.5. В колбу 6 налит испытуемый раствор. Так как необходимо измерять концентрацию ионов водорода, то, согласно принципу действия гальванических преобразователей, электрод должен быть выполнен из водорода. Но, поскольку водород является газом и выполнить электрод из него невозможно, пользуются способностью водорода адсорбироваться на поверхности платины. Измерительный (водородный) электрод представляет собой пластинку 2 из черной платины, которая обтекается непрерывно поступающим через трубку 7 водородом. Водород выходит через отверстие 8. От платиновой пластинки отходит вывод 1 в измерительную цепь.

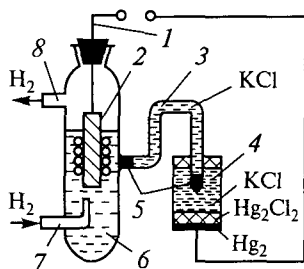


Рис. 8.5. Устройство  $\text{pH}$ -метра:

1 — вывод; 2 — пластинка; 3 — электролитический ключ; 4 — полуэлемент; 5 — полупроницаемые пробки; 6 — колба; 7 — трубка; 8 — отверстие

Для получения второго потенциала колба с испытуемым раствором соединяется через электролитический ключ 3 со вторым образцовым полуэлементом 4. Электролитический ключ представляет собой трубку, закрытую полупроницаемыми пробками 5, и заполненную насыщенным раствором KCl; такое соединение сильно снижает диффузионный потенциал, вносящий погрешность в измерения.

В качестве образцового полуэлемента чаще всего используют каломельный полуэлемент, металлом которого является ртуть. Ионы ртути получают из раствора каломели  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ . Концентрация электролита KCl определяет потенциал ртути, равный 0,24 В (при насыщенном растворе KCl).

Кроме каломельного, используют также хлорсеребряный, бромсеребряный и другие образцовые элементы.

Применение водородного электрода в производстве обычно неудобно, так как связано с подачей газообразного водорода, поэтому на практике большое распространение получил стеклянный электрод (рис. 8.6).

Он представляет собой шаровую тонкостенную колбочку 1, выдуваемую на конце трубки из специальных электропроводных сортов стекла. Толщина стенки колбочки равна 0,05...0,1 мм.

Колбочка заполняется контрольным (нормальным) раствором какой-либо соли или кислоты с известным рН и погружается в исследуемый раствор. На границе стекло—раствор появляется определенный потенциал, зависящий от концентрации водородных ионов раствора, в который погружен стеклянный электрод. При работе используются обе поверхности стеклянного электрода, так как снять потенциал с одной только поверхности невозможно (так как нельзя включить поверхность стекла в электрическую цепь).

Внутри колбочки 1, заполненной образцовым раствором, вставляется вспомогательный электрод 2 (обычно хлорсеребряный), с которого снимается потенциал стеклянного электрода.

Если в испытуемый раствор поместить еще и каломельный полуэлемент, ЭДС на выводах преобразователя будет являться алгебраической суммой ЭДС хлорсеребряного полуэлемента, внутренней поверхности и наружной поверхности стеклянного электрода и потенциала каломельного полуэлемента. Так как при изменении рН исследуемого раствора будет изменяться только потенциал наружной поверхности электрода, а остальные составляющие ЭДС останутся неизменными, то, измеряя ЭДС на выводах преобразователя, можно судить о концентрации рН исследуемого раствора.

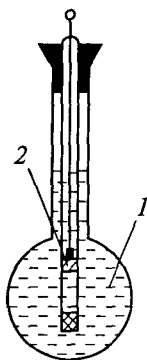


Рис. 8.6. Стеклянный электрод:  
1 — колбочка; 2 — электрод

Потенциал стеклянного электрода изменяется примерно от 0,3 В (при  $\text{pH} \approx 0$ ) до 0,9 В (при  $\text{pH} \approx 10$ ).

Наиболее обоснованное объяснение действия стеклянного электрода состоит в следующем. При помещении стеклянного электрода в раствор ионы натрия из стекла переходят в раствор, а их места замещают ионы водорода из раствора. В результате этого поверхностный слой стекла оказывается насыщенным водородными ионами, и стеклянный электрод приобретает свойства водородного электрода. Существуют также хингидронный, сурьмяный электроды. Градуировка рН-метров производится по образцовым буферным растворам, обладающим высокой стабильностью значений рН ( $\pm 0,01$  рН в диапазоне температур 0... 95 °С).

**Погрешности рН-метров.** Основным требованием, предъявляемым к методу измерения ЭДС рН-метрами, является возможно меньший ток, протекающий через преобразователь, так как он, во-первых, создает падение напряжения на его внутреннем сопротивлении, вследствие чего результат занижается; во-вторых, вызывает явление поляризации, что также влечет за собой отрицательную погрешность. Падение напряжения в преобразователе определяется также его сопротивлением, которое особенно велико в рН-метре со стеклянным электродом (десятки и даже сотни МОм). Поэтому непосредственно измерить ЭДС можно лишь с помощью электронных усилителей с большим входным сопротивлением порядка  $10^8 \dots 10^{10}$  Ом. Чаще всего для этой цели применяют компенсационный метод. Как известно, в момент измерения входное сопротивление компенсатора практически равно бесконечности.

Наиболее значительной погрешностью рН-метров является температурная погрешность, так как при измерении температуры изменяется ЭДС измерительных полуэлементов и сопротивление преобразователя (особенно со стеклянным электродом). Для уменьшения температурной погрешности в измерительную цепь вводят элементы температурной компенсации, например в виде включения термочувствительного сопротивления, помещаемого в раствор.

Кроме того, у гальванических преобразователей может быть погрешность от наличия диффузионных потенциалов, возникающих на границе жидкостных контактов растворов, входящих в электрическую цепь преобразователя. Уменьшить эту погрешность, как было указано выше, для соединения испытуемого раствора с каломельным полуэлементом можно электролитическим ключом с полупроницаемыми пробками, заполненным насыщенным раствором КСl.

Как следует из самого принципа действия гальванических преобразователей, их применяют для измерения концентрации различных растворов по концентрации водородных ионов. Это дает

возможность контролировать технологические процессы в пищевом, бумажном, текстильном, резиновом производствах, в ряде производств химической промышленности и др.

### 8.3. ОБРАЩЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

*Обращенными* (рис. 8.7) называются такие преобразователи, в которых электрическая величина преобразуется в неэлектрическую с тем, чтобы эту последнюю сравнить с измеряемой неэлектрической величиной.

Обращенный преобразователь ОП подключен к источнику питания через регулирующее устройство РУ и измеритель Г.

Электрический параметр Э обращенного преобразователя преобразуется в неэлектрический  $X_k$ , который компенсирует измеряемую величину  $X$ . Регулируя электрический параметр Э до достижения равенства между  $X_k$  и  $X$ , можно по значению этого электрического параметра, измеряемого прибором Г, судить о значении измеряемой неэлектрической величины.

При изменении измеряемой величины  $X$  образующаяся разность  $\Delta X = X_k - X$  воздействует на нулевой указатель НУ. В качестве нулевого указателя используется, как правило, преобразователь неэлектрической величины в электрическую, т. е. тот или иной из описанных выше преобразователей. Таким образом, прибор с обращенным преобразователем обязательно имеет еще и прямой преобразователь. Если прибор выполнен с ручным уравниванием, то добиваются равенства  $X$  и  $X_k$ , регулируя вручную РУ до тех пор, пока НУ даст нулевое показание.

При автоматическом уравнивании сигнал с преобразователя НУ поступает на электронный усилитель. Усиленный сигнал воздействует на исполнительный двигатель всякий раз, когда разность  $X - X_k$  отлична от нуля. Двигатель же, в свою очередь, связан механически с регулирующим устройством РУ, при помощи которого получают равенство  $X_k = X$ .

Обращенными преобразователями могут служить многие из преобразователей, рассмотренных ранее, а также измерительные ме-

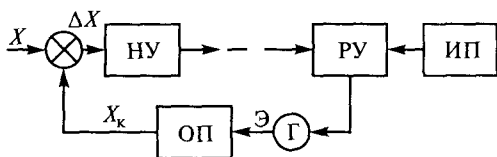


Рис. 8.7. Структурная схема прибора с обращенным преобразователем



ханизмы, непосредственно преобразующие электрическую величину (чаще всего ток) во вращающий момент.

Применение многих ИМ в качестве обращенных преобразователей ограничивается требованием к стабильности функции преобразования, т.е. стабильности выходной неэлектрической величины, так как она определяет погрешность измерения прибором.

Использование того или иного ИМ в качестве обращенного преобразователя определяется характером требуемой неэлектрической величины. Например, преобразователями тока или напряжения в механическую силу могут служить электродинамические, электромагнитные ИМ, преобразователями во вращающий момент — измерительные механизмы приборов различных систем, а также счетчиков при отсутствии упругого противодействующего момента, преобразователями давления — электростатический ИМ и т.д. Рассмотрим принцип использования обращенных преобразователей.

На рис. 8.8 изображено использование магнитоэлектрического ИМ в качестве обращенного преобразователя для компенсации силы. Свободно подвешенная катушка  $I$  имеет витки, расположенные в горизонтальной плоскости. Сила взаимодействия  $F$  между током в катушке и полем магнита  $2$  направлена вертикально вверх и компенсирует измеряемую силу, направленную ей навстречу. С помощью регулирующего устройства (на рисунке не показано) сила тока в рамке увеличивается (или уменьшается) до тех пор, пока силы  $F$  и измеряемая сила взаимно не уравновесятся.

Широко применяется обращенный преобразователь, использующий магнитоэлектрический механизм для измерения моментов трения в подшипниках (рис. 8.9).

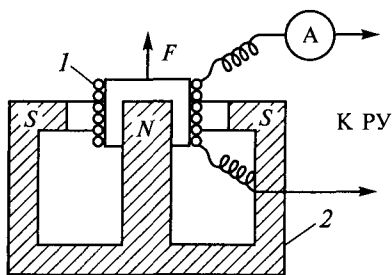


Рис. 8.8. Устройство обращенно-го магнитоэлектрического преобразователя:

$I$  — катушка;  $2$  — магнит

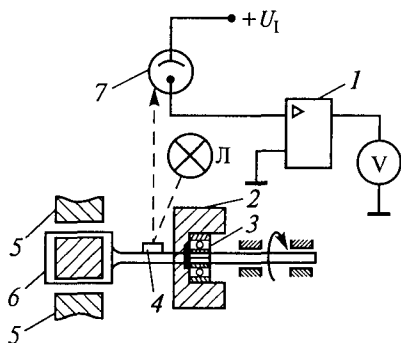


Рис. 8.9. Измеритель трения в подшипниках:

$I$  — усилитель;  $2$  — кольцо;  $3$  — подшипник;  $4$  — зеркальце;  $5$  — постоянный магнит;  $6$  — рамка;  $7$  — фотоэлемент

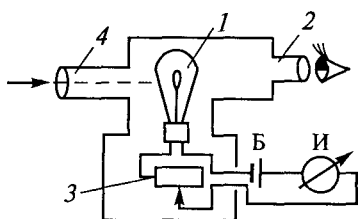


Рис. 8.10. Оптический пирометр:

1 — лампа накаливания; 2 — окуляр; 3 — реостат; 4 — телескоп

1 — лампа накаливания; 2 — окуляр; 3 — реостат; 4 — телескоп

На оси рамки закреплено зеркальце 4, освещаемое лампой Л. При повороте зеркала луч света попадает на фотоземлет 7, ток в цепи рамки усиливается усилителем постоянного тока *I*, и возникающий вследствие взаимодействия тока в рамке с полем постоянного магнита 5 вращающий момент уравнивает момент трения в подшипнике. Таким образом, с увеличением измеряемого момента трения растет ток в рамке, являющийся мерой этого момента.

Весьма распространенными обращенными преобразователями являются преобразователи тока или напряжения в световой поток. Примером такого преобразователя служит оптический пирометр (рис. 8.10).

Здесь яркость исследуемого тела сравнивается с яркостью нити фотометрической лампы накаливания 1, являющейся в данном случае обращенным преобразователем. Яркость нити зависит от тока, величина которого регулируется изменением сопротивления реостата 3. Телескоп пирометра 4 направляют на раскаленное исследуемое тело таким образом, чтобы наблюдатель, смотрящий в окуляр 2, видел на фоне раскаленного тела нить фотометрической лампы.

Изменяя силу тока в фотометрической лампе, добиваются совпадения яркости нити и исследуемого тела (рис. 8.11, а). На рис. 8.11, б, в соответственно изображены картины, которые видит глаз наблюдателя в случае, если яркость нити больше или меньше яркости исследуемого тела.

Прибор И (см. рис. 8.10) отградуирован таким образом, что показания его соответствуют измеряемой температуре или совпадению яркости нити и исследуемого тела.

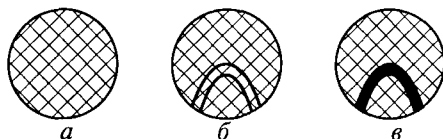


Рис. 8.11. Изменение яркости нити по отношению к яркости исследуемого объекта:

а — совпадают; б — яркость нити больше яркости объекта; в — яркость нити меньше яркости объекта

## 8.4. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

*Индукционными* называют такие преобразователи, в которых скорость изменения измеряемой величины преобразуется в индуцируемую ЭДС. Они являются разновидностью электромагнитных преобразователей. В данных преобразователях естественной входной величиной является скорость механического перемещения (и поэтому непосредственно они могут применяться только для измерения скорости линейных и угловых перемещений), а выходной величиной — индуцированная ЭДС.

По принципу действия индукционные преобразователи можно разделить на две группы. В преобразователях первой группы индуцированная ЭДС наводится в катушке благодаря линейным или угловым колебаниям катушки в зазоре магнита (рис. 8.12, *а*, *б*).

При своем перемещении витки катушки пересекают под прямым углом линии магнитного поля, и в них индуцируется ЭДС. Если линейное перемещение  $\Delta l$  является некоторой функцией времени  $\Delta l = f(t)$ , мгновенное значение ЭДС

$$e = wBl_a \frac{df(t)}{dt}, \quad (8.12)$$

где  $w$  — число витков катушки;  $B$  — индукция в зазоре;  $l_a$  — активная длина витка.

В преобразователях второй группы индуцированная ЭДС наводится путем изменения магнитного потока вследствие колебаний полного магнитного сопротивления магнитной цепи, создаваемых чаще всего изменением воздушного зазора в этой цепи (рис. 8.13).

На рис. 8.13, *а* изображена схема устройства датчика с индукционным преобразователем для измерения скорости вращения. На валу  $1$  укреплен стальной зуб, который при вращении вала проходит мимо зазора неподвижно установленной магнитной системы  $2$  с постоянным магнитом, уменьшая магнитное сопротивление зазора этой системы согласно кривой  $R_m$  (рис. 8.13, *б*). В катушке, надетой на магнит, наводятся импульсы ЭДС, примерная

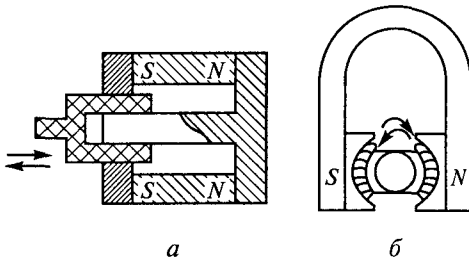


Рис. 8.12. Преобразователи с линейным (*а*) и угловым (*б*) перемещениями катушки

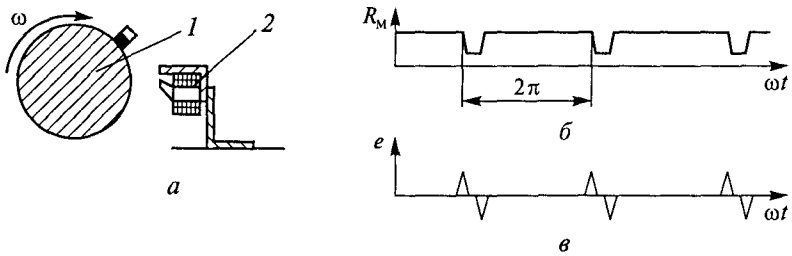


Рис. 8.13. Датчик с индукционным преобразователем (а) и кривые  $R_M$  (б) и  $e$  (в):

1 — вал; 2 — магнитная система

форма которых представлена кривой  $e$  (рис. 8.13, в). Независимо от качества выполнения магнитной системы, старения магнита, расстояния между валом и магнитом частота выходных импульсов в герцах всегда будет равна числу оборотов вала в секунду. В качестве индукционных преобразователей для измерения скорости удобно применять синхронные генераторы с ротором в виде постоянного магнита. Если число пар полюсов ротора равно  $p$ , то частота выходного сигнала

$$f = \frac{p\omega}{2\pi} = \frac{pn}{60^\circ}, \quad (8.13)$$

где  $\omega$  — круговая скорость вращения, рад/с;  $n$  — число оборотов в минуту. Частота таких датчиков не превышает несколько сотен герц.

Для получения более высоких частот, при которых становится оправданным использование цифровых частотомеров, целесообразно строить датчик в виде реактивного генератора с зубчатым ротором (рис. 8.14). Магнитная цепь выполнена так, что когда под одной катушкой статора находится зубец ротора, происходит перераспределение магнитного потока постоянного магнита с частотой, определяемой скоростью вращения и числом зубцов; поток постоянного магнита остается неизменным, и потери в нем отсутствуют.

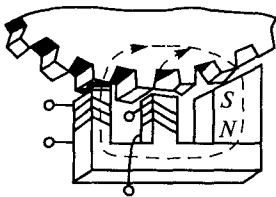


Рис. 8.14. Датчик в виде реактивного генератора с зубчатым ротором

Еще более высокочастотные индукционные преобразователи можно построить, используя технику магнитной записи. Барабан с ферромагнитным покрытием, на который с помощью магнитной головки записано синусоидальное колебание, эквивалентен ротору с числом зубцов, равным числу периодов записанного колебания на окружности барабана.

Индукционный преобразователь данного типа состоит из магнитного барабана с нанесенной записью и считывающей магнитной головки. Магнитная запись в зависимости от зазора между барабаном и головкой позволяет разместить на каждом сантиметре поверхности барабана 50...250 импульсов при частоте считывания 100...200 кГц (соответствующей скорости вращения барабана 50...100 об/с), т.е. заменяет зубчатый диск с 5...25 зубцами на 1 мм. К недостаткам преобразователя этого типа относятся технологические трудности, связанные с необходимостью выдерживать малый зазор между барабаном и считывающей головкой (до 30...50 мкН).

**Расчет индукционных преобразователей.** В преобразователях первой группы магнитный поток не изменяется, поэтому магнитную цепь и ЭДС преобразователя определяют обычными приемами расчета постоянных магнитов. В преобразователях второй группы расчет производится по величине изменения магнитного потока во времени.

Для повышения чувствительности преобразователя выгодно применять катушки с большим количеством витков, так как индуцируемая ЭДС прямо пропорциональна числу витков. Но сопротивление катушки  $R_k$ , а следовательно, число витков должны находиться в соответствующем отношении с сопротивлением измерителя  $R_H$ . Условием наибольшей мощности, получаемой измерителем от преобразователя, в данном случае генератора ЭДС, является равенство сопротивлений катушки преобразователя и измерителя  $R_k = R_H$ :

$$R_k = \frac{\rho \pi D_{cp}}{S k_y} w^2 = C w^2, \quad (8.14)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление провода;  $D_{cp}$  — средний диаметр катушки;  $S$  — заданная площадь окна катушки;  $k_y$  — коэффициент

заполнения;  $C = \frac{\rho \pi D_{cp}}{S k_y}$  — постоянный коэффициент.

Откуда

$$C w^2 = R_H;$$

$$w = \sqrt{\frac{w}{c}} = \sqrt{\frac{R_H S k_y}{\rho \pi D_{cp}}}.$$

Таким образом, зная сопротивление измерителя, можно определить оптимальное число витков для заданных геометрических размеров катушки. При расчете катушки необходимо учитывать поле постоянного магнита и поле, обусловленное током в катушке от индуцируемого ЭДС.

**Погрешности индукционного преобразователя.** Они вызываются изменением его геометрических размеров, индукции постоянного магнита и удельного сопротивления цепи измерителя. Важное значение при расчете индукционных преобразователей имеет вопрос о компенсации температурной погрешности, так как чаще всего эти преобразователи используются на различных средствах транспорта в диапазоне температур  $-60 \dots +50$  °С. Применительно к преобразователям (см. рис. 8.12, а, б) сила тока в измерителе

$$I = \frac{E}{R_k + R_{и}}. \quad (8.15)$$

Здесь как числитель, так и знаменатель изменяются при изменении температуры с разными знаками. Индуцированная ЭДС  $E$  с увеличением температуры уменьшается, так как индукция постоянных магнитов с ростом температуры падает примерно на  $0,002 \dots 0,003$  % на  $1$  °С.

Катушка преобразователя наматывается из медной проволоки, сопротивление катушки  $R_k$  имеет положительный температурный коэффициент. Сопротивление  $R_{и}$  имеет, как правило, также положительный температурный коэффициент, величина которого зависит от соотношения между сопротивлением рамки (из меди) и добавочным сопротивлением (из манганина).

Значение силы тока  $I'$  в измерителе при повышении температуры на  $\theta$  градусов (относительно температуры при градуировке) можно подсчитать по формуле

$$I' = \frac{E(1 - \delta\theta)}{R_k(1 + \alpha\theta) + R_{и}(1 + \alpha_1\theta)}, \quad (8.16)$$

где  $\delta$  — отрицательный температурный коэффициент индукции магнита;  $\alpha$  — положительный температурный коэффициент сопротивления меди;  $\alpha_1$  — положительный температурный коэффициент сопротивления измерителя:

$$\alpha_1 = \frac{R_p \alpha}{R_p + R_{доб}}, \quad (8.17)$$

где  $R_p$  — сопротивление рамки измерителя;  $R_{доб}$  — добавочное сопротивление измерителя.

Данная формула справедлива лишь для простейшей схемы измерителя. В более сложных схемах усложняется и формула для подсчета коэффициента  $\alpha_1$ . Погрешность, обусловленная изменением температуры, отрицательна

$$\gamma = \frac{I' - I}{I} 100. \quad (8.18)$$

Значение  $\gamma$  тем меньше, чем меньше  $R_k$  относительно  $R_n$  и чем меньше температурная погрешность самого измерителя.

Одним из наиболее радикальных средств компенсации температурной погрешности является применение термомагнитного шунта к магниту преобразователя (если его конструкция это позволяет). Термомагнитный шунт прикрепляется таким образом, что он шунтирует магнитный поток в воздушном зазоре.

Термомагнитные шунты выполняют из специальных сплавов никеля и меди или никеля и железа. Данные сплавы в диапазоне температур  $-80 \dots +80$  °С обладают весьма круто падающей кривой  $B = f(t)$ . Таким образом, с увеличением температуры магнитный поток, ответвляющийся в термомагнитный шунт, уменьшается, за счет чего увеличивается часть общего потока магнита, ответвляющегося в зазор. Вследствие этого возрастает значение  $E$ , а следовательно, и сила тока  $I$ .

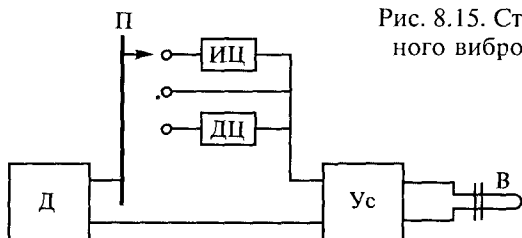
При наличии в индукционном преобразователе диска или полого стаканчика материал для этих деталей следует брать с малым температурным коэффициентом — с целью компенсации температурной погрешности.

При проектировании индукционного преобразователя большое внимание следует уделять получению линейной зависимости, индуцируемой ЭДС от амплитуды перемещения катушки. Линейность преобразования для преобразователей первой группы зависит от размеров катушки и от ее расположения относительно полюсных наконечников. При рациональном выборе конфигурации магнитной цепи, размеров и положения катушки эта погрешность не превышает  $0,5 \dots 1\%$ . Линейность преобразования для преобразователей второй группы зависит от магнитных характеристик ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь, и так как эти характеристики нелинейны, эти преобразователи имеют большую погрешность от нелинейности. Нелинейность преобразователей второй группы можно уменьшить рациональным выбором рабочего зазора. Если погрешность остается большой, измеритель градуируется вместе с преобразователем.

**Применение индукционных преобразователей.** Свойство выходного напряжения индукционного преобразователя изменяется пропорционально скорости перемещения подвижной части, что используется для построения универсальных виброизмерительных устройств, в измерительной цепи которых значения виброперемещений и виброускорений получаются путем интегрирования или дифференцирования выходного сигнала датчика. На рис. 8.15 приведена структурная схема промышленного универсального виброизмерительного устройства, позволяющая измерять перемещение, скорости и ускорения.

Сигнал сейсмического вибродатчика с индукционным преобразователем поступает через интегрирующую ИЦ или диффе-

Рис. 8.15. Структурная схема универсального виброизмерительного устройства



ренцирующую ДЦ цепь, или непосредственно в усилитель Ус, на выход которого подключен вибратор осциллографа. Выбор измеряемого параметра осуществляется при помощи переключателя П. Прибор имеет три канала, обеспечивающих работу в диапазоне частот  $10 \dots 500$  Гц при коэффициенте преобразования  $70 \text{ мА/В}$  по сигналу,  $24 \cdot 10^{-3} \text{ мА/В}$  по интегралу входного сигнала и  $175 \cdot 10^{-3} \text{ мА} \cdot \text{с/В}$  по производной входного сигнала при нагрузке на указатель с сопротивлением  $1 \text{ Ом}$ .

Другим направлением построения широкодиапазонных виброизмерительных приборов является использование корректирующих цепей, позволяющих использовать один и тот же датчик для измерения виброперемещений и виброускорений (рис. 8.16).

В зазоре между полюсным наконечником 2, напрессованным на постоянный магнит, и внешним магнитопроводом 8 помещена рабочая катушка 3 индукционного преобразователя, намотанная на дюралюминиевый каркас 1. В качестве упругих элементов используются плоские П-образные пружины 4. Винтами 5 и 6 пружины прикреплены одним концом к рабочей катушке, а другим — к корректирующей катушке 7. Последняя служит для коррекции погрешностей, обусловленных внешними магнитными полями, и включается встречно с рабочей катушкой. Успокоение системы электромагнитное и осуществляется за счет взаимодействия токов, индуцированных в каркасе и рабочей катушке, с полем постоянного магнита. Датчик имеет чувствительность око-

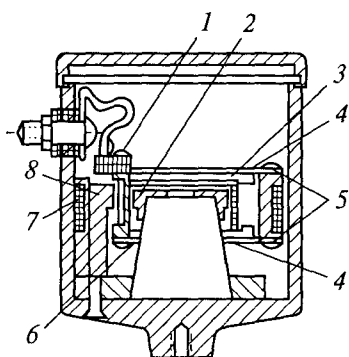


Рис. 8.16. Прибор для измерения виброперемещений и виброускорений:

1 — дюралюминиевый каркас; 2 — полюсный наконечник; 3 и 7 — соответственно рабочая и корректирующая катушки; 4 — П-образные пружины; 5 и 6 — винты; 8 — внешний магнитопровод



до 50 мВ/мм, собственную резонансную частоту 18 Гц, степень успокоения  $\beta = 0,3$ , массу 300 г, диаметр 50 мм и длину 60 мм. Рабочий диапазон прибора по ускорению 0,03... 10 g и по смещению 0,03... 10 мм. Погрешность измерения не более 10 %.

Индукционные преобразователи могут быть использованы для измерения постоянного ускорения и скорости.

На рис. 8.17 показано принципиальное устройство прибора с индукционным обратным преобразователем, разработанным российскими учеными. Позже появилось сообщение о том, что на таком же принципе основан акселерометр, установленный в системе американской ракеты «Minitmen».

Под действием ускорения  $X''$  маятник, образованный постоянным магнитом 3, подвешенным на оси 5, отклоняется. Емкостный преобразователь недокомпенсации 4 выходит из равновесия, выходной сигнал усиливается усилителем и поступает на обмотку двигателя 1. Двигатель вращает диск 2, расположенный между полюсами постоянного магнита. Возникающий момент уравнивает момент маятника. Скорость вращения диска, т. е. частота  $\omega$ , пропорциональна ускорению и является выходной величиной прибора.

Широкое распространение для измерения скорости получили различного рода тахометры. Тахометры с амплитудной модуляцией обычно выполняются с индукционным преобразователем (генератором постоянного или переменного тока), выходной величиной которых является ЭДС. Для измерения скорости также используются частотные тахометры (с частотной модуляцией), которые являются наиболее простыми и точными. В качестве образцового отрезка пути в этих датчиках используется полный оборот  $360^\circ$ . Измерителем в данном тахометре может служить герцметр. Индукционные преобразователи чаще всего используют в частотных датчиках тахометров. Они просты, надежны, дают большую выходную мощность.

**Недостатки:** необходимость непосредственного доступа к валу; зависимость амплитуды выходного сигнала от измеряемой скорости вращения, что затрудняет измерение малых скоростей, а также создаваемый им тормозной момент.

На рис. 8.18 показан принцип конструкции тахометра с индукционным преобразователем.

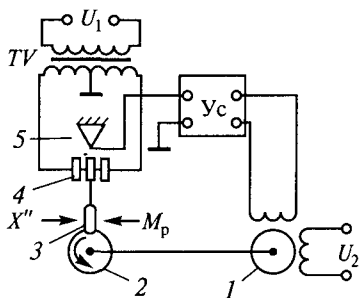


Рис. 8.17. Устройство прибора для измерения постоянного ускорения и скорости:

1 — двигатель; 2 — диск; 3 — постоянный магнит; 4 — преобразователь недокомпенсации; 5 — ось

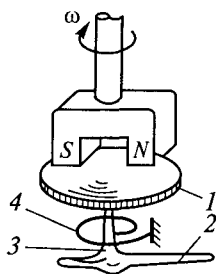


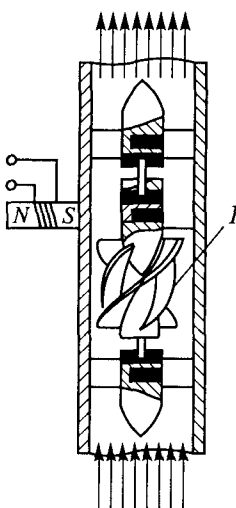
Рис. 8.18. Тахометр с индукционным преобразователем:

1 — металлический диск; 2 — стрелка; 3 — вал; 4 — пружинка

Магнит гибким валом связан с испытуемым объектом. В поле магнита, вращающегося со скоростью  $\omega$ , расположен металлический диск 1, укрепленный на валу 3. На этом же валу укреплены один конец пружинки 4 из фосфористой бронзы и стрелка 2, угол  $\alpha$  поворота которой является выходной величиной прибора. При вращении магнит увлекает за собой диск. Под действием вращающего момента пружина, имеющая удельный противодействующий момент  $W$ , закручивается на угол, прямо пропорциональный измеряемой скорости.

Индукционные преобразователи используются также и для измерения объемного расхода жидкости или газа, протекающего по трубопроводу в единицу времени. На рис. 8.19 представлена схема устройства турбинного крыльчатого тахометрического датчика. Он представляет собой отрезок трубы, в котором установлена небольшая осевая турбинка 1.

Под действием потока жидкости в трубе ротор турбинки вращается со скоростью, достигающей до 250 об/с. Скорость вращения турбинки преобразуется в частоту электрических колебаний любым из описанных выше индукционным преобразователем. Погрешность датчиков такого типа можно довести до 0,35%. Погрешность целиком определяется погрешностью преобразования расхода в скорость вращения турбинки и зависит от сил сопротивления вращению ротора, возникающих от трения в подшипниках, вязкости жидкости и тормозного момента индукционного преобразователя.



Частотные датчики расходомеров могут работать как с аналоговым измерительным устройством типа конденсаторного частотомера, так и с цифровым частотомером. Результирующая погрешность в первом случае составляет 1...2%, во втором — может быть менее 0,5%.

В индукционном расходомере (рис. 8.20) используется эффект возникновения электрического тока в проводнике, перемещающемся в магнитном поле.

Рис. 8.19. Устройство турбинного крыльчатого тахометрического датчика:

1 — осевая турбинка

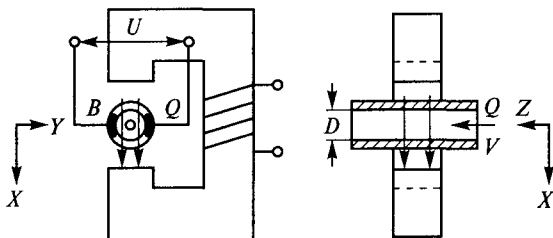


Рис. 8.20. Устройство индукционного расходомера

Протекающая жидкость отождествляется с проводником, т. е. она должна обладать определенной минимальной проводимостью. Согласно закону Фарадея, в обладающей электрической проводимостью жидкости  $Q$ , протекающей через магнитное поле, возникает электрическое поле.

Контролируемый поток протекает по армированной изолятором трубе, в стенах которой перпендикулярно направлению магнитного поля и потока среды установлены два диаметрально расположенных электрода  $B$ , с которых снимается напряжение  $U$ , пропорциональное средней скорости потока среды. Этот образованный высокоомным источником сигнал, величина которого имеет несколько милливольт, с помощью кабеля подается на измерительный преобразователь, усиливающий его и осуществляющий его дальнейшую обработку. Индукционные преобразователи, например фазовые датчики торсиометров, могут быть также использованы для измерения крутящего момента.

## 8.5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Термоэлектрические преобразователи относятся к типу тепловых преобразователей и основаны на явлении термоэлектричества, открытого акад. Ф. Эпинусом (1759). Явление термоэлектричества заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников)  $A$  и  $B$  и соединить их между собой концами (рис. 8.21,  $a$ ), причем температуру  $t_1$  одного места соединения сделать отличной от температуры  $t_0$  другого, в цепи появится ЭДС, называемая *термоэлектродвижущей силой* (термоЭДС). Она является следствием разности функций температур мест соединения проводников

$$E_{AB}(t_1, t_0) = f(t_1) - f(t_0). \quad (8.19)$$

Данная цепь называется *термоэлектрическим преобразователем* или *термопарой*; проводники, составляющие термопару, — *термоэлектродами*, а места их соединения — *спаями*.

Термопару можно использовать для измерения температуры. Если один спай термопары (рабочий спай) поместить в среду с температурой  $t_1$ , которую нужно измерить, а температуру другого (нерабочего) спаив поддерживать постоянной  $f(t_0) = \text{const}$ , то

$$E_{AB}(t_1, t_0) = f(t_1) - f(t_0) = f_1(t_1).$$

Последнее выражение положено в основу измерения температуры при помощи термопар.

Таким образом, входной величиной термопары является температура  $t_1$  рабочего спаив, а выходной величиной — термоЭДС, которую термопара развивает при строго постоянной температуре  $t_0$  нерабочего спаив.

Приборы, представляющие собой сочетание термопары и измерителя, используемые для измерения температуры, называются *термоэлектрическими пирометрами*.

Включить измеритель (указатель) в цепь термопары можно по двум схемам (рис. 8.21, б и в), а для того чтобы включение в цепь термопары указателя не изменило значения термоЭДС, места соединения указателя с термоэлектродами должны иметь одинаковую температуру.

Для измерения температур до  $1100^\circ\text{C}$  используют термопары в основном из неблагородных металлов, для измерения температур свыше  $1100 \dots 1600^\circ\text{C}$  — термопары из благородных металлов платиновой группы, а для измерения температур более  $1600^\circ\text{C}$  — термопары из жароупорных материалов (вольфрам — молибден). Направление термоЭДС зависит лишь от природы материалов, используемых в качестве термоэлектродов. Положительным называют тот термоэлектрод, по направлению к которому ток идет через рабочий спай термопары.

В табл. 8.1 приведены термоЭДС, которые развиваются различными термоэлектродами в паре с платиной при температурах рабочего спаив  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  и нерабочего спаив  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . При конструировании термопар стремятся сочетать термоэлектроды, один из которых развивает с платиной наиболее положительную, а другой — отрицательную термоЭДС. Необходимо также учитывать пригодность того или иного термоэлектрода для применения в заданных условиях измерения (влияния на термоэлектрод среды, температуры и т.д.).

Наиболее распространены в практике термопары: платиноро-

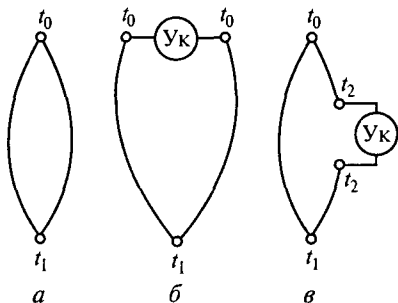


Рис. 8.21. Термоэлектрические преобразователи

Таблица 8.1

Материал	ТермоЭДС, мВ	Материал	ТермоЭДС, мВ
Кремний	+44,8	Свинец	+0,41
Сурьма	+4,7	Олово	+0,42
Хромель	+2,4	Магний	+0,42
Нихром	+2,2	Алюминий	+0,40
Железо	+1,8	Графит	+0,32
Сплав (90 % Pt + +10 % Fe)	+1,3	Ртуть	0,00
Кадмий	+0,9	Палладий	-0,57
Вольфрам	+0,8	Никель	-1,5
Манганин	+0,76	Алюмель	-1,7
Медь	+0,76	Сплав (60 % Au + +30 % Pd + +10 % Pt)	-2,31
Золото	+0,75	Константан	-3,4
Цинк	+0,75	Копель	-4,5
Серебро	+0,72	Висмут I оси	-5,2
Иридий	+0,65	Висмут II оси	-7,7
Родий	+0,64	Пирит	-12,1
Сплав (90 % Pt+ +10 % Rh)	+0,64	Молибденит	-69 ... -104

дий — платина, хромель — алюмель, хромель — копель, вольфрам — молибден, борид-карбид циркония.

Из благородных металлов стандартными и наиболее распространенными термопарами являются четыре, основные характеристики которых указаны в табл. 8.2.

Устройство термопары промышленного типа, применяемое для измерения температур в печах, соляных ваннах, газоходах, рассмотрим на примере термопары, изображенной на рис. 8.22.

Эта термопара из благородных металлов расположена в составной защитной трубе с подвижным фланцем для ее крепления. Рабочий спай 9 термопары изолирован от трубы фарфоровым наконечником 8. Термоэлектроды изолированы бусами 6. Защитная труба состоит из рабочего 7 и нерабочего 4 участков. Передвижной фланец 5 крепится к трубе винтом. Головка термопары имеет литой корпус 3 с крышкой 11, закрепленной винтами 1. В головке винтами укреплены фарфоровые колодки 2 с незакрепленными

Таблица 8.2

Термо-пара	ТермоЭДС при $t = 100^\circ\text{C}$ ; ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ), мВ	Верхний предел измеряемой температуры, $0^\circ\text{C}$	
		при длительном измерении	при кратковременном измерении
Медь — копель	4,75	350	500
Железо — копель	5,75	600	800
Хромель — копель	6,90	600	800
Хромель — алюмель	4,10	1100	1250

зажимами 10. Они позволяют термоэлектродам удлиняться под воздействием температуры без возникновения механических напряжений, ведущих к быстрому разрушению термоэлектродов.

Основным вопросом при конструировании термопар промышленного типа является выбор материала защитной трубы (арматуры) и изоляции.

Защитная арматура термопары должна ограждать ее от воздействия горячих химически агрессивных газов, которые быстро разрушают термопару, поэтому арматура должна быть газонепроницаемой, хорошо проводить тепло, быть механически стойкой и жароупорной. При температурах до  $600^\circ\text{C}$  обычно применяют стальные трубы без шва, при температуре до  $1100^\circ\text{C}$  — защитные трубы из легированных сталей, для термопар из благородных металлов — в основном кварцевые, фарфоровые трубы. В качестве изоляции термоэлектродов друг от друга до  $300^\circ\text{C}$  используют асбест; до  $1300...1400^\circ\text{C}$  — фарфоровые трубки или бусы и до  $2000...2500^\circ\text{C}$  — кварцевые трубки или бусы. В лабораторных условиях при измерении низких температур используют теплостойкую резину — до  $150^\circ\text{C}$ ; шелк — до  $100...120^\circ\text{C}$ ; эмаль — до  $150...200^\circ\text{C}$ .

Термоэлектроды термопары, помещаемые в защитную трубу, обычно выполняются жесткими, а соединения их с другими элементами измерительной цепи осуществляется гибкими проводниками. Соединительные провода, идущие от зажимов в головке термопары до места нахождения нерабочего спая, называются *удлинительными электродами*. Эти электроды в необходимом диапазоне температур должны иметь такую же термоЭДС, как и электроды основной термопары, и места присоединения удлинительных термоэлектродов к основным термоэлектродам в головке тер-

Рис. 8.22. Устройство термопары промышленного типа:

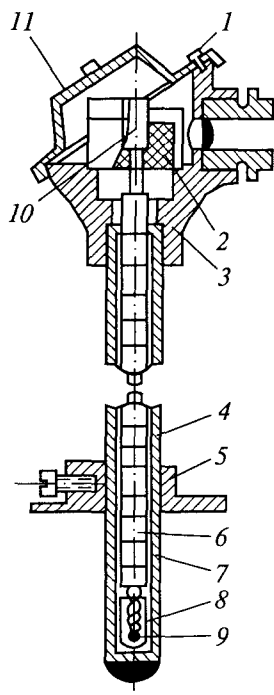
1 — винты; 2 — фарфоровые колодки; 3 — корпус; 4 и 7 — соответственно нерабочий и рабочий участки; 5 — передвижной фланец; 6 — бусы; 8 — фарфоровый наконечник; 9 — рабочий спай; 10 — зажимы; 11 — крышка

мопары должны быть одинаковой температуры. При невыполнении этих условий возникает погрешность измерения. Удлинительные термоэлектроды для термопар из неблагородных металлов выполняются из тех же материалов, что и основные термоэлектроды.

Например, для термопары платиновой — платина применяют удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП, образующие термопару, термоидентичную термопаре платиновой — платина в пределах до  $150^{\circ}\text{C}$ .

Большое значение при измерении температуры с помощью термопар имеет их инерционность, определяемая как время, за которое показания термопары при переносе из среды с комнатной температурой ( $15 \dots 20^{\circ}\text{C}$ ) в среду с температурой  $100^{\circ}\text{C}$  достигают  $97 \dots 98^{\circ}\text{C}$ . Для уменьшения инерционности необходимо обеспечить хороший тепловой контакт между рабочим спаем термопары и средой с измеряемой температурой.

**Погрешности термоэлектрических преобразователей и методы их коррекции.** Погрешность, обусловленная изменением температуры нерабочих спаев термопары. Градуировка термопар осуществляется при температуре нерабочих спаев, равной нулю. Если при практическом использовании термопары температура нерабочих спаев будет отличаться от  $0^{\circ}\text{C}$ , это вызовет появление погрешности измерения. Для ее устранения нерабочие спаи термостатируют в ванне с тающим льдом, т.е. при  $t = 0^{\circ}\text{C}$ . Такой способ не всегда применим. Следует термостатировать нерабочие спаи, чтобы температура их либо сохранялась постоянной во времени, либо изменялась возможно медленнее при изменении окружающей температуры. Термостатирование осуществляется либо погружением рабочих спаев на достаточную глубину в землю, что обеспечивает постоянство температуры в течение года, либо помещением их в массивную коробку с тепловой изоляцией, снабженную ртутным термометром и двумя штуцерами для ввода удлинительных и медных проводов. Обладая боль-



шой тепловой инерцией, коробка достаточно медленно реагирует на изменение внешней температуры.

Наиболее радикальным средством стабилизации температуры нерабочего спая является автоматическое термостатирование с электрическим подогревом. Если температура нерабочего спая известна, ввести соответствующую поправку к показаниям термоэлектрического термометра можно следующим образом. Пусть имеется градуировочная кривая термопары  $E = f(t)$  (рис. 8.23).

Градуировка термопары производилась при температуре  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Положим, что термопарой нужно измерить температуру  $t$  при температуре нерабочих спаев  $t'_0$  большей, чем  $t_0$ . ТермоЭДС  $E(t, t'_0)$  термопары в этом случае будет меньше термоЭДС  $E(t, t_0)$ , которая была бы при той же температуре  $t$  рабочего спая, но при температуре нерабочих спаев  $t_0$ . ТермоЭДС термопары уменьшится на величину  $E(t'_0, t_0)$  и окажется равной (см. рис. 8.23) термоЭДС  $E(t'_0, t_0)$ , которая была бы при температуре нерабочего спая, равной  $t'$ , и температуре рабочего спая, равной  $t'_0$ , т.е.

$$E(t', t_0) = E(t, t_0) - E(t'_0, t_0).$$

В результате по шкале будет отсчитано значение температуры  $t' < t$ .

Если прибор имеет линейную шкалу или двойную шкалу и в градусах температуры, и в милливольтгах, ввести поправку на температуру свободных концов согласно уравнению несложно. Труднее, когда прибор имеет нелинейную шкалу и только в градусах температуры.

Из рис. 8.23 видно, что

$$E(t'_0, t_0) = (t'_0 - t) M \operatorname{tg} \alpha = (t - t') M \operatorname{tg} \alpha',$$

где  $M$  — масштабный коэффициент мВ/°С. Откуда поправка

$$(t - t') = (t'_0 - t_0) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha'} = (t' - t'_0) k. \quad (8.20)$$

При резко выраженной нелинейной шкале коэффициент  $k$ , называемый *поправочным коэффициентом* на температуру нерабочих спаев, является функцией  $t$  и, следовательно, для каждого

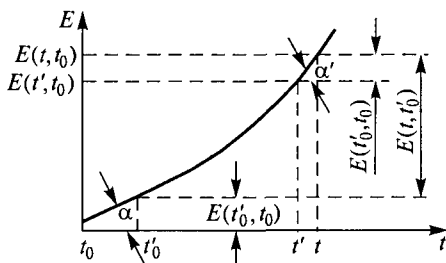


Рис. 8.23. Градуировочная кривая термопары



участка кривой будет различным. Практически в этом случае градуировочную кривую делят на участки по  $100^{\circ}\text{C}$  и для каждого участка определяют  $k$ . Для грубых подсчетов можно принять  $k = 0,8 \dots 1,0$  для термопар из благородных металлов и  $k = 0,5 \dots 0,6$  для термопар из неблагородных металлов.

Погрешность, обусловленная изменением температуры линии, термопары и указателя. В термоэлектрических пирометрах для измерения термоЭДС применяют обычные милливольтметры и низкоомные компенсаторы с ручным или автоматическим уравниванием на предел измерения до 100 мВ. В тех случаях, когда термоЭДС измеряется компенсатором, сопротивление цепи термоЭДС, как известно, роли не играет; в тех случаях, когда термоЭДС измеряется милливольтметром, может возникнуть погрешность, вызванная колебаниями температуры всех элементов цепи термоЭДС.

Сила тока милливольтметра, включенного в цепь термопары:

$$I = \frac{E}{R_{\text{ук}} + R_{\text{п}} + R_{\text{т}}}, \quad (8.21)$$

где  $E$  — термоЭДС, развиваемая термопарой;  $R_{\text{ук}}$ ,  $R_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{т}}$  — сопротивления указателя, проводов и термопары.

Милливольтметр измеряет напряжение на своих зажимах:

$$U_{\text{ук}} = E - I(R_{\text{п}} + R_{\text{т}}) = \frac{ER_{\text{ук}}}{R_{\text{ук}} + R_{\text{п}} + R_{\text{т}}}. \quad (8.22)$$

Из этого выражения следует, что необходимо стремиться к постоянному и как можно меньшему значению сопротивления проводов и термопары.

В отечественных термоэлектрических пирометрах при их градуировке учитывается сопротивление внешней относительно милливольтметра цепи ( $R_{\text{п}} + R_{\text{т}}$ ), равное 5 Ом. Регулировка сопротивления этой внешней цепи осуществляется при помощи добавочной катушки сопротивления из манганина, называемой уравнивательной катушкой, непосредственно при монтаже прибора.

Если в процессе эксплуатации изменяется сопротивление термопары (термоэлектроды становятся тоньше) или сопротивление линии и милливольтметра из-за колебаний температуры окружающей среды, возникает погрешность измерения.

Относительная температурная погрешность, вызванная изменением сопротивления отдельных участков электрической цепи пирометра вследствие колебаний температуры окружающей среды, равна в общем случае

$$\gamma_t = - \left[ \left( \frac{R_{\text{п}}\alpha_{\text{п}}(t - t_{\text{ук}})}{R_{\text{ук}} + R_{\text{п}} + R_{\text{т}}} + \frac{R_{\text{п}}\alpha_{\text{п}}(t - t_{\text{п}})}{R_{\text{ук}} + R_{\text{п}} + R_{\text{т}}} \right) \right] 100, \quad (8.23)$$

где  $R_p$  — сопротивление рамки милливольтметра;  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  — температурные коэффициенты сопротивлений материалов обмотки рамки и проводов;  $t$  — температура среды;  $t_{yk}$  — температура, при которой проводилась градуировка милливольтметра ( $20^\circ\text{C}$ );  $t_p$  — температура, при которой проводилась регулировка сопротивления ( $R_n + R_r$ ) до значения  $5\ \text{Ом}$ .

Данное уравнение позволяет определить полную температурную погрешность, обусловленную как изменением температуры милливольтметра (первый член уравнения), так и изменением температуры проводов (второй член уравнения). При расчете погрешности практически можно ограничиться одним первым членом уравнения, так как полное сопротивление милливольтметра, состоящее из рамки и добавочного сопротивления, в  $40 \dots 50$  раз больше сопротивления проводов  $R_n$ . Температурная погрешность, полученная при таком расчете, оказывается близкой к температурной погрешности милливольтметра, гарантированной заводом-изготовителем. Погрешность, вызванная изменением сопротивления термопары вследствие утоньшения электродов, как правило, очень мала.

Погрешности, обусловленные тепловыми потерями преобразователей термоэлектрических пирометров и паразитными термоЭДС. При измерении температуры жидких или газообразных сред, в которые помещается термопара, температура места соединения термоэлектродов может сильно отличаться от температуры измеряемой среды. Это объясняется тем, что рабочий спай термопары закрыт защитным чехлом и защитной жароупорной трубой, препятствующей проникновению теплоты к рабочему спаю. Конструктивно термопара выполняется так, чтобы обеспечить хороший тепловой контакт между рабочим спаем и защитным чехлом.

Для уменьшения погрешностей термометра от тепловых потерь при измерении температуры жидких и газообразных сред следует поместить термопару глубоко в измеряемую среду; установить против направления движения среды; трубопровод в районе измерения температуры теплоизолировать; рабочий конец термопары установить в месте наибольшей скорости среды; защитную трубу изготавливать из материала с малым значением коэффициента теплопроводности; головку термопары защитить от воздействия холодной окружающей среды, для чего предусмотреть надлежащее уплотнение теплоизоляционным материалом.

При измерении температуры твердых и сыпучих тел погрешность, обусловленная потерями теплоты термопарой путем лучеиспускания, отсутствует, так как обычно эти тела непрозрачны и характеризуются плохой теплопроводностью. Погрешность в данном случае резко увеличивается от потери теплоты через теплопроводность защитной трубы термопары. Простым средством

уменьшения погрешности, вызванной теплопроводностью термопары, является глубокое погружение термопары в толщу среды. При измерении температуры в телах с малым объемом для уменьшения этой погрешности целесообразно прокладывать участок термопары по изотермической поверхности, т. е. на поверхности, температура которой измеряется с тем, чтобы отток теплоты по термопаре происходил на значительном расстоянии от рабочего спая термопары.

При измерении температуры поверхности, осуществляемой с помощью термопары без защитной арматуры, погрешность возникает в основном за счет теплопроводности термопары. Для уменьшения этой погрешности термопару следует укладывать на изотермической поверхности.

Кроме погрешности от тепловых потерь при монтаже и эксплуатации термопар могут возникнуть погрешности от паразитных термоЭДС. Они возникают из-за наличия неоднородностей в материалах, из которых составляется электрическая цепь пирометра, при наличии градиентов температуры вдоль этой цепи.

Неоднородности в электродах термопары могут возникнуть как при изготовлении проволоки, так и при изготовлении термопары вследствие ее деформации. Паразитные термоЭДС, обусловленные неоднородностями, возникшими при изготовлении проволоки и термопары, учитываются при градуировке. Неоднородности, возникшие в термопаре после градуировки, вызывают погрешности при измерении.

## 8.6. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ

При измерении температуры нашли большое распространение пирометры, использующие лучистую энергию нагретых тел. К таким пирометрам относятся радиационные, оптические и цветовые.

**Радиационные пирометры.** Устройство радиационного пирометра представлено на рис. 8.24.

Излучение исследуемого объекта концентрируется объективом *1* через диафрагму *2* на рабочих концах термобатареи *S*, припаянных к платиновому лепестку *3*, покрытому платиновой чернью (см. рис. 8.24, *а*). Для наилучшего поглощения лучей можно считать, что подобным лепестком поглощается 98...99 % падающих на него лучей. Термобатарея с лепестком помещена в стеклянную коробочку. Экран *4* защищает термобатарею от механических повреждений и от рассеянных излучений со стороны стенок телескопа, температура которых изменяется в зависимости от условий эксплуатации.

При измерении высоких температур для защиты глаза при установке телескопа перед окуляром в поле зрения устанавливают

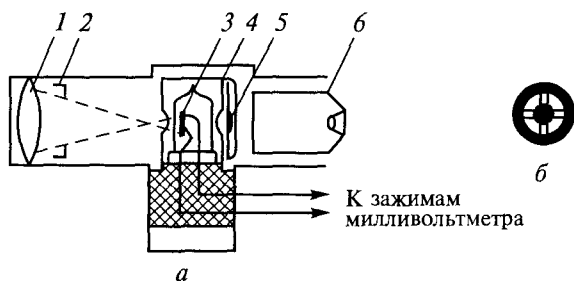


Рис. 8.24. Радиационный пирометр (а) и лепесток (б):

1 — объектив; 2 — диафрагма; 3 — лепесток; 4 — экран; 5 — красное стекло; б — окуляр

красное стекло 5. Наводка осуществляется таким образом, что лепесток полностью перекрывается изображением объекта измерения, тогда в окуляре б виден лепесток, окруженный ярким сиянием раскаленной поверхности (см. рис. 8.24, б). Для правильной установки отношение диаметра источника излучения к расстоянию от телескопа до излучателя должно быть равно примерно  $1/15$ .

Максимальная температура нагрева лепестка должна быть равна  $250^{\circ}\text{C}$ , так как при более высоких температурах чернь коагулирует и становится серой. Предел измерения такого пирометра составляет  $900 \dots 1800^{\circ}\text{C}$ .

Радиационные пирометры обладают следующими погрешностями:

- погрешность от неполноты излучения, так как пирометры обычно градуируются по излучению абсолютно черного тела, поэтому показания их всегда будут меньше, чем действительная температура объекта измерения. Следовательно, применение радиационных пирометров возможно лишь в тех случаях, когда полная мощность излучения объекта измерения мало отличается от полной мощности излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Большинство закрытых печей и топок с небольшими отверстиями и окнами удовлетворяет этому условию;

- погрешность, обусловленная поглощением в промежуточной среде между телескопом пирометра и излучателем. Эта погрешность может достигать значительной величины, особенно если воздух в промежуточной среде загрязнен (пыль, дым, углекислый газ и т.д.). Погрешность расчета не поддается;

- погрешность от изменения расстояния между пирометром и излучателем. Если пирометр расположен слишком близко к источнику излучения, сказывается нагрев диафрагмы и стенок телескопа, а также холодных концов термопары термобатареи, что уменьшает показания пирометра. При этом погрешность будет тем больше, чем больше диаметр изображения излучающей поверх-

ности. Если же размеры излучающей поверхности малы или расстояние между телескопом и излучателем больше нормального, так что изображение излучателя не перекрывает лепесток, показания пирометра также будут занижены. Поэтому пирометр следует устанавливать на таком расстоянии от излучающей поверхности, чтобы изображение последней имело такой же диаметр, какой имела излучающая поверхность при градуировке пирометра.

Для компенсации влияния нагрева свободных концов термопар термобатарею шунтируют медным сопротивлением, которое возрастает с увеличением температуры. Следовательно, при нагреве свободных концов одновременно с уменьшением термоЭДС сила тока через шунт будет уменьшаться, а сила тока через измерительный прибор не изменится.

**Цветовые фотоэлектрические пирометры.** Эти пирометры измеряют цветовую температуру. Раскаленное черное тело испускает лучи всех длин волн. При этом длина волны  $\lambda_{\max}$ , соответствующая максимальному излучению при данной температуре, может быть найдена как

$$\lambda_{\max} T = \text{const} = 0,2884 \text{ (см} \cdot \text{град)}.$$

Это выражение носит название закона смещения, который положен в основу измерения температуры цветовыми пирометрами. Абсолютная температура тела  $T$  определяется по длине волн, при которой имеет место максимум интенсивности излучения.

При промышленных измерениях температуры пирометрами принято определять отношение интенсивности излучения данного тела в луче двух заранее выбранных длин волн. Это отношение для каждой температуры будет различным и вполне однозначным и может служить критерием абсолютной температуры тела

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T}}}{e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T}}} = f(T),$$

где  $C_2 = 1,432 \text{ см} \cdot \text{град}$  — постоянная;  $\lambda$  — длина волны, к которой относится интенсивность излучения, см;  $I_\lambda$  — интенсивность излучения, ккал/(см<sup>2</sup> · см · ч).

Пирометры, измеряющие цветовую температуру, применяют, как правило, с фотоэлементами.

Рассмотрим принцип действия одного из таких пирометров (рис. 8.25).

Излучение от объекта измерения  $A$  фокусируется линзой  $1$  на обтюраторе  $2$ , приводимом во вращение синхронным электродвигателем  $3$ , и затем воспринимается фотоэлементом  $4$ .

На диске обтюратора имеется ряд отверстий, половина которых закрыта красным светофильтром  $S_{\text{к}}$ , а половина — синим  $S_{\text{с}}$ .

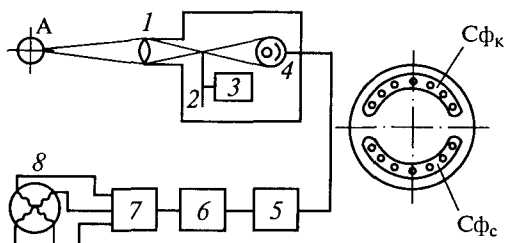


Рис. 8.25. Цветовой фотоэлектрический пирометр:

1 — линза; 2 — obtюратор; 3 — синхронный электродвигатель; 4 — фотоэлемент; 5 — усилитель; 6 — выпрямительный узел; 7 — коммутатор; 8 — логометр

Таким образом, на фотоэлемент попадают то красные, то синие лучи. Благодаря наличию нескольких отверстий, фототок оказывается промодулированным с несущей частотой, определяемой числом отверстий в obtюраторе и скоростью его вращения.

Модулированный ток в нагрузке фотоэлемента усиливается усилителем 5, а затем выпрямляется фазочувствительным выпрямительным узлом 6, после чего с помощью коммутатора 7 сигнал разделяется соответственно интенсивности красных и синих лучей и воспринимается магнитоэлектрическим логометром 8. В качестве коммутатора используют обычно магнитоэлектрическое поляризованное реле, работающее синхронно с вращением диска obtюратора, т.е. таким образом, что переключение рамок логометра происходит одновременно со сменой светофильтра. Тогда в одной рамке логометра будет протекать ток, обусловленный интенсивностью красных лучей, а в другой — ток, обусловленный интенсивностью синих лучей в объекте излучения.

*Достоинства:* так как цветные пирометры измеряют функцию отношения интенсивностей излучения двух длин волн, погрешность уменьшается из-за неполноты излучения и независимости показаний от расстояния до излучающей поверхности и размеров последней. При надлежащем режиме работы фотоэлемента фотоэлектрические цветные пирометры могут обеспечить измерение температуры до  $2500^{\circ}\text{C}$  с погрешностью не более  $\pm 1\%$ .

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия и устройство пьезоэлектрических преобразователей.
2. Объясните применение и источники погрешностей ионизационных преобразователей.
3. Объясните принцип действия и устройство гальванических преобразователей.
4. Объясните применение и перечислите погрешности гальванических преобразователей.
5. Каковы принцип действия и устройство обращенных преобразователей?

6. Какие существуют типы обращенных преобразователей?
7. Каковы принцип действия и устройство индукционных преобразователей?
8. Назовите погрешности индукционных преобразователей и пути их уменьшения.
9. Объясните принцип действия и устройство термоэлектрических преобразователей.
10. Назовите источники погрешностей термоэлектрических преобразователей и пути их уменьшения.
11. Объясните принцип действия и устройство радиационных пирометров.
12. Назовите источники погрешностей радиационных пирометров.
13. Объясните принцип действия и устройство цветковых фотоэлектрических пирометров.

# ГЛАВА 9

## ВИРТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

### 9.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Понятие «виртуальные приборы» (Virtual Instruments) появилось на стыке измерительной, информационной и компьютерной техники. Виртуальный информационно-измерительный прибор или система — это компьютер, оснащенный набором аппаратных и программных средств, выполняющий функции информационно-измерительного прибора или системы, максимально приближенный к решению задачи. В научных исследованиях, диагностических, статистических и интеллектуальных системах компьютеры используются для решения задач управления измерительными экспериментами, сбора, регистрации, обработки и систематизации данных, представления и хранения результатов наблюдений. При этом часть функций и операций осуществляется не аппаратно, а программно с помощью персонального компьютера. Аппаратная информационно-измерительная часть приборов и систем реализуется в конструктиве стандартной платы и автономного модуля компьютера. Функции, передаваемые компьютеру, обычно связаны с организацией взаимодействия пользователя и компьютера с привычной для пользователя атрибутикой — панели, ручки управления, т.е. в этом случае работа с виртуальными приборами (ВП) оказывается аналогичной работе с традиционными приборами и пультами управления.

Информационные технологии вывели измерительную технику на новый уровень, позволяющий быстрее и с меньшими затратами разрабатывать информационно-измерительные приборы и системы различной сложности: от измерения параметров до ввода и обработки видеоизображений с передачей результатов через внешнюю сеть на любые расстояния. Появление измерительных информационных приборов и систем с применением виртуальных технологий связано:

- с широким распространением персональных компьютеров, имеющих высокое быстродействие, большие объемы памяти, практически неограниченные графические возможности, позволяющие создать функционирующие в реальном масштабе времени виртуальные измерительные устройства, с высокой степенью подобия,



воспроизводящие поведение тех или иных физических приборов и систем;

- созданием автоматизированных информационно-измерительных систем различного назначения, таких как автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) и комплексных испытаний (КИ), физические и космические объекты и др.;

- возможностью реализации в весьма компактной форме приборов и модулей;

- появлением измерительного программирования (ИП), под которым понимается программирование для информационно-измерительной техники и систем, позволяющее ей проводить измерение, контроль, диагностирование или распознавание образов, включая функции сбора, передачи, обработки, представления измерительной информации и управления измерительным экспериментом.

## 9.2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ

Функциональные возможности хорошо знакомых традиционных измерительных приборов заданы их производителем, и изменить число каналов достаточно проблематично. А так как никакой производитель не в состоянии охватить все многообразие реальных задач, это в значительной степени затрудняет подбор оптимального комплекта оборудования с требуемыми параметрами и его настройку. Виртуальный прибор снимает это ограничение. Основой стали открытые, а значит, доступные всем разработчикам и производителям стандарты на универсальное оборудование, что позволяет выбирать лучшие из существующих на рынке решений и компоновать из них специализированные системы.

Виртуальный прибор (ВП) представляет собой комбинацию компьютера, универсальных аппаратных средств ввода-вывода сигналов и специализированного программного обеспечения (ПО), которое, собственно, и определяет конфигурацию и функционирование законченной системы. По сути, в руках создателя системы — конструктор, из которого даже не искушенный в компьютерных технологиях инженер или исследователь может построить измерительный прибор любой сложности. В этом случае, скорее, требования задачи и соответствующее этому ПО, а не возможности прибора определяют функциональные характеристики законченного прибора.

На рис. 9.1 приведена панель виртуального хронопотенциографа, с помощью которого можно осуществлять все процедуры и измерения, описанные ниже.

Специалистами РКК «Энергия» (Е.В. Диденко) созданы и предлагаются к реализации готовые виртуальные приборы: самописец, анализатор спектра, эквалайзер, генератор.

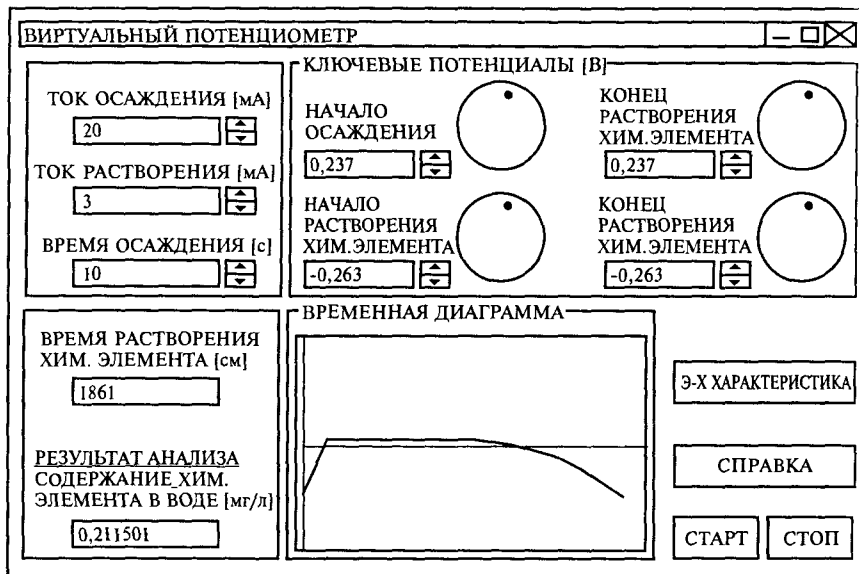


Рис. 9.1. Лицевая панель виртуального хронопотенциографа

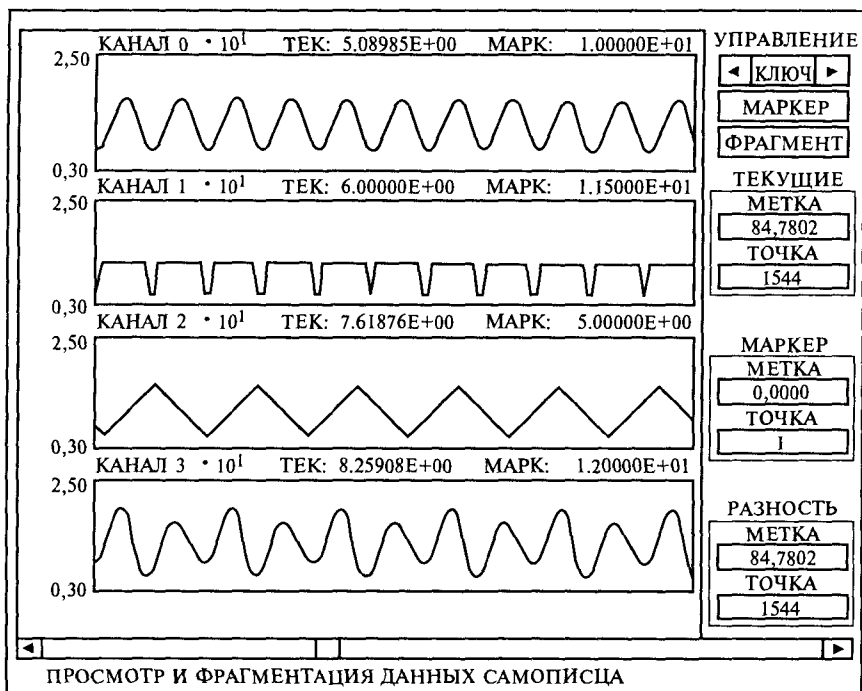


Рис. 9.2. Лицевая панель самописца

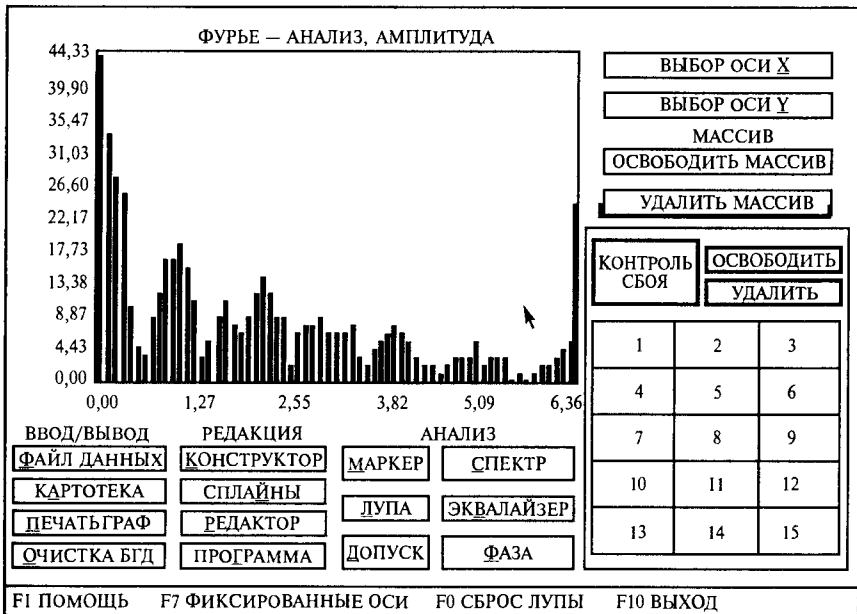


Рис. 9.3. Лицевая панель анализатора спектра

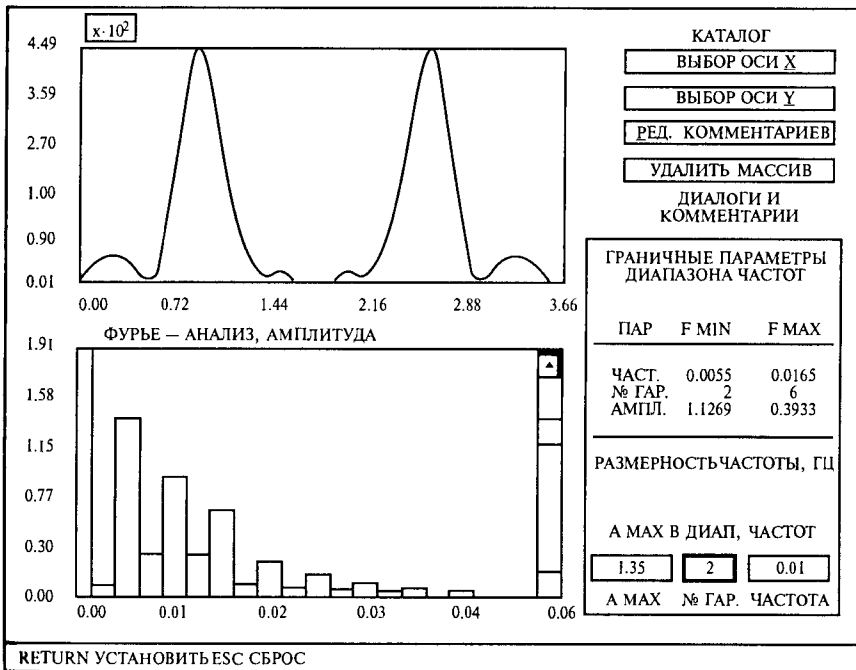


Рис. 9.4. Лицевая панель эквалайзера

**Самописец.** Программируемое число дорожек, калибровка по физическим параметрам, т. е. вывод данных на самописец производится в той размерности, которая удобна пользователю, возможность включения-выключения записи на магнитный носитель. Сервис режима (рис. 9.2) позволяет осуществлять просмотр и фрагментацию данных с записью фрагментов в файл или картотеку лаборатории.

**Анализатор спектра.** Анализатор спектра имеет число гармоник 2 ... 1024. Он позволяет получить амплитуды и фазы гармоник, а также коэффициенты Фурье разложения входного сигнала. Полученные данные могут быть использованы для гармонической аппроксимации этого сигнала (рис. 9.3).

**Эквалайзер.** Число управляемых гармоник спектра 2 ... 128. Пользователь может произвести подавление или усиление любой гармоники или поддиапазона гармоник спектра исходного сигнала. Результат коррекции немедленно отображается в виде графика результирующего сигнала (рис. 9.4). Такая обратная связь позволяет легко добиваться необходимого качества обработки входных данных.

**Генератор.** Программируемая форма, амплитуда и частота выходного сигнала зависят от выбора аппаратных средств. Возможна генерация пакетов непериодических форм, например, запись в картотеку массивов реального сигнала, снятого на объекте, и вос-

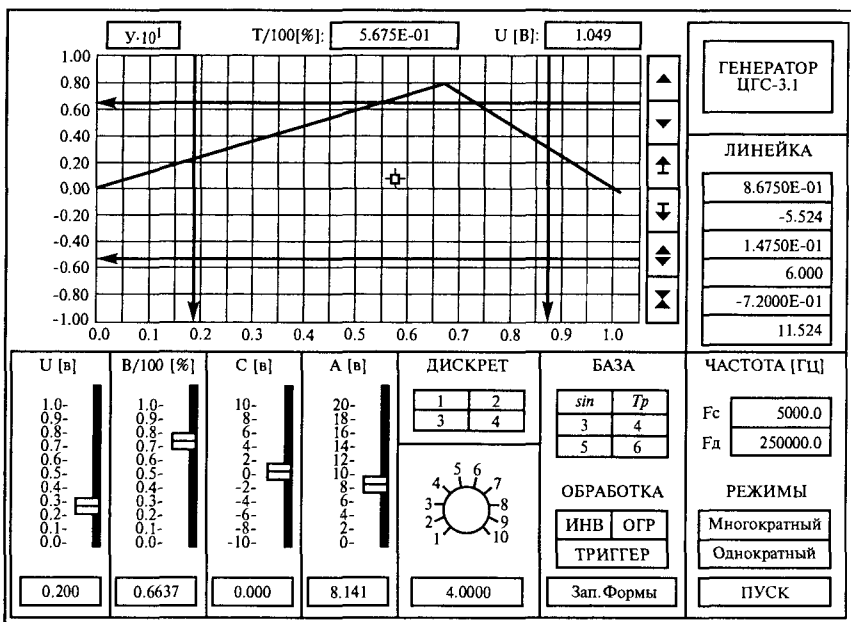


Рис. 9.5. Лицевая панель генератора стандартных сигналов

произведение его на стенде в лабораторных условиях. На рис. 9.5 приведен генератор стандартных и произвольных форм сигналов.

### 9.3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Типовая архитектура ПО ИИС, которая отражает современное представление об измерительном программировании, имеет обычно три уровня: уровень метасистемы, системный уровень, уровень рабочих процедур. На метасистемном уровне проводится настройка измерительного программного обеспечения (ИПО) в соответствии с различными факторами: требованиями пользователей двух нижних уровней, аппаратного обеспечения, прикладной области и т. д.

Системный уровень предоставляет возможность на базе информации предыдущего уровня создать измерительную процедуру и снабдить ее интерфейсом пользователя в виде виртуальной приборной панели и необходимыми данными о параметрах используемых средств и методик измерений, а также драйверами связи с аппаратными исполнителями измерительной процедуры и форматами представления результатов измерений в виде твердой копии или в формате, совместимом с принятым в базе данных. Нижний уровень отражает выполнение в реальном масштабе времени сформированной на верхних уровнях рабочей процедуры. Основные особенности, характеризующие новые направления ИП в сравнении с традиционными, приведены в табл. 9.1.

Замена текстового представления графическим делает представление измерительных данных и процедур более наглядным, не создает языкового барьера, рисунок выражает смысл информации в более компактных единицах, например, графическое про-

Таблица 9.1

Характеристика	Традиционный подход	Новый подход
Аппаратная поддержка	Обычный прибор	Виртуальный прибор
Окружение	Текстовое	Графическое
Синтаксис языка измерительного программирования	Текстовый	Графический
Тип управления выполнением процедуры	Последовательное управление	Управление потоками данных
Стиль программирования	Процедурно-ориентированный	Объектно-ориентированный

граммное обеспечение LabVIEW фирмы National Instruments (США).

Пакет LabVIEW — графическая альтернатива обычному программированию — предназначен для создания измерительных систем и представляет собой программные средства, которые требуются при работе в области мониторинга, испытаний и измерений. С помощью LabVIEW можно создавать графические программы — виртуальные приборы, вместо написания традиционных программ.

Программы в LabVIEW именуются виртуальными приборами, так как способ общения с ними напоминает реальные приборы. Виртуальные приборы играют ту же роль, что и функции в обычных языках программирования, и представляют собой совокупность следующих элементов:

- интерактивного интерфейса с пользователем, называемого лицевой панелью, содержащей органы управления и индикаторы, которые управляются с помощью мыши или клавиатуры;
- блок-схемы, конструируемой на графическом языке и являющейся исходным кодом для ВП;
- условного графического символа (пиктограммы), обозначающего ВП, и интерфейса с другими ВП (соединителя), который выполняет ту же роль, что и список параметров функции или программы в обычных языках программирования.

Программирование управляемым потоком данных находит все большее применение в измерительном графическом программировании (LabVIEW). Программирование, управляемое потоком данных, позволяет избавиться от линейной архитектуры языков, основанных на тексте. Так как порядок выполнения программы в этом случае определяется потоком данных между узлами, а не последовательными строками текста, можно создавать программы, которые имеют многократные маршруты данных и одновременно выполнимые операции. Независимые маршруты данных осуществляются параллельно. В обычном языке программирования организация параллельных операций требует наличия механизмов, поддерживающих так называемые семафоры, мониторы или рандеву. Параллельные процессы при управлении потоком данных не связаны с дополнительными затратами.

Объектно-ориентированная технология означает построение программы как набора взаимодействующих и независимых объектов (классов), представленных экземплярами абстрактных типов данных и обрабатывающих информацию посредством передачи сообщений друг другу. Объединяя в единое целое данные и процедуры, классы позволяют унифицировать обращение к различным типам данных.

Одни классы могут наследовать структуру одного или более других классов, называемых суперклассами; подклассы определяют наследуемую от классов спецификацию более подробно. На-

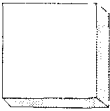



следование дает возможность, используя уже созданные объекты, расширять свойства старых объектов путем изменения внутренних методов. Так как объекты взаимодействуют в программе между собой с помощью некоторого набора сообщений, изменение внутренних качеств и сохранение прежнего стиля позволяют легко модифицировать имеющиеся наработки под новые запросы. Наследование в сочетании с применением виртуальных функций дает возможность использовать такое свойство, как полиморфизм, — однотипное обращение с различными типами данных и функций. Еще одно свойство объектно-ориентированной технологии — инкапсуляция (защита внутренних переменных и методов объекта от взаимодействий внешних факторов) дает общее повышение надежности работы и снижение вероятности случайного сбоя ПО.

Недавно на пути развития технологии программирования приборов появилась новая многообещающая идея. Она называется IVI (Interchangeable Virtual Instruments) — взаимозаменяемые виртуальные инструменты. Основная идея такова. Все приборы одного класса имеют большую, общую для всех приборов группу функций. Например, все цифровые мультиметры (DMM) измеряют постоянное и переменное напряжение, сопротивление, а также выполняют другие функции. Если эти функции выделить в IVI Class Driver для класса DMM Class, то часть программы, отвечающая за управление цифровыми мультиметрами, не будет зависеть от конкретного прибора и его драйвера. Следует отметить высокое качество и надежность приборных драйверов VXI plug & play, что не связано с концепцией классов драйверов IVI Class Driver, а реализуется другими средствами.

Современные программные системы немыслимы без удаленного доступа. Трудно себе представить ответственную систему, не имеющую в конечном счете выхода в Интернет. В табл. 9.2 схематично показаны этапы и перспективы развития мировых средств измерения и тестирования.

В настоящее время развивается направление по разработке виртуальных измерительных систем, широко использующих возможности современных компьютеров, компьютерной графики, перспективных методов и средств измерений, цифровой обработки информации и эффективных «plug & play» мультимедиа-технологий при создании программного и технологического обеспечения. Основные области применения таких систем следующие:

- экспериментальные научные измерения и исследования реализуются в виде универсальных (функционально ориентированных) приборов в виртуальном исполнении (осциллографы, анализаторы, генераторы, синтезаторы сигналов, мультиметры, вольтметры, частотомеры, мультиплексоры и др.) и специальных (проблемно-ориентированных) систем, применяемых в спектроскопии, акусто- и сверхпроводниковой электронике, в поляризован-

Instrument hardware	I/O hardware Interface	I/O software Interface	Drivers and/ of Instrument Commands	Application API
 GPIB	GPIB	HP - GPIB NI - GPIB other GPIB	CIIL R2D2	HP BASIC C LabVIEW
 VXI B-C-D-size	GPIB MXI Embedded	HP - GPIB NI - GPIB other GPIB  HP - VXI NI - VXI MXI Embedded Computer	R2D2 SCPI	Visual BASIC C Visual C++ LabVIEW Lab-Windows/ CVI HP VEE
 VXI C-size	GPIB MXI-2 FireWire Embedded	All above trend to VISA	2D2 SCPI VXI plug & play drivers	Visual BASIC C Visual C++ LabVIEW Lab- Windows/ CVI
 VXI PXI	GPIB MXI-2 FireWire Embedded	VISA	R2D2 SCPI+COM IVI Class Drivers +IVI Instrument drivers	Visual BASIC C Visual C++ LabVIEW Lab- Windows/ CVI HP VEE



ных исследованиях оптических светодиодов, изучении распространения электромагнитного излучения в газах и атмосфере, дистанционном зондировании Земли и планет и др.;

- разработка семейства новых универсальных компьютерных приборов, синтезированных программным путем, среди которых можно выделить приборы с блоком оценки и представления точности характеристик прибора и измерений;

- виртуальные системы учебного назначения: практикумы и тренажеры, электронные каталоги и инструкции к серийно выпускаемым приборам, построенные на адекватных моделях устройств.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение виртуальному информационно-измерительному прибору.

2. Что явилось причиной появления виртуальных информационно-измерительных приборов и систем?

3. Что такое измерительное программирование?

4. Перечислите уровни современного программирования.

5. Перечислите возможности метасистемного уровня.

6. Перечислите возможности системного уровня.

7. Перечислите возможности уровня рабочих процедур.

8. Перечислите возможности программы LabVIEW.

9. Перечислите возможности программы IVI.

10. Перечислите области применения виртуальных измерительных систем.

# ГЛАВА 10

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

### 10.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Система** — множество взаимосвязанных элементов, каждый из которых связан прямо или косвенно с каждым другим элементом, а два любых подмножества не могут быть независимыми, не нарушая целостность, единство системы.

**Информация** (в широком смысле) — сведения об объекте, которые получены в результате взаимодействия с ним. Информация передается при помощи сигналов, отображающих характеристики объекта.

**Информационная среда** — системно организованная совокупность средств передачи данных, информационных ресурсов, протоколов взаимодействия, аппаратно-программного и организационно-методического обеспечения, ориентированная на удовлетворение потребностей пользователей в информационных услугах и ресурсах.

**Измерительная информационная система (ИИС)** — совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки с целью представления потребителю (в том числе ввода в АСУ) в требуемом виде либо автоматического осуществления логических функций измерения, контроля, диагностирования, идентификации (распознавание образцов).

**Вход** — часть ИИС или входящего в него устройства, блока, звена, на которую непосредственно подается воздействие извне (по отношению к данному устройству, блоку, звену).

**Выход** — часть ИИС или входящего в него устройства, блока, звена, которая в соответствии с алгоритмом функционирования непосредственно воздействует на последующее устройство.

**Сигнал** — обусловленное (заранее договоренное) состояние или изменение состояния представляющего параметра, отображающее информацию, которая содержится в воздействии.

**Примечание.** Обычно сигнал выражается некоторой математической функцией, однозначно отображающей изменения во времени, представляющего параметр.

**Непрерывный сигнал** — сигнал, описываемый непрерывной функцией времени.

**Дискретный сигнал** — сигнал, описываемый дискретной функцией времени.

**Комплекс технических средств** — совокупность вычислительных и управляющих устройств, средств преобразования, отображения и регистрация сигналов, устройств передачи и обработки сигналов и данных, исполнительных устройств, достаточная для выполнения всех функций ИИС.

**Техническое обеспечение** — комплекс технических средств, предназначенных для обеспечения работы измерительной информационной системы.

**Информационное обеспечение** — совокупность системы классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации, сигналов, характеризующих состояние объекта, массивов данных и документов, необходимых для выполнения всех функций ИИС.

**Математическое обеспечение** — совокупность методов, математических моделей и алгоритмов, необходимых для выполнения функций ИИС, представляемых в заданной форме.

**Программное обеспечение** — совокупность программ, обеспечивающая реализацию функций системы измерений и контроля процессом или измерительным экспериментом, заданное функционирование комплекса технических средств ИИС и предлагаемое развитие системы.

**Общее программное обеспечение** — часть программного обеспечения ИИС технологического процесса, представляющая собой совокупность программ, поставляемых в комплекте со средствами вычислительной техники.

**Примечание.** К общему программному обеспечению относятся программы для автоматизации разработки программ, компоновки программного обеспечения, организации функционирования вычислительного комплекса и другие служебные и стандартные программы.

**Специальное программное обеспечение** — часть программного обеспечения, представляющая собой совокупность программ, разрабатываемых при создании системы, и включающая программы реализации ее функций.

**Примечание.** Специальное программное обеспечение ИИС разрабатывается на базе и с использованием программ общего программного обеспечения.

**Организационное обеспечение** — совокупность описаний функциональной, технической и организационной структур, инструкций и регламентов для оперативного персонала, обеспечивающая заданное функционирование.

**Оперативный персонал** — операторы, осуществляющие управление измерительным экспериментом в составе ИИС, и эксплуатационный персонал.

**Примечание.** К эксплуатационному персоналу относятся инженеры, сменные дежурные операторы и другие, обеспечивающие правильность функционирования комплекса технических средств. Ремонтный персонал ИИС в оперативный персонал не входит.

**Совместимость ИИС** — возможность взаимосвязанного функционирования ИИС разных уровней и различного функционального назначения.

**Надежность ИИС** — способность системы выполнять функции, сохраняя эксплуатационные показатели в установленных пределах в течение интервала времени при заданных условиях эксплуатации.

**Примечание.** Надежность ИИС характеризуется показателями безотказности, ремонтпригодности и долговечности.

**Устройство связи с объектом** — совокупность устройств получения и преобразования сигналов измерения и контроля, коммутации каналов передачи сигналов и исполнительных устройств.

**Измерительная система** — ИИС, предназначенная для функций измерения и хранения информации. Измерительная система устанавливает соответствие между измеряемой величиной и мерой. Под мерой понимают средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Например, мерой является резистор, воспроизводящий сопротивление определенного размера с известной погрешностью.

**Система автоматического контроля** — система, устанавливающая соответствие между состоянием объекта контроля и заданными нормами.

**Норма** — установленные пределы допустимого изменения параметра, заданные обычно с помощью аналоговых или цифровых установок — нижний предел (НП) и верхний предел (ВП):  $220 \pm 10 \dots 15 \text{ В}$ .

**Системы технической диагностики** — системы автоконтроля, в которых устанавливается не только факт работоспособности, но и определяется место нахождения отказа, а также осуществляется локализация неисправностей. Это достигается специальными методами и способами поиска неисправностей, реализующимися алгоритмами диагностики.

**Алгоритм диагностики** — совокупность предписаний, ведущих к правильному выполнению технического процесса в каком-либо устройстве или совокупности устройств (системе).

**Система распознавания образов** — система для автоматического распознавания печатных, рукописных и фотографированных знаков, текстов, рисунков и схем, для распознавания звуков и речи, команд, передаваемых голосом, для выявления некоторых ситуаций в сложных технических комплексах, таких как критическое или аварийное состояние и т.д.

**Система телеизмерения** — совокупность технических средств на приемных и передающих сторонах и каналах связи для автоматического измерения одного или ряда параметров на расстоянии.

**Канал связи** — совокупность линий связи и технических устройств на передающей и приемной частях системы.

**Виртуальный информационно-измерительный прибор** или **система** — это компьютер, оснащенный набором аппаратных и программных средств, выполняющий функции информационно-измерительного прибора или системы, максимально приближенный к решению задачи.

**Примечание.** В научных исследованиях, диагностических, статистических, интеллектуальных системах компьютеры используются для решения задач управления измерительными экспериментами, сбора, регистрации, обработки и систематизации данных, представления и хранения результатов наблюдений. При этом часть функций и операций осуществляется не аппаратно, а программно с помощью персонального компьютера. Аппаратная информационно-измерительная часть приборов и систем реализуется в конструктиве стандартной платы и автономного модуля компьютера.

**Интеллектуальные измерительные системы** — системы, выполняющие функции измерения и контроля в реальном масштабе времени одновременно множества экспериментальных величин.

**Примечание.** Модульная конструкция позволяет осуществлять относительное расширение существующей системы путем введения дополнительных модулей и, наконец, превращение ее в систему средств супервизорного или цифрового управления измерительным экспериментом путем включения в нее ПЭВМ.

**Математическое ожидание** — среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины.

**Дисперсия** — параметр, характеризующий степень рассеивания случайных точек вокруг математического ожидания.

**Среднеквадратичное отклонение** (стандарт) — корень квадратный из дисперсии.

**Корреляционная функция случайной функции  $x(t)$**  — неслучайная функция  $K_x(t_1, t_2)$  двух независимых аргументов  $t_1$  и  $t_2$ , значение которой при каждой паре фиксированных значений аргументов равно корреляционному моменту сочетаний, соответствующих этим же фиксированным значениям аргументов.

**Спектральная плотность** — функция, описывающая распределение дисперсии стационарной случайной функции по непрерывно изменяющейся частоте.

**Примечание.** Спектральной плотностью стационарного процесса  $X\{t\}$  называют функцию  $S_x$ , связанную с корреляционной функцией  $K_x(\tau)$  взаимным обратным преобразованием Фурье.

### **Стадии проектирования ИИС:**

предпроектные — техническое обоснование (ТЭО), техническое задание (ТЗ);

проектные — техническое предложение (ТП), эскизный проект (ЭП), технический проект (ТП), рабочая документация (РД);

стадии реализации — ввод в действие, анализ функционирования, внедрение.

**Метрологическое обеспечение** — комплекс технических средств и программного обеспечения установления и применения научных основ, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

## 10.2. РОЛЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

**Информационным** называется процесс, возникающий при установлении связи между источником и ее приемником. К основным процессам при этом относятся: обнаружение и счет; измерение и контроль; сбор и распределение; распознавание и диагностика; передача и хранение; обобщение и отображение.

Информационные процессы занимают значительное место в общественной жизни человека. Во-первых, это повышение эффективности как в материальном производстве, так и в непроизводственной сфере; во-вторых, удовлетворение материальных и духовных потребностей, а также всестороннее развитие человека путем их использования как в быту, так и для улучшения условий труда, отдыха, укрепления здоровья, улучшения окружающей среды; в-третьих, обогащение духовной жизни.

Информатизировать общество — это значит:

создать правовые, экономические, технологические, социальные и профессионально-образовательные условия для того, чтобы любая (кроме законом определенных тайн и секретов) информация была доступна в любое время в любой точке любому потенциальному пользователю;

создать технологические условия, аппаратные и программные средства, телекоммуникационные системы, обеспечивающие доступность информации;

обеспечить индустриально-технологическую базу для производства в рамках международного разделения труда конкурентоспо-

собных информационных технологий; обеспечить первоочередное развитие структур, институтов и механизмов, прежде всего в науке и образовании;

реализовать принцип фундаментального внедрения информации и информационных технологий в сферу производства, управления, культуры, науки, образования, транспорта и энергетики и др.

Когда в конце 1960-х годов в Японии в основном закончился период послевоенного восстановления и промышленной реконструкции, перед страной встал вопрос о выборе ее исторической перспективы.

Существовали две реальные альтернативы: 1) развитие индустрии, благосостояния, строительство комфортных дорог, жилья и т.д.; 2) развитие наукоемких и информационных технологий, информатизация общества, включающая автоматизацию и роботизацию общества. Япония выбрала второй путь и спустя четверть века оказалась наиболее процветающей страной мира. Японский опыт в той или иной модификации был учтен при выработке информационной политики во Франции (конец 1970-х годов), Великобритании (начало 1980-х годов), ФРГ (конец 1980-х годов) и т.д. Но ни одна из этих стран прямо не копировала японский опыт и японскую идеологию, так как каждая исходила из своих интересов, возможностей, ресурсов, традиций, экономических и политических целей. Россия не выйдет из охватившего ее кризиса, если не выберет сценарий, основанный на учете своих географических и исторических особенностей, национальных традиций и не выработает измерительной информационной и компьютерной техники.

### 10.3. ВИДЫ И СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В зависимости от выполняемых функций ИИС реализуются в виде систем: измерительных (ИС); автоматического контроля (САК); технической диагностики (СТД); распознавания образов (идентификации) (СРО); телеизмерительных систем (ТИС).

В зависимости от способа организации передачи информации между функциональными блоками (узлами) (ФБ) различают цепочечную, радиальную и магистральную структуры ИИС. В СТД, САК, СРО измерительная система входит как подсистема.

Любая измерительная информационная система с необходимыми функциональными возможностями, технические и другие характеристики в решающей степени определяются объектом исследования, для которого данная система создается.

Назначение измерительной информационной системы можно определить как целенаправленное оптимальное ведение измерительного процесса и обеспечение смежных систем высшего уровня достоверной информации. Исходя из этого основные функции измерительной информационной системы таковы: получение измерительной информации от объекта исследования, ее обработка, передача, представление информации оператору и (или) ЭВМ. запоминание, отображение и формирование управляющих воздействий.

Степень достижения функций принято характеризовать с помощью критериев измерения. Измерительные информационные системы оптимизируют по многим частичным критериям, таким как точность, помехоустойчивость, надежность, пропускная способность, адаптивность, сложность, экономичность и др.

#### 10.4. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Состав и структура конкретной ИИС определяется общими техническими требованиями, установленными ГОСТом, и частными требованиями, содержащимися в техническом задании на ее создание.

Измерительная информационная система должна управлять измерительным процессом или экспериментом в соответствии с принятым критерием функционирования; выполнять возложенные на нее функции в соответствии с назначением и целью; обладать требуемыми показателями и характеристиками точности, надежности и быстродействия; отвечать экономическим требованиям, предъявляемым к способам и форме представления информации, размещения технических средств; быть приспособленной к функционированию с измерительными информационными системами смежных уровней иерархии и другими ИИС и ИВК, т. е. обладать свойствами технической, информационной и метрологической совместимости; допускать возможность дальнейшей модернизации и развития и др.

Упрощенная схема взаимодействия основных компонентов измерительной информационной системы представлена на рис. 10.1.

Процессом функционирования ИИС (как и любой другой технической системы) является целенаправленное преобразование входной информации в выходную. Это преобразование выполняется либо автоматически комплексом технических средств (КТС) (техническим обеспечением), либо совместно-оперативным персоналом и КТС в сложных ИИС, ИВК, измерительно-управляющих системах (ИИУС). Чтобы люди и комплекс технических средств могли функционировать оптимально, необходимы



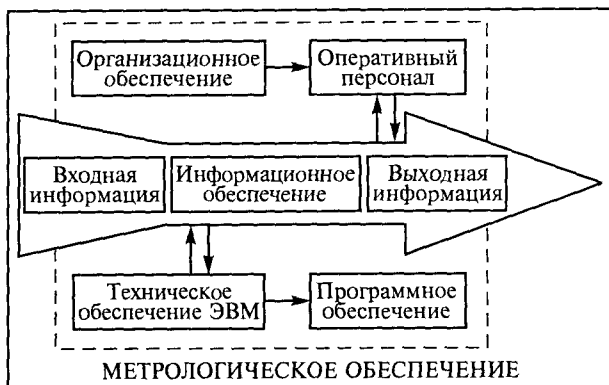


Рис. 10.1. Основные компоненты измерительных информационных систем соответствующие инструкции и правила. Эту задачу выполняет организационное обеспечение.

Математическое, программное и информационное обеспечение входит в состав только ИИС, ИВК и ИИУС с цифровым вычислительным комплексом.

- Математическое обеспечение — это модели и вычислительные алгоритмы.

- Программное обеспечение гарантирует конкретную реализацию вычислительных алгоритмов и алгоритмов функционирования системы, охватывает круг решений, связанных с разработкой и эксплуатацией программ.

- Информационное обеспечение определяет способы и конкретные формы информационного отображения состояния объекта исследования в виде документов, диаграмм, графиков, сигналов для их представления обслуживающему персоналу и ЭВМ для дальнейшего использования в управлении.

Всю систему в целом охватывает метрологическое обеспечение. Технические средства ИИС состоят из следующих блоков:

- 1) множества первичных измерительных преобразователей (датчиков);
- 2) множества вторичных измерительных преобразователей;
- 3) множества элементов сравнения — мер;
- 4) блока цифровых устройств;
- 5) множества элементов описания — норм;
- 6) множества преобразователей сигнала, средств отображения, памяти и др.

Блоки 1—6 используют в цифровых ИС; блоки 1, 2, 3 и 6 — в аналоговых ИС.

При наличии в составе ИИС ЭВМ информация к ЭВМ может поступать непосредственно от устройств обработки и (или) хранения.

## 10.5. ПОКОЛЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В развитии измерительных информационных систем можно отметить ряд поколений.

*Первое поколение* — формирование концепции ИИС: системная организация совместной автоматической работы средств получения, обработки и передачи количественной информации. Системы первого поколения — это системы в основном централизованного циклического получения измерительной информации с элементами вычислительной техники на базе дискретной полупроводниковой техники. Данный этап (конец 1950-х — начало 1960-х годов) принято называть периодом детерминизма, так как для анализа в ИИС использовался хорошо разработанный аппарат аналитической математики.

Второе поколение (1970-е годы) — использование адресного сбора информации, обработка информации с помощью встроенных ЭВМ. Элементную базу представляют микроэлектронные схемы малой и средней степени интеграции. Этот период характерен решением ряда вопросов теории систем в рамках теории случайных процессов и математической статистики, поэтому его принято называть *периодом стохастичности*.

*Третье поколение* характеризуется широким введением в ИИС больших интегральных схем (БИС), микропроцессоров и микропроцессорных наборов, микроЭВМ и промышленных функциональных блоков, совместимых между собой по информационным, метрологическим, энергетическим и конструктивным характеристикам, а также созданием распределенных ИИС. Этот период характерен тем, что появились адаптивные ИИС.

*Четвертое поколение* — появление гибких перестраиваемых программируемых ИИС в связи с развитием системотехники и вычислительной техники. В элементной базе резко возрастает доля интегральных схем большой и сверхбольшой степени интеграции.

*Пятое поколение* набирает силу и входит в жизнь народного хозяйства — это интеллектуальные и виртуальные ИИС, построенные на базе ПЭВМ, а также современного математического и программного обеспечения.

## 10.6. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Поскольку области применения ИИС весьма обширны (промышленное и сельскохозяйственное производство, медицина и

космос, искусство и научный эксперимент, АСУТП и АСУ, связь и вычислительные системы), математические модели объектов чрезвычайно разнообразны. Однако методы математического моделирования позволяют одинаковыми формулами представлять различные по своей природе объекты и использовать для исследования и решения задач оптимизации и синтеза ИИС электронно-вычислительные машины и ПЭВМ.

*Математическая модель объекта измерения* включает описание взаимодействия между переменными входа и выхода для установившегося и переходного состояний, т.е. модели статики и динамики, граничные условия и допустимое изменение переменных процесса.

Если переменные объекта изменяются только во времени, то модели, описывающие свойства таких объектов, называются *моделями с сосредоточенными параметрами*. Модели объектов исследований, переменные которых изменяются как во времени, так и в пространстве, называются *моделями с распределенными параметрами*.

Форма записи математической модели может быть различна: алгебраические и трансцендентные уравнения, дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных. Могут использоваться переходные и передаточные функции, частотные и спектральные характеристики и др.

Различают три основных метода получения математических моделей объектов исследования:

- аналитический;
- экспериментальный;
- экспериментально-аналитический.

В последние годы при создании ИИС широко используется математическое моделирование, реализующее цепочку: «объект — модель — вычислительный алгоритм — программа для ПЭВМ — расчет на ПЭВМ — анализ результатов расчета — управление объектом исследования».

Ядро вычислительного эксперимента: модель — алгоритм — программа калибрует и формирует оптимальную модель объекта исследования.

Алгоритм измерения может быть представлен словесно, аналитически, графически или сочетанием этих методов.

Последовательность действий не произвольна, а реализует тот или иной метод решения задачи. Во всех случаях она должна быть настолько точно сформулирована, чтобы не осталось места для различных толкований и двусмысленностей.

Так, Э. И. Цветков оценку измеряемой величины представляет выражением

$$\lambda^* = R_v[P(\lambda), \lambda_0],$$

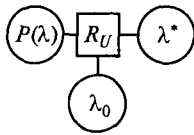


Рис. 10.2. К-сеть процедуры измерения величины

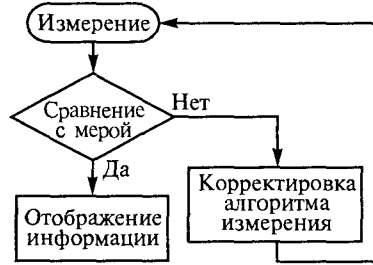


Рис. 10.3. Схема алгоритма измерения

где  $P$  — оператор, представляющий алгоритм измерений;  $P(\lambda)$  — сигнал, несущий информацию измеряемой величины о значении измеряемой величины;  $\lambda_0$  — мера, образцовая величина, лежащая в основе операции сравнения.

Графически этот процесс представлен на рис. 10.2.

Тот же процесс М. П. Цапенко [39] предлагает записать в форме содержательных логических схем алгоритмов (СЛСА), которая отражает параллельную работу самостоятельных измерительных каналов:

$$\langle I_1 \rangle = : I_1(x_{01}/x_{11}) \quad I_1(x_{11}/x_{21}) \quad I_1(x_{21}/z_1) // \dots // \langle I_i \rangle.$$

Наиболее простой и распространенной формой алгоритмической структуры является схема, приведенная на рис. 10.3.

## 10.7. РАЗНОВИДНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Измерительные информационные системы, предназначенные для измерения и хранения информации, называются *измерительными системами* (ИС).

Измерительные системы могут быть ближнего или дальнего действия. На вход системы поступает множество изменяющихся во времени и (или) распределенных в пространстве величин  $\{x_i(t, s)\}_i^n$ . Упрощенная классификация измерительных систем представлена на рис. 10.4.

Наиболее распространены системы для прямых измерений. Обобщенная структура ИС представлена на рис. 10.5. Для всех ИС основными элементами являются первичные преобразователи  $\{D\}$ , элементы сравнения  $\{C\}$ , меры  $\{M\}$  и элементы отображения информации  $\{B\}$ . Для совместных и совокупных измерений часто используются многомерные и аппроксимирующие системы.

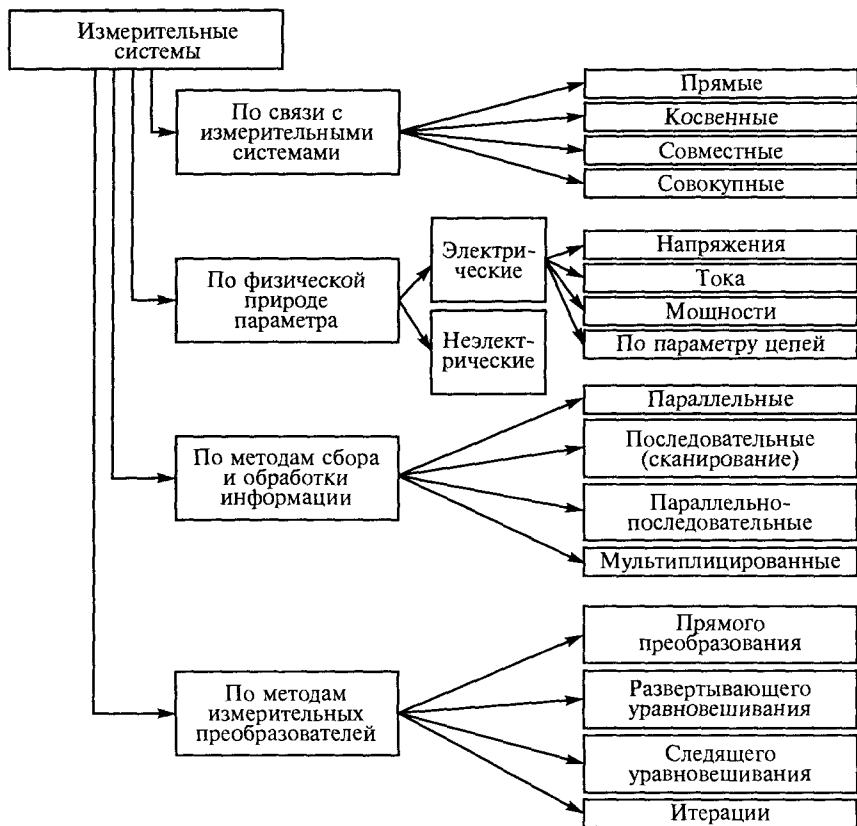


Рис. 10.4. Упрощенная классификация измерительных систем

**Характеристики измерительных систем.** Важнейшими характеристиками ИС являются эффективность, полнота выполняемых функций, достоверность, надежность, быстродействие, характеристики входов и выходов, метрологические характеристики.

**Эффективность.** Под *эффективностью* понимается улучшение работы объекта при использовании системы. Ограничимся рассмотрением экономической эффективности систем, представляющих наибольший интерес для народного хозяйства. Приращение экономической эффективности можно выразить формулой

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2,$$

где  $\mathcal{E}_1$  — экономический эффект от объекта в заданный промежуток времени без ИС;  $\mathcal{E}_2$  — экономический эффект от объекта в тот же заданный промежуток времени с применением ИС.

Экономический эффект целесообразно рассчитывать по общепризнанному критерию полных затрат.

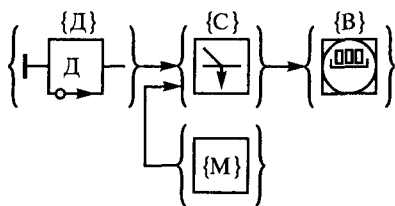


Рис.10.5. Обобщенная структура измерительной системы для прямых измерений

Для сравнения различных измерительных систем удобнее использовать нормированный показатель эффективности, называемый *коэффициентом эффективности*:

$$\eta = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_n - \mathcal{E}_1},$$

где  $\mathcal{E}_n$  — экономический эффект от объекта при использовании идеальной измерительной системы, выполняющей идеально все функции и при отсутствии на это затрат.

где  $\mathcal{E}_n$  — экономический эффект от объекта при использовании

коэффициент эффективности изменяется в пределах  $0 < \eta < 1$ , который определяется и уточняется на нескольких этапах проектирования и эксплуатации системы. На этапах проектирования (ТЭО, ТЗ, ТП, РД) производится предварительная оценка по ожидаемым данным, которая уточняется после ввода ИИС в эксплуатацию.

Полнота (глубина) выполняемых функций. Она показывает, какая часть контролируемого или управляемого объекта охвачена измерительной системой.

Коэффициент, характеризующий полноту:

$$P = N_k / N,$$

где  $N$  — общее число параметров объекта (например, контроля, измерения, управления);  $N_k$  — число параметров объекта, охваченных ИС.

Во многих случаях целесообразно использовать информационный критерий полноты:

$$\Pi = \frac{I_c}{I_o} \Pi = \frac{I_c}{I_o},$$

где  $I_c$  — количество информации о состоянии объекта в параметрах, охваченных системой;  $I_o$  — общее количество информации о состоянии объекта во всех параметрах контроля, измерения и управления.

При этом все параметры объекта принимаются равнозначными, что существенно упрощает задачу за счет несовершенства отображающей ее модели. Тем не менее для ориентировочной предварительной оценки такой подход допустим, отражает степень доверия к информации в системе.

Д о с т о в е р н о с т ь. Достоверность относится к обобщенным характеристикам. Требования, предъявляемые к этому показателю, являются исходными для обоснования частных характеристик системы. Наиболее существенный фактор достоверности — точность

измерения контролируемых параметров, глубина контроля, надежность и помехоустойчивость работы всех устройств. С уменьшением достоверности возрастает вероятность неработоспособного состояния объекта контроля, измерения, управления при информации в системе в пределах допусков.

Характерный пример низкой достоверности — работа с низкой помехоустойчивостью в условиях помех. Аналогичная ситуация возникает при неудовлетворительной надежности системы или при недопустимо малой точности измерений. Универсальный критерий для определения достоверности различных измерительных систем еще не разработан, поэтому ограничимся методикой определения достоверности в отдельно рассматриваемой системе.

**Надежность.** Критерий надежности и его числовые характеристики выбираются с учетом особенностей назначения ИС и характера решаемых задач. К основным критериям надежности систем относятся:

- средняя наработка на отказ  $\bar{t}$ ;
- среднее время восстановления  $\bar{t}_в$ ;
- средняя наработка до отказа  $\bar{t}_о$ ;
- интенсивность отказов  $\lambda$ ;
- вероятность безотказной работы системы  $P(t)$  в течение заданного времени  $t$  (вероятность восстановления  $F(t_в)$ );
- вероятность завершения проверки объекта или группы объектов (вероятность восстановления)  $F(t_в)$  в течение заданного времени;
- коэффициент готовности системы  $K_г$ .

Для стационарных измерительных систем в народном хозяйстве широко используют критерии  $\bar{t}_о$ ,  $\bar{t}_в$  и частично  $K_г$ .

С целью уменьшения влияния ненадежности на работоспособность системы используют два основных метода самоконтроля в измерительной системе: программный и схемный аппараты.

*Программный метод* основан на использовании заранее отработанных испытанных программ (тестов). Такой самоконтроль в основном позволяет проверить устройства системы, производящие обработку информации.

*Схемный метод* (самоконтроль) требует дополнительного оборудования (аппаратуры) для проверки системы. Одной из разновидностей схемного самоконтроля является применение кодов с обнаружением и исправлением ошибок. Методы самоконтроля требуют временной информационной или аппаратурной избыточности.

**Быстродействие.** Быстродействие характеризуется средним временем выполнения операций (измерения, контроля, управления, диагностики, поиска и т.п.). Для циклических систем быстродействие характеризуется временем цикла  $t_{ц}$ . Во многих случа-

ях при определении быстродействия необходимо учитывать среднее время выполнения вспомогательных операций  $t_{всп}$ , к которым относится включение источников питания разогрева аппаратуры, подключение кабелей и т. п. В таких случаях быстродействие, например системы измерения, определяется выражением

$$t_r = t_{всп} + t_{осн} + t_{0н},$$

где  $t_{осн}$  — среднее время самого контроля и поиска неисправностей,  $t_{0н}$  — среднее время считывания или записи и анализа результатов.

Быстродействие в ряде случаев удобно характеризовать информационным критерием — количеством информации, перерабатываемой в единицу времени. Для систем контроля и измерения быстродействие

$$B_1 = \frac{\sum_{i=1}^x (H_{0i} - H_i)}{t_{k0} + t_{п.н}},$$

где  $H_{0i}$  — энтропия  $i$ -го параметра до начала контроля;  $H_i$  — энтропия  $i$ -го параметра после контроля;  $t_{k0}$  — время измерения определяющих параметров;  $t_{п.н}$  — время поиска неисправностей.

В расчетах используется критерий Шеннона, учитывающий количество информации и возможности ее статистического кодирования. Однако при расчете быстродействия во многих случаях целесообразно использовать критерий Хартли, учитывающий только физические возможности системы. Тогда быстродействие эквивалентной информационной емкости определяется по формуле

$$B_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \log m}{t_{k0} - t_{п.н}},$$

где  $m$  — число различных состояний, например число уровней квантования в дискретной системе.

Характеристики входов и выходов системы. Они включают в себя перечень и данные входов системы, а также характеристики устройств отображения информации. К последним относятся данные диспетчерского щита и пульта, данные дисплеев и других средств отображения информации.

Характеристики технических средств. Эти характеристики включают в себя данные элементной базы (типы и серии микросхем и других элементов), типы готовых блоков, устройств и вспомогательного оборудования, включая источники питания, а также условия эксплуатации системы.



**Многоканальный ИС параллельного действия.** Это один из наиболее распространенных видов ИИС, обладающих наиболее высокой надежностью, более высоким быстродействием при одновременном получении информации, возможностью подбора средств измерений к измеряемым величинам, что может исключить унификацию сигналов. Однако они имеют повышенные сложность и стоимость (рис. 10.6).

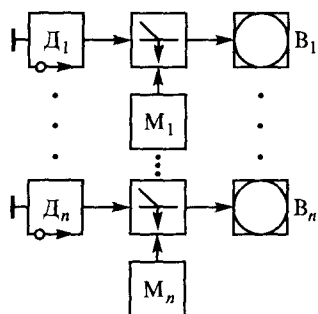


Рис. 10.6. Структурная схема многоканальной измерительной системы

**Мультиплицированные (с общей образцовой величиной) ИС** (рис. 10.7). Системы предложены Ф. Е. Темниковым.

Их еще называют системами с развертывающим уравниванием. Системы имеют меньшее число элементов, чем параллельные ИС, но несколько меньшее быстродействие. В этих системах измерительная величина сравнивается с линейно изменяющейся величиной. При фиксированных моментах начала развертки и равенстве  $x$  и  $x_k$  может быть определен интервал времени  $t_x$ , пропорциональный значению  $x_k$ . В многоканальной системе возникают трудности в разделении сигналов от элементов сравнения. В этом случае прибегают к специальным мерам.

**Сканирующие (последовательного действия) ИС.** С помощью одного канала они выполняют последовательно измерения множества величин и имеют сканирующее устройство (СкУ), которое перемещает датчик в пространстве (рис. 10.8).

При пассивном сканировании траектория движения может быть запрограммирована, при активном сканировании может изменяться в зависимости от получаемой измерительной информации.

Сканирующие системы применяются для измерения температурных полей, нахождения экстремальных значений исследуемых

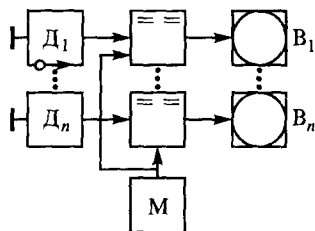


Рис. 10.7. Структурная схема мультиплицированной системы

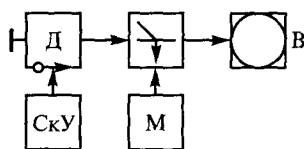


Рис. 10.8. Структурная схема сканирующей измерительной системы

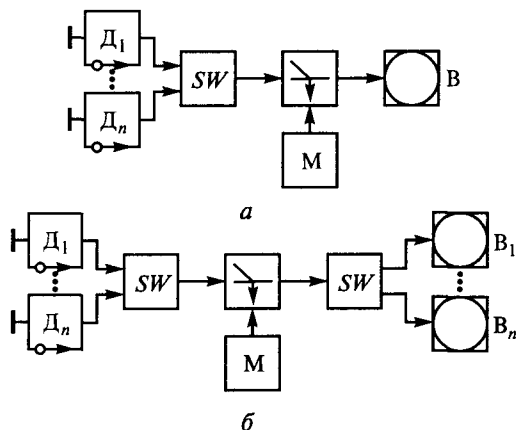


Рис. 10.9. Структурная схема многоточечной измерительной системы:  
 а — с одним коммутатором, б — с двумя коммутаторами

полей (давлений, механических напряжений и т.д.) или нахождения одинаковых значений параметра. Недостаток систем — малое быстродействие.

#### Многоточечные (последовательно-параллельного действия) ИС.

Их применяют в сложных объектах с большим числом измеряемых параметров (рис. 10.9). В этих системах при множестве датчиков  $\{D_i\}_i^n$  имеется всего один измерительный тракт (см. рис. 10.9, а) и измерительный коммутатор  $SW$  либо множество датчиков  $\{D_i\}_i^n$  и множество индикаторов  $\{B_i\}_i^n$  (см. рис. 10.9, б).

Измерительные коммутаторы служат для согласования параллельных и последовательных элементов во времени. Они должны обладать определенными метрологическими характеристиками (погрешностью, быстродействием и др.). Лучшие по точности результаты дают контактные измерительные коммутаторы ( $10^{-5} \dots 10^{-6}$ ), но они имеют низкое быстродействие, малое количество коммутируемых цепей и не работают по заявкам. Бесконтактные измерительные коммутаторы имеют более низкую точность (погрешность составляет  $10^{-3} \dots 10^{-4}$ ), но остальные показатели у них значительно лучше.

Недостаток систем — пониженное быстродействие и точность за счет использования ключей коммутаторов.

**Многомерные ИС.** Эти системы основаны на одновременном измерении различных свойств среды, зависящих от ее состава, с последующей математической обработкой результатов измерения. Измеряемыми могут быть, например, электропроводность и плотность, температура кипения и показатель преломления или удельный вес и т.д. Во всех случаях независимо от характера выполняемого расчета возможность измерения связана с возможностью составления системы независимых уравнений:

$$X_1 = f_1(C_1, C_2, C_3, \dots, Q_i \dots C_k);$$

$$\begin{aligned} X_i &= f_i(C_1, C_2, C_3, \dots, Q_i \dots C_k); \\ X_{k-1} &= f_{k-1}(C_1, C_2, C_3, \dots, Q_i \dots C_k); \\ I &= C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i + \dots + C_k, \end{aligned}$$

где  $X_1, \dots, X_i, \dots, X_{k-1}$  — измеряемые параметры анализируемой среды,  $C_1, C_2, C_3, \dots, Q_i, \dots, C_k$  — концентрации компонентов анализируемой среды,  $f_1, \dots, f_i, \dots, f_{k-1}$  — функции, выражающие характер зависимости измеряемых параметров от состава среды.

Выполнение функциональной независимости уравнений системы обеспечивает принципиальную возможность ее решения, т. е. нахождения нужного  $C_k$ . Данные системы обеспечивают, таким образом, избирательное определение величин интересующего нас компонента в многокомпонентной среде путем применения недостаточно избирательных измерительных средств.

**Аппроксимирующие измерительные системы (АИС).** Их применяют с целью количественной оценки или восстановления исходной величины, являющейся функцией некоторого аргумента. Есть два пути выполнения этих измерений: 1) измерение дискретной величины и восстановление ее путем аппроксимации с помощью многочленов; 2) измерение коэффициентов многочленов, аппроксимирующих исходную функцию на всем интервале ее исследования.

Основные области применения АИС — это измерение статистических характеристик случайных процессов, характеристик нелинейных элементов, сжатие, фильтрация, генерация сигналов заданной формы.

## 10.8. ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

**Система телеизмерения** — совокупность устройств на приемных и передающих сторонах и каналах связи для автоматического

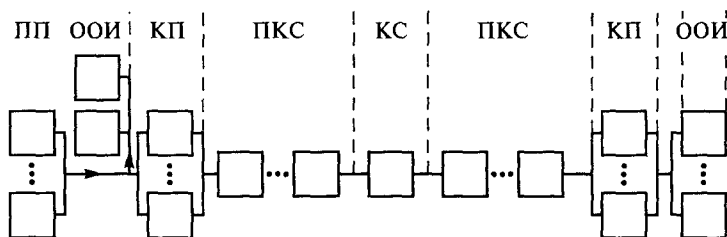


Рис. 10.10. Структурная схема системы телеизмерения

измерения одного или ряда параметров на расстоянии. Структурная схема представлена на рис. 10.10.

**Особенности построения.** Можно указать следующие основные способы построения:

- по виду модуляции — интенсивные (тока, напряжения), время-импульсные (ВИМ и ШИМ), частотные (ЧИМ и ЧМ), кодоимпульсные (двоичные и недвоичные) цифровые и адаптивные;

- виду телеизмеряемого параметра — аналоговые и цифровые;
- числу каналов связи — одноканальные и многоканальные;
- характеристике каналов связи — проводные, радиоканальные и волоконно-оптические;

- виду телеизмерения — непрерывные; по вызову; по выбору.

При этом могут производиться телеизмерения текущих, статистических и интегральных значений параметров.

Виды каналов: совмещенные каналы связи (КС) и линии связи (ЛС), симплексные КС; дуплексные (прямые и обратные) каналы связи (КС).

Установлены следующие классы точности устройств телеизмерений: 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0.

Сравнительная оценка систем телеизмерений ведется:

- по реально достижимой минимальной погрешности;
- помехоустойчивости;
- надежности системы;
- возможности работы с различными каналами связи;
- стоимости;
- возможности унификации и массового производства унифицированных устройств.

Лучшие системы — это системы кодоимпульсных телеизмерений.

**Поисковая система измерений.** Она предназначена для передачи на расстояние оперативно-технологической и производственно-статистической информации в системах измерения контроля и управления, а также в автоматизированных системах управления (АСУ) различных отраслей народного хозяйства территориально разобщенных объектов.

Система состоит из набора типовых функциональных узлов и блоков, выполненных в основном на интегральных микросхемах и построенных на их базе комплексах телемеханических устройств. Эти комплексы выполняют функции передачи и приема информации, а также простейшей ее обработки на пункте управления (ПУ) и контролируемом пункте (КП).

На контролируемых пунктах источниками информации являются разнообразные датчики измеряемых параметров, датчики состояния объектов, машинные носители информации (на перфоленте, перфокартах и т. п.), устройства ручного ввода информации, сама аппаратура КП и ЭВМ.

На пункте управления источниками информации могут быть пульт с ключами и другими элементами управления двухпозиционными и многопозиционными объектами, датчики установок автоматических регуляторов, машинные носители, ЭВМ и дисплеи.

Приемниками информации на ПУ являются различные приборы на щите и пульте диспетчера или оператора, ЭВМ, дисплей и машинные носители информации.

В поисковой системе телеизмерений приняты:

- система приоритетов для различных видов информации с соответствующим разделением во времени при ее передаче;
- система приоритетов для различных КП с соответствующим во времени их обслуживанием;
- адресно-групповой метод передачи информации, обладающий широкими возможностями выбирать и изменять различное число КП, объемы и виды прерываемой информации;
- спорадические методы передачи дискретной и непрерывной информации;
- обработка информации, осуществляемая как устройствами для обработки, так и ЭВМ с учетом специфических особенностей используемых каналов связи (КС);

- унификация сопряжения;
- унификация конструктивной базы;
- агрегатирование технических средств.

Перечисленные принципы построения системы позволяют:

- сопрягать блоки и устройства с устройствами других ветвей;
- разрабатывать различные устройства телемеханики из ограниченного набора функциональных блоков;
- увеличивать серийность производства и сокращать стоимость аппаратуры путем централизованного производства функциональных блоков с типовыми конструкциями;
- сокращать объем и сроки разработки, проектирования, а также упрощать эксплуатацию устройств телемеханики.

Функциональные блоки системы делятся на следующие группы: источники информации; приемники информации; приемники-источники.

Центрالی, блоки режима работы, выполняют функции управления и координации, позволяющие приемникам и источникам работать асинхронно.

Функциональные блоки подразделяются на инициативные и неинициативные. Инициативные блоки-источники формируют сигнал запроса связи и содержат узлы наличия информации. Блоки-источники могут работать в неинициативном режиме — по команде, поступающей на вход блока. К инициативным блокам относятся также блоки-приемники, формирующие сигнал запроса связи, например при обнаружении искажений в принятой информации. Кроме того, все функциональные блоки разделяются

по выполняемым функциям на следующие группы, размещаемые на КП и ПУ (см. рис. 10.10):

- первичные преобразователи ПП (см. гл. 6);
- преобразователи кодов и сигналов (ПКС) для передачи и приема информации;
- блоки управления передачей и приемом отдельных видов информации;
- блоки обработки и отображения информации (ООИ);
- блоки режима работы, определяющие алгоритм устройства (Ц-централи).

**Преобразователи кодов и сигналов.** К ним относятся модуляторы-демодуляторы для передачи и приема сигналов при работе по каналу связи, узлы тактовой синхронизации, блоки повышения достоверности, преобразователи последовательного кода в параллельный, устройства памяти.

Блоки управления передачей и приемом информации. Они включают в себя управление информацией: телеуправление (ТУ); телеинформацию статистическую (ТС); телеинформацию интегральную (ТИИ); телеинформацию текущую (ТИТ); производственно-статистическую текущую (ПСИ) и кодовые команды (КК); устройства сопряжения с ПЭВМ.

Блоки обработки и отображения информации. К ним относятся: преобразователи кодов, например в двоичный и двоично-десятичный; цифроаналоговые преобразователи, блоки масштабирования, сравнения кодов, цифровой индикации, управления цифровой регистрацией, управления фотосчитыванием; управления памятью, воспроизведения сигналов состояния объектов для мимического и светового табло.

Блок режима работы (централь). Блок координирует работу всех блоков, объединенных в устройство; реализует выбранную систему приоритетов; устанавливает связь между блоками по заданной программе; контролирует заданную дисциплину передачи информации по каналу связи; формирует сигналы общей неисправности, устройства и тактирующие сигналы для всех блоков.

Вспомогательные узлы. Это генераторы тактовых импульсов, распределители импульсов, усилители для выхода на реле и лампы накаливания и т. д. Предусмотрено и возможное расширение блоков системы. Генераторы тактовых импульсов рассчитаны на фиксированные скорости передачи информации по каналу связи (50, 100, 200, 300, 600 и 1200 бит/с).

На рис. 10.11 представлена структурная схема кодоимпульсной системы телеизмерений. В эту систему входят первичный преобразователь (ПП), линейный усилитель (ЛУ), узел выявления информации (ВИ), управляющее устройство (УУ), формирователь адреса (ФА), цифровой индикатор (ЦИ), формирователь кодовых сигналов (ФКС),

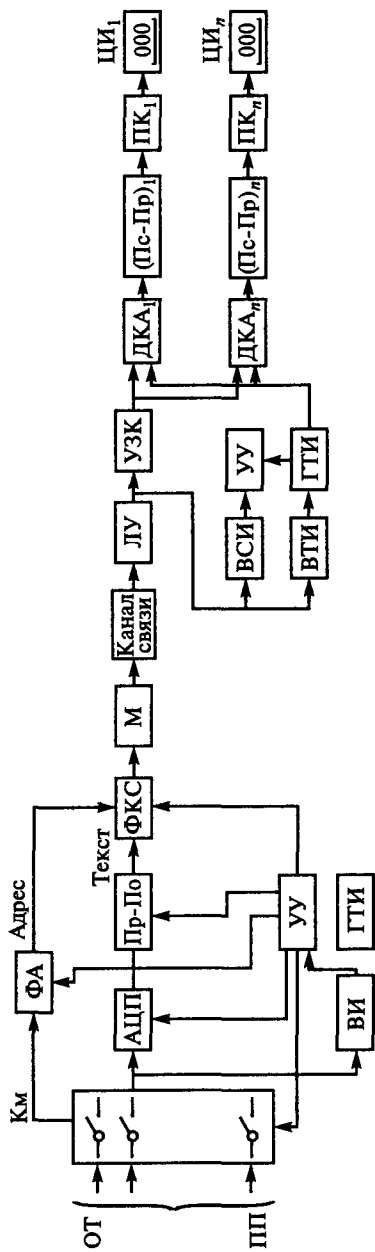


Рис. 10.11. Структурная схема передающего устройства многоканальной кодоимпульсной системы с временным и кодовым разделением каналов

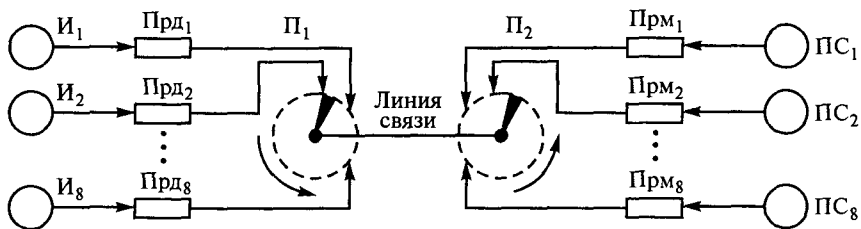


Рис. 10.12. Упрощенная схема 8-канальной системы с временным разделением сигналов

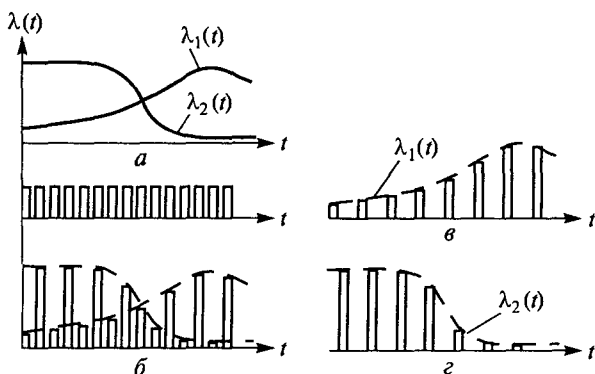


Рис. 10.13. Упрощенная схема (а) и временные диаграммы передачи сообщений многоканальной системы (б—г) с временным разделением сигналов

модулятор (М), выделитель тактовых импульсов (ВТИ), узел защиты кодов (УЗК), декодирующие узлы адреса (ДКА), преобразователь последовательного кода в параллельный (Пс-Пр), преобразователь кодов (ПК).

На рис. 10.12 и рис. 10.13, а — г представлены упрощенная схема и временные диаграммы, передачи сообщений.

Ввиду наглядности изображения читателю предоставляется возможность самостоятельно разобрать материал.

## 10.9. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ (АВТОКОНТРОЛЯ)

Автоконтроль устанавливает соответствие между состоянием объекта контроля и заданной нормой без непосредственного участия человека. Соответствие может устанавливаться для данного или для будущего состояния (прогнозирующий контроль).



Автоконтроль освобождает человека от утомительных рутинных операций в самых разнообразных сферах его деятельности: на транспорте, в сельском хозяйстве, при научных исследованиях, обучении и т. д. Необходимым условием осуществления автоконтроля в любом его применении является знание установленной нормы. Норма может быть выражена в количественной или качественной форме. В последнем случае нормой может быть, например, определенное качество усвоения материала при обучении. В дальнейшем ограничимся автоконтролем с нормой только в количественной форме.

**Функции систем автоконтроля.** При автоконтроле, в отличие от автоматических измерений, нет необходимости знать численные значения контролируемых величин, достаточно установить значения абсолютного или относительного допуска на отклонение от нормы (например, не больше чем на 5, 10, 20 % или на 10... 15 %).

Отклонение за пределы установленной нормы вызывают предупредительный, аварийный или другие сигналы. Формирование таких сигналов является одной из главных функций автоконтроля.

**Система автоконтроля** — это комплекс устройств, осуществляющих автоматический контроль одной или большого количества величин, требующих значительной обработки информации для суждения об отклонении от установленной нормы, например, обработка изделий в результате статистической обработки результатов контроля.

Промышленные системы автоконтроля различают в зависимости от того, что в них контролируется: сырье, готовая продукция, процесс производства или процесс эксплуатации.

В реальных системах устанавливаемое допустимое отклонение от нормы, например в процентах, во много раз больше погрешностей измерительных систем (5... 20 % вместо 0,2... 2,5 %), поэтому информационная емкость систем автоконтроля соответственно меньше, т.е. по сравнению с измерительными в них имеют место «сжатия» информации. Если же допустимое относительное отклонение от нормы равно погрешности измерений, «сжатия» информации нет.

В подавляющем большинстве случаев системы автоконтроля совмещают функции контроля и измерения, так как являются контрольно-измерительными системами. Они выполняют функции контроля, а в случае необходимости расширить информацию о контролируемом параметре осуществляют процесс измерения. Это необходимо учитывать при определении коэффициента «сжатия» информации.

**Структуры систем контроля.** Структурные схемы систем автоматического контроля большого количества величин приведены на рис. 10.14, а, б. Они похожи на схемы измерительных систем (см. рис. 10.9).

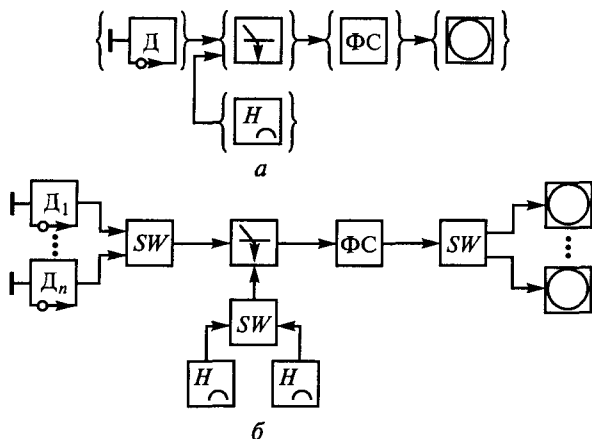


Рис. 10.14. Структурные схемы систем автоматического контроля с аналоговой нормой:

*a* — с одним коммутатором; *б* — с двумя коммутаторами

Здесь так же, как и на рис. 10.9, фигурные скобки обозначают наличие 1... *n* одинаковых узлов внутри скобок.

На рис. 10.14 *a, б* контролируемые величины в норме выражаются в аналоговой форме. В отличие от рассмотренных ранее систем (см. рис. 10.9) здесь на элемент сравнения подается не мера, а норма, кроме того, на выходе сравнивающего устройства включено устройство формирования сигналов ФС, формирующее сигнал отклонения от заданной нормы, который отражается и (или) записывается.

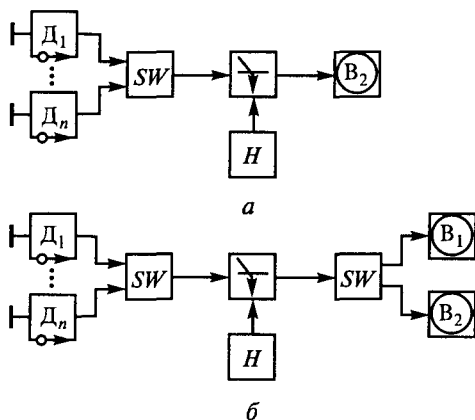


Рис. 10.15. Структурная схема многоточечной системы автоматического контроля:

*a* — с одним коммутатором; *б* — с двумя коммутаторами

Схема на рис. 10.15, *а* может быть реализована с параллельным или последовательным сбором информации.

В первом случае она выражается в  $n$  параллельно работающих каналах автоконтроля с  $n$  датчиками,  $n$  элементами сравнения,  $n$  уставками (нормами),  $n$  узлами ФС и  $n$  устройствами отображения информации. В отличие от этого при последовательном сборе информации на выходе  $n$  датчиков и на входе  $n$  уставок включаются коммутаторы, работающие синхронно и синфазно (рис. 10.15, *б*).

В системах автоконтроля, реализуемых по схеме на рис. 10.15, норма должна храниться в аналоговой форме, что связано с техническими трудностями. Для устранения этого недостатка хранение нормы осуществляется в цифровой форме (магнитная и другая запись), а между устройством хранения нормы и элементом сравнения включается цифроаналоговый преобразователь (рис. 10.16, *а*).

Возможен и другой вариант хранения нормы в цифровой форме, но с аналогоцифровым преобразователем на выходе датчиков и устройством сравнения в цифровой форме, например в виде дешифратора кодов (рис. 10.16, *б*).

Системы автоконтроля часто выполняют дополнительные функции, не имеющие прямого отношения к автоконтролю. К ним относятся:

- промежуточные преобразования сигналов;
- формирование тестовых (испытательных) сигналов;
- операция счета (изделий и т. п.);
- измерения (аналоговые или цифровые);
- математическая обработка результатов контроля для прогнозирования и выполнения других операций;
- диагностические функции.

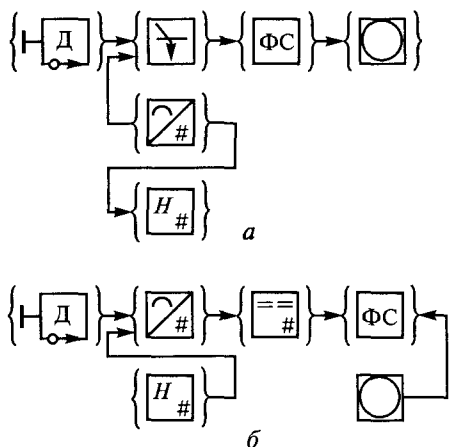


Рис. 10.16. Структурные схемы систем автоматического контроля с включением цифроаналогового (*а*) и аналого-цифрового (*б*) преобразователей

Системы автоматического контроля, в которых имеются два устройства сравнения типа «больше — меньше», называются *системами допускового контроля*.

В подобных системах возможно изменение зоны (уставки) в процессе контроля, при этом создается представление о степени близости контролируемой величины к интересующему состоянию. Такие системы принято называть *системами спорадического контроля*.

## 10.10. СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Автоматический поиск и локализация неисправностей (техническая диагностика) относятся к автоконтролю, так как при этом устанавливается представление между состоянием объекта контроля и заданной нормой. Однако в рассмотренных ранее системах автоконтроля устанавливался только факт работоспособного и неработоспособного состояний (параметры в норме или за границами нормы).

В системах технической диагностики ставится более сложная задача: не только установление факта работоспособности, но и нахождение местоположения отказа (локализация неисправностей). Это достигается специальными методами и способами поиска неисправностей, реализующимися алгоритмами диагностики. Восстановление отказавшей системы или устройства в результате нахождения места повреждений достигается в современной аппаратуре заменой отказавшего модуля работоспособным. Разделение на типовые модули упрощает поиск неисправностей и эксплуатацию аппаратуры.

Общее число возможных состояний объекта контроля при разделении его на  $N$  функциональных элементов для принятых условий поиска:

$$S = 2^N - 1.$$

Определение такого большого числа состояний даже при  $N > 7$  связано с техническими трудностями. Поэтому ограничиваются предположением, что отказал только один из  $N$  функциональных элементов, т. е. ограничиваются одиночными отказами, число которых

$$S_0 = C_N^1 = N.$$

Функциональные модели являются удобной формой представления объекта контроля для поиска неисправностей во многих аналоговых и дискретных устройствах, за исключением, например, резервированных систем. В последнем случае используется логическая модель объекта контроля, которая строится также на основе структурной схемы. Отличие заключается в том, что входные и выходные сигналы рассматриваются как логические переменные, принимающие только два возможных значения: 0 и 1.

Состояния объекта контроля определяются путем формального применения алгебры логики.

Для поиска неисправностей применяются методы: последовательный, комбинационный и различные сочетания последовательно-комбинационного метода, в соответствии с которыми разрабатывается программа поиска.

**Последовательный метод.** Последовательный метод заключается в таком построении процедуры поиска неисправностей, при котором информация о состоянии отдельных функциональных элементов вводится и логически обрабатывается последовательно. Реализация метода заключается в основном в определении очередности контроля выходных параметров функциональных элементов. Программа поиска при этом может быть жесткой или гибкой. По жесткой программе контроль выходных параметров функциональных элементов осуществляется в заранее определенной последовательности. В отличие от этого по гибкой программе содержание и порядок последующих проверок зависят от предыдущих результатов. Такая программа требует более сложной логической обработки результатов контроля и применяется в комплексе с более производительными ЭВМ.

Системы для автоматического поиска неисправностей относят к отдельному классу систем технической диагностики, т.е. они отличаются более сложной логической частью, реализующей способы поиска неисправностей. Включение датчиков и структура системы технической диагностики в остальном существенно не отличаются от систем автоконтроля или от измерительных систем.

Рассмотрим способы поиска и локализации неисправностей. Прежде всего для автоматического поиска неисправностей системы или устройства должны обладать следующими свойствами (условиями для поиска):

- могут находиться только в двух взаимоисключающих различных состояниях: работоспособном и неработоспособном (1 или 0);
- могут быть разделены на отдельные функциональные элементы, каждый из которых может одновременно находиться только в работоспособном или неработоспособном состоянии (1 или 0).

В связи с неограниченным разнообразием подлежащих диагностике устройств задачи автоматического поиска неисправностей можно решить только путем составления их упрощенных моделей и разработки методов диагностики на модели. Наиболее часто устройства представляют в виде функциональной или функционально-логической модели. Функциональная модель объекта контроля может отличаться от структурной схемы выбором функциональных узлов и элементов. Так, при построении обычной структурной схемы исходят из закономерностей процессов, описывающих работу устройства. При построении функциональной модели для поиска неисправностей выбор функциональных элементов (узлов)

определяется точностью локализации неисправностей (например с точностью до одного модуля).

Функциональная модель строится при определенных предположениях, которые в основном сводятся к тому, что для каждого функционального элемента заданы номинальные значения входных и выходных сигналов, их функциональная зависимость и способ контроля. Функциональный элемент считается неисправным, если при его номинальных входных сигналах выходные сигналы отличаются от номинальных.

**Комбинационный метод.** Данный метод требует более сложной обработки, так как вначале вводятся все результаты контроля параметров, а затем они логически обрабатываются.

Для реальных систем возможно большое разнообразие программ поиска неисправностей, требуются большой объем исходной информации о состоянии объектов контроля и сложная логическая обработка результатов контроля. Поэтому разработаны приближенные способы построения оптимальных программ поиска неисправностей. Эти программы в основном представляют собой многошаговый процесс поиска с выбором на каждом шаге лучшего варианта по экстремуму заданной функции предпочтения.

Перечислим некоторые распространенные способы построения программ поиска неисправностей:

- способ последовательного функционального анализа;
- половинного разбиения;
- «время—вероятность»;
- с применением информационного контроля;
- построения программ методом ветвей и границ;
- построения программы поиска по иерархическому принципу;
- инженерный.

Способ последовательного функционального анализа был одним из первых способов построения программ поиска неисправностей. Прежде всего при этом способе определяются основные функции: генерирования сигналов на выходе устройства; приема и преобразования сигналов; отображения сигналов; управления; электропитания и др. Выполнение этих функций позволяет считать, что и все устройство выполняет поставленные перед ним задачи.

Контроль работоспособности всего устройства зависит от контроля за выполнением всех перечисленных функций. Для этого выбирают и контролируют параметры, от которых зависит выполнение основных функций. И если одна из перечисленных функций не выполняется по одному из контролируемых параметров, возникает задача поиска неисправностей. При этом параметр, вышедший за границы допусков, рассматривается как функция других аргументов. Схему поиска неисправностей называют *деревом функций*.

Автоматический поиск неисправностей в сложных системах относится к интересным и быстроразвивающимся направлениям в науке и технике.

## 10.11. СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Распознавание образов применяется для автоматического распознавания печатных, рукописных и фотографированных знаков, текстов, рисунков и схем; для распознавания звуков речи, команд, передаваемых голосом; для выявления некоторых ситуаций в сложных технических комплексах, таких как критическое или аварийное состояние и т.д.

Главными целями распознавания образов являются расширение возможностей общения человека с машиной и расширение возможностей автоматизации путем освобождения человека-оператора от многих операций, которые ограничивают быстродействие, надежность и эффективность функционирования автоматизированных комплексов.

Распознавание определяется как процесс отнесения ситуаций, явлений, образов к одному из нескольких или многих заранее определенных классов на основе анализа их характеристик. При распознавании возникают взаимосвязанные задачи выбора параметров распознавания и задачи нахождения и оценки качества решающей функции.

Для выбора параметров предварительно выделяют совокупность параметров (признаков), характеризующих рассматриваемый образ. Эти признаки могут быть представлены в виде точки в многомерном пространстве, которое называется *пространством объектов*, а вектор  $\vec{X}$  — *вектором объекта*.

Задача нахождения решающей функции должна рассматриваться с учетом сведений об объектах. Она должна удовлетворять следующим условиям:

- $f(\vec{X}) \geq 0$ , если объект принадлежит к одному классу;
- $f(\vec{X}) < 0$ , если объект принадлежит к другому классу.

Следовательно, решающая функция позволяет найти гиперповерхность, разделяющую многомерное пространство на классы.

Широко применяемый непараметрический (адаптивный) метод распознавания базируется на итеративной процедуре оптимизации параметров распознавания.

На рис. 10.17 приведена структурная схема системы распознавания образов.

Детектор признаков (ДП) воспринимает физическое воздействие, характеризующее объекты, и выдает на выходе совокупность сигналов, несущих признаки (параметры) распознаваемого образа. В случае необходимости в ДП производится освобождение

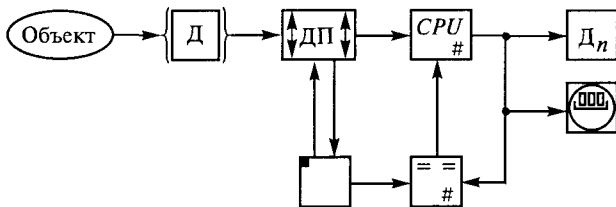


Рис. 10.17. Структурная схема системы распознавания образов

ние (фильтрация) от шумов (помех), нормализация по геометрическим размерам и положению (масштабирование), координатные преобразования и т. д.

Детектор признаков во многих случаях выполняется в виде рецепторного фотозлектронного поля с системой развертки для распознавания образов или микроЭВМ.

В блоке памяти хранятся программы исходных, промежуточных и конечных данных, а также программы функционирования. Особенность его состоит в необходимости хранения описаний распознаваемых классов и запоминания значений оптимизируемых параметров классификатора. Блок памяти может содержать оптические маски, магнитные барабаны, аналоговую память и т. д.

Решение о принадлежности совокупности объектов (образа) к одному из заранее определенных классов принимает классификатор *CPU*. Это осуществляется в соответствии с принятым критерием распознавания или правилом решения в его устройстве на основе сигналов, выдаваемых детектором признаков. *Критерием распознавания* называется правило, по которому строится гиперповерхность, разделяющая распознаваемые образы на классы в пространстве признаков (объектов). Классификатор выполняется в виде сети из линейных пороговых элементов или вычислительного устройства.

Сравнение действительного образцового описания распознаваемых классов и выработка сигналов ошибки производятся в устройстве сравнения.

Для функционирования распознающей системы необходимым условием является наличие сведений о классах совокупностей объектов. Эти сведения задаются заранее или возникают в процессе обучения, который в этом случае предшествует процессу классификации. В процессе обучения на вход распознающей системы последовательно подаются признаки образов каждого класса и если система при этом сообщает, к какому классу принадлежит образ, процесс называется *обучением с учителем*. Если же система не сообщает, к какому классу принадлежит образ, процесс называется *обучением без учителя* или *самообучением*.



## 10.12. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Статистические измерения, или измерения вероятностных характеристик случайных процессов, — это широкий круг методов и средств, применяемых в различных областях народного хозяйства.

Под *вероятностными характеристиками* случайных процессов будем понимать математическое ожидание, дисперсию, законы распределения вероятностей, корреляционные и спектральные функции.

На рис. 10.18, *а* изображен стационарный случайный процесс; на рис. 10.18, *б* — нестационарный случайный процесс с переменным во времени математическим ожиданием; на рис. 10.18, *в* — нестационарный случайный процесс с переменной во времени дисперсией; на рис. 10.18, *г* — нестационарный случайный процесс с переменным во времени математическим ожиданием и дисперсией.

Если рассматривать стационарный случайный процесс, приведенный на рис. 10.19, *а*, то функция распределения определяется как вероятность  $P$  в интервале  $-\infty \leq X(t) < x$ , где  $x$  может изменяться от  $-\infty$  до  $+\infty$ :

$$F(X) = P(-\infty \leq X(t) \leq x).$$

Значение функции распределения при изменении  $x$  в вышеуказанных пределах изменяется от 0 до 1:

$$F(X)(-\infty) = 0, F(X)(+\infty) = 1.$$

*Эмпирическая функция распределения* — это функция  $F^*(X)$ , определяющая для каждого значения  $x$  относительную частоту события  $X < x$ , т. е.

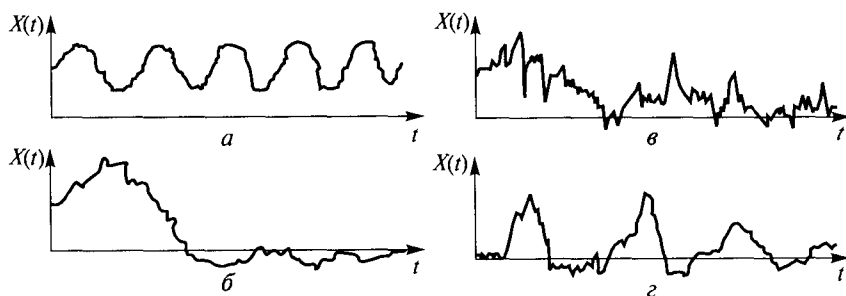


Рис. 10.18. Реализации случайных процессов:

*а* — стационарный; *б* — нестационарный с переменным математическим ожиданием; *в* — нестационарный с переменной дисперсией; *г* — нестационарный с переменным математическим ожиданием и дисперсией

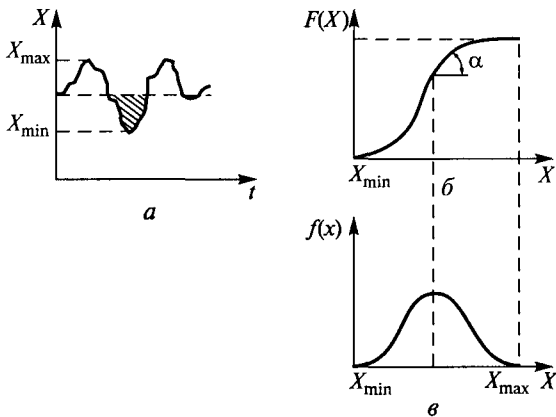


Рис. 10.19. Реализации случайного процесса:

*a* — стационарный случайный процесс; *б* — функция распределения; *в* — плотность распределения

$$P^*(X) = n_x/n,$$

где  $X$  — статистическое распределение частот;  $n_x$  — число наименьших вариантов  $n$ ;  $n$  — объем выборки.

Плотность распределения вероятностей получают путем дифференцирования  $P(X)$  по  $x$ :

$$f(x) = dF(X)/dx.$$

**Измерение математического ожидания.** Структурная схема устройства, представленного на рис. 10.20, реализует алгоритм:

$$M^*[X(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt.$$

**Измерение дисперсии.** На рис. 10.21 приведен один из вариантов построения средств измерений дисперсии случайного процесса дисперсиомером:

$$D[x(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x^*(t) - M[X(t)]]^2 dt.$$

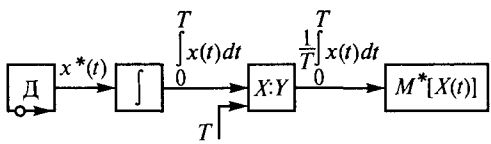


Рис. 10.20. Структурная схема средств измерения математического ожидания случайного процесса

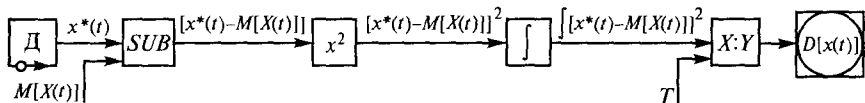


Рис. 10.21. Структурная схема, реализующая алгоритм построения средств измерения дисперсии случайного процесса

**Измерение функции и плотности распределения вероятностей.** На рис. 10.22, а представлена многоканальная аналоговая система для измерения распределения вероятностей  $F^*(x)$ , а на рис. 10.22, б — цифровая система для измерения плотности распределения вероятностей  $f^*(x, U_x)$ .

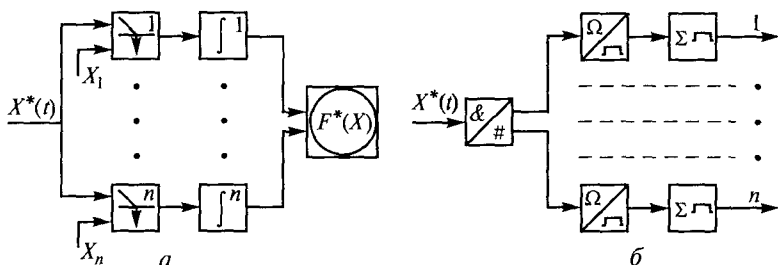


Рис. 10.22. Структурная схема анализатора: а — функции распределения вероятностей; б — плотности распределения вероятностей

Ввиду того что анализ  $F^*(x)$  и  $f(x, U_x)$  в настоящее время в основном ведется с помощью ЭВМ, предлагаем читателям ознакомиться с этими анализаторами самостоятельно.

Для стационарного эргодического процесса  $x(t)$  корреляционная функция может быть определена как математическое ожидание центрированных значений  $\dot{x}(t)$  в моменты времени  $t$  и  $t + \tau$ :

$$R_x(\tau) = M \left[ \dot{x}(t) \dot{x}(t + \tau) \right] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \dot{x}(t) \dot{x}(t + \tau) dt$$

На рис. 10.23 приведена схема, реализующая эту зависимость.

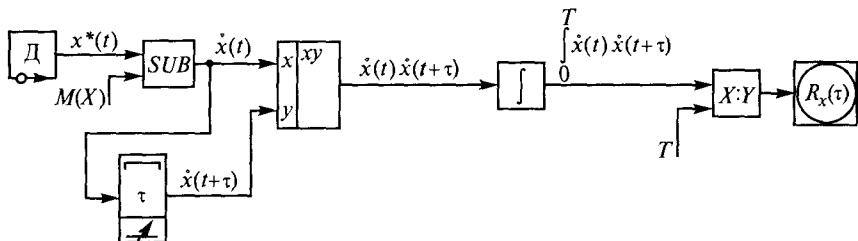


Рис. 10.23. Структурная схема прибора для измерения корреляционной функции

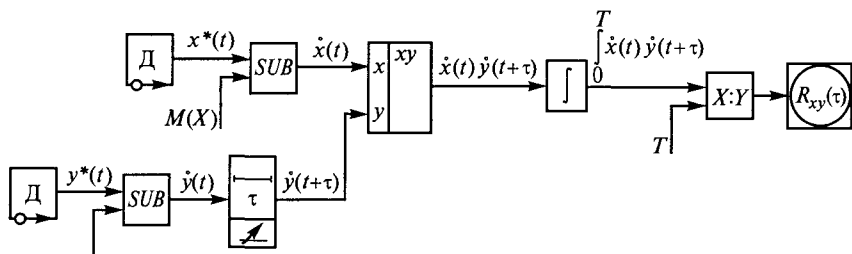


Рис. 10.24. Структурная схема для измерения взаимной корреляционной функции

На рис. 10.24 приведена схема корреляционной системы, реализующая алгоритм взаимной корреляционной функции между двумя случайными процессами  $x(t)$  и  $y(t)$ :

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \dot{x}(t) \dot{y}(t + \tau) dt.$$

Спектр мощности характеризует ее частотное распределение и определяется следующим алгоритмом:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Системы спектрального анализа могут быть как с параллельным, так и с последовательным сбором информации.

На рис. 10.25 изображена структурная схема анализатора мощности случайного процесса.

При измерении нестационарного случайного процесса прежде всего необходимо определить характер нестационарности, так как от этого зависит методика измерения и определения числовых характеристик данного процесса. Практически наиболее часто встречаются три основных типа нестационарных случайных процессов (см. рис. 10.18, б—г). Так как статистические характеристики нестационарных, случайных процессов зависят от времени, то для их определения, в отличие от стационарных эргодических случай-

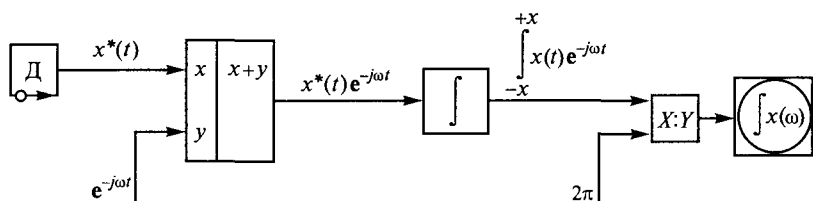


Рис. 10.25. Структурная схема анализатора мощности случайного процесса  $X(t)$

ных процессов, необходимо располагать несколькими реализациями данных.

Пусть в результате независимых измерений получено  $N$  реализаций случайного процесса  $X(t)$ , которые обозначим  $x_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Для любого фиксированного момента времени статистическая характеристика случайного процесса  $X(t)$  получается осреднением по ансамблю  $N$  реализации для этого момента времени. Поэтому, как и для полученных ранее соотношений статистических числовых характеристик случайных величин, аналогично можно получить выражения для статистического математического ожидания  $m_x^*(t)$ , статистической дисперсии  $D_x^*(t)$  и статистического среднеквадратического отклонения  $\sigma_x^*(t)$  нестационарного случайного процесса  $X(t)$ :

$$m_x^*(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t); \quad D_x^*(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i(t) - m_x(t)]^2; \quad \sigma_x^*(t) = \sqrt{D_x^*(t)}.$$

Учитывая, что истинное значение  $m_x(t)$  неизвестно, статистическую дисперсию определяют по формуле

$$D_x^{**}(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [x_i(t) - m_x^*(t)]^2,$$

которая является несмещенной оценкой истинного значения дисперсии нестационарного случайного процесса.

Для определения статистической корреляционной  $R_x^*(t_1, t_2)$  и взаимной корреляционной  $R_{xy}^*(t_1, t_2)$  функций необходимо рассматривать два фиксированных момента времени:  $t_1$  и  $t_2$ . При этом

$$R_x^*(t_1, t_2) = M [\{x(t_1) - m_x(t_1)\} \{x(t_2) - m_x(t_2)\}];$$

$$R_{xy}^*(t_1, t_2) = M [\{x(t_1) - m_x(t_1)\} \{y(t_2) - m_y(t_2)\}].$$

Статистические корреляционную и взаимную корреляционную функции можно определить по соотношениям:

$$R_x^*(t_1, t_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\{x_i(t_1) - m_x(t_1)\} \{x_i(t_2) - m_x(t_2)\}];$$

$$R_{xy}^*(t_1, t_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\{x_i(t_1) - m_x(t_1)\} \{y_i(t_2) - m_y(t_2)\}].$$

Так как истинное значение  $m_x(t)$  и  $m_y(t)$ , как правило, неизвестно, для вычисления указанных статистических характеристик пользуются соотношениями:

$$R_x^{**}(t_1, t_2) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\{x_i(t_1) - m_x(t_1)\} \{x_i(t_2) - m_x^*(t_2)\}];$$

$$R_{xy}^{**}(t_1, t_2) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\{x_i(t_1) - m_x(t_1)\} \{y_i(t_2) - m_y^{**}(t_2)\}].$$

Соответственно в структурных схемах (см. рис. 10.20, 10.21, 10.23, 10.24) необходимо изменить элементы, включающие суммирование вместо интегрирования. Так как в настоящее время широко распространены ПЭВМ, при исследовании этих параметров измерительных информационных систем используют магнитофон и любую вычислительную машину.

### 10.13. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**Основные стадии работ.** Измерительные информационные системы могут создаваться (разрабатываться) как общего применения, выпускаемые серийно; не стандартизованные единичного производства; не стандартизованные, комплектуемые из серийных агрегатных средств. Поэтому имеется несколько подходов к созданию ИИС, но во всех случаях интенсивно развивается системный подход к проектированию и широко используются системы автоматизированного проектирования.

При проектировании ИИС общего применения для последующего серийного выпуска выделяют следующие основные стадии: техническое задание (ТЗ); техническое предложение (ТП) с присвоением документации литеры «П»; эскизный проект (ЭП) с присвоением литеры «Э»; технический проект (ТП) с присвоением литеры «Т»; рабочая документация (РД) с присвоением литеры «РД».

*Техническое задание* обычно разрабатывают на основе результатов выполненных научно-исследовательских и экспериментальных работ, научного прогнозирования, анализа передовых достижений и технического уровня отечественной и зарубежной техники, изучения патентной документации, а также на основе исходных требований заказчиками.

Техническое задание включает следующие разделы: наименование и область применения, основание для разработки; цель и назначение разработки, источники разработки; технические требования, экономические показатели, стадии и этапы разработки; порядок контроля и приемки. В ТЗ также указывают минимальную цену ИИС.

Техническое задание согласовывается с предприятием-разработчиком, предприятием-изготовителем и утверждается ведущим заказчиком или установленной им организацией.

*Техническое предложение* обычно состоит из следующих этапов:

- определение патентоспособности;
- поиск аналогов;

• сравнительная оценка различных возможных реализаций ИИС и выбор оптимальной по алгоритмам сбора и обработки информации; техническому, программному, информационному, организа-

ционному и лингвистическому обеспечению; видам интерфейсов, модуляции и т. д. В этом сравнении важен учет показателя качества;

- разработка и анализ структурной, функциональной схемы и общего алгоритма работы ИИС;
- решение принципиальных вопросов метрологического обеспечения;
- рассмотрение и утверждение технического предложения.

*Эскизный проект* предусматривает создание документации, содержащей принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия. В необходимых случаях должны проводиться изготовление и испытание макетов изделия. Эскизный проект после согласования и утверждения служит для разработки технического проекта или рабочей документации.

*Технический проект* предусматривает создание документации, содержащей окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемой системы. Технический проект служит основанием для разработки рабочей конструкторской документации.

*Рабочая документация* является завершающей стадией на проектируемую ИИС. Она состоит в разработке конструкторской документации на опытный образец системы (литеры), изготовлении опытного образца; проведении государственных, межведомственных или других испытаний опытных образцов; последующих корректировок рабочей документации (литеры), подготовке рабочей документации и изготовлении установочной серии и массовом выпуске новой ИИС.

При создании не стандартизованных ИИС обычно выделяют три стадии: предпроектные, проектные и стадии реализации.

Весь процесс создания ИИС технологическим объектом делится на ряд стадий, установленных государственным стандартом, причем каждая из них заканчивается выпуском и утверждением определенной документации (предпроектной, проектной или организационно-распорядительной). Наименования некоторых стадий совпадают с наименованиями соответствующих документов (или комплектов документации). В соответствии с ГОСТом предусмотрены две предпроектные стадии: «Технико-экономическое обоснование» и «Техническое задание»; две проектные стадии: «Технический проект» и «Рабочая документация», которые допускается объединять в одну: «Технорабочий проект», а также стадии «Ввод в действие (внедрение)» и «Анализ функционирования», которые можно условно назвать стадиями реализации системы. Каждую стадию создания ИИС принято подразделять на стадии, наименования которых определяются направленностью и (или) содержанием соответствующих работ.

**Предпроектные стадии.** Основная цель работ, выполняемых на этой стадии, состоит в формировании обоснованного предложения заказчика о создании ИИС с определенными основными функциями и техническими характеристиками. Ответственность за разработку технико-экономического обоснования системы несет заказчик, а основанием для выполнения ТЭО является решение руководства предприятия или вышестоящих организаций; ими же определяются сроки проведения, источники и объемы финансирования работ. Разработка ТЭО проводится заказчиком системы совместно с генеральной проектной организацией. При необходимости к работам привлекаются специализированные организации, в частности предполагаемый разработчик системы.

Для достижения указанной выше цели проводятся анализ известных случаев применения ИИС для аналогичных объектов и обследование существующих объекта и системы управления, что позволяет в случае положительного решения разработать обоснованные с позиций заказчика исходные технические требования к ИИС.

Разработка ТЭО в общем случае включает в себя следующие стадии.

**Организация разработки ТЭО.** На этой стадии определяется программа работ, необходимых для формулирования обоснованного предложения о целесообразности создания ИИС и разработки исходных технических требований к системе. При этом следует иметь в виду, что стадия ТЭО имеет принципиальное значение и оказывает влияние на содержание и результаты работ на последующих стадиях создания системы и ее качество. Поэтому работы стадии ТЭО должны планироваться и выполняться особенно полно и тщательно.

**Обследование объекта и существующей системы измерений.** Работы этого важного этапа стадии ТЭО должны быть направлены на выявление главных источников ожидаемой эффективности создаваемой ИИС. Содержательно этап сводится к тщательному изучению и анализу действующих системы и объекта, обнаружению существующих недостатков, приводящих к уменьшению эффективности производства и установлению причин этих недостатков. Анализ объекта и существующей системы измерения и контроля должен быть детальным, достаточно полным и объективным. В результате проведения этапа должны быть выявлены «узкие места», вскрыты причины потерь и неиспользованные резервы производства, установлены причины аварий, брака и другие подобные обстоятельства. При проведении обследования основное внимание должно быть уделено определению технологического потенциала объекта управления, т.е. существующего запаса по производительности, и повышению качества выходной продукции, определяемого в первую очередь конструкцией агрегата, свойствами входных продуктов и потенциалом управления,



т.е. предельными значениями тех же параметров, которые могут быть достигнуты путем оптимизации контроля и управления при наличии ИИС.

**Технико-экономическое обоснование ИИС.** Основная цель третьего, завершающего этапа стадии ТЭО состоит в установлении функционального назначения предполагаемой к разработке ИИС, предварительной оценке затрат на ее создание и эффективности, связанной с устранением выявленных недостатков существующей системы измерения. Основные результаты работ этапа оформляются в виде ТЭО создания ИИС, в котором изложение исходных технических требований к ИИС сводится к четкому и упорядоченному перечислению желаемых функций создаваемой ИИС и требований к качеству их выполнения (по быстродействию, надежности, метрологии и т.п.). Здесь же приводится предварительный расчет ожидаемых показателей технико-экономической эффективности ИИС данным технологическим объектом, выполненный по соответствующей утвержденной методике.

**Техническое задание (ТЗ).** Основная цель работы заключается в подтверждении целесообразности и детальном обосновании возможности создания эффективной ИИС с определенными функциями и техническими характеристиками, сформулированными заказчиком в ТЭО.

Для достижения этой цели исходные технические требования к ИИС перерабатываются на основании результатов предпроектных НИР и ОКР в обоснованное, согласованное и утвержденное «Техническое задание на создание ИИС», являющееся основным документом, согласно которому осуществляется проверка системы при ее передаче в промышленную эксплуатацию. Ответственность за разработку ТЗ по созданию ИИС несет исполнитель — основной разработчик системы.

Исходным материалом для работ стадии ТЗ является технико-экономическое обоснование ИИС с исходными техническими требованиями к системе (функциональными и технико-экономическими).

Основными выходными документами этапа «Техническое задание» являются ТЗ по созданию ИИС, технико-экономическое обоснование намеченных в ТЗ решений и научно-технический отчет (отчеты), содержащий результаты проведенных предпроектных исследований и эскизной проработки ИИС. Технические задания на создание ИИС и ТЭО являются обязательными исходными документами для проведения научно-исследовательских и проектных работ на последующих стадиях технического и рабочего проектирования.

Предпроектные научно-исследовательские работы стадии ТЗ направлены в основном на изучение наиболее сложных задач управления данным объектом для предварительного выбора методов их решения.

Методически этот этап сводится к выполнению следующих работ:

- анализ технологического процесса как информационного объекта;
- анализ информационных потоков, формулировка критерия измерения, контроля и ограничений;
- разработка предварительных математических моделей технологического процесса и измерений;
- формулировка задач синтеза алгоритмов контроля и измерения, предварительный выбор их решения;
- формулировка постановок функциональных задач системы;
- определение функций, которые должна реализовать система, и уточнение требований к их выполнению.

Одновременно производится предварительная оценка возможности реализации этих функций с помощью современных средств вычислительной техники. Как правило, такие исследования проводятся в лабораторных условиях аналитическими методами или путем экспериментального моделирования в вычислительных центрах на универсальных ЭВМ.

Техническое задание по созданию ИИС, составленное на основе предварительной эскизной проработки системы, должно содержать вводную часть и следующие разделы:

- характеристики технологического объекта;
- назначение ИИС;
- технико-экономические показатели ИИС;
- требования к ИИС;
- требования к заказчику по подготовке объекта;
- состав и содержание работ по созданию ИИС;
- порядок сдачи системы.

Техническое задание утверждается заказчиком и должно быть согласовано со всеми организациями — участниками работ (соисполнителями).

**Проектные стадии.** Технический проект (ТП). Целью работ, выполняемых на стадии ТП, являются обоснование и разработка основных технических решений по создаваемой системе и определение ее сметной стоимости.

Основанием для выполнения работ является наличие утвержденного ТЗ к созданию системы и документа о его финансировании. Основные участники работ — генеральный разработчик, обычно системный институт, а соисполнитель — проектная организация.

Исходные материалы для разработки технического проекта:

- утвержденное ТЗ на создание ИИС;
- технико-экономическое обоснование системы;
- научно-технический отчет на стадии ТЗ о работах, проведенных на этапах: «Предварительное обследование», «Предпроектные научно-исследовательские работы» и «Эскизная проработка ИИС»;

• исходные данные заказчика о технологическом объекте измерения и контроля, помещениях и сооружениях, электроснабжении и др.

На стадии «Технический проект» участники проводят необходимые исследовательские и проектные работы по следующим этапам.

1. «Системотехнический синтез ИИС» — прорабатываются основные решения по системе в целом (схемы функциональной и организационной структуры ИИС, описания постановок функциональных задач и др.). На этом же этапе составляются задания к работе по проектированию ИИС, поручаемые организациям-соисполнителям. Задания кроме общих и организационных вопросов должны определять точное наименование и состав поручаемой работы, ее объем и место в проекте ИИС, технические требования, перечень основных выходных документов и т. д.

2. «Аппаратурно-технический синтез» — определяются характеристики информационно-измерительных каналов, структуры комплекса технических средств системы, функциональных схем и т. п.

3. «Разработка заданий на проектирование в смежных частях проекта» — содержит требования к помещениям, к обеспечению технических средств системы различными видами энергии, средствами производственной связи и к другим разработкам, проводимым в смежных частях проекта строительства или реконструкции объекта для создания ИИС.

4. «Подготовка заявок на разработку новых средств измерения» — определяются технические требования к новым техническим средствам, осуществляются их предварительное согласование с организациями — разработчиками средств.

5. «Разработка технических заданий на оперативно-диспетчерское оборудование, выпускаемое не серийно», — создаются технические задания на нестандартизованное оборудование, которые передаются либо конструкторским организациям заводов-изготовителей, либо другим организациям-соисполнителям.

6. «Разработка сметы на создание ИИС», «Расчет ожидаемой технико-экономической эффективности ИИС» и «Составление патентного формуляра» — завершаются этапы составления проектно-сметных документов, включаемых в состав общесистемной документации.

7. «Техническое проектирование специального математического и информационного обеспечения ИИС» — представляет собой основную совокупность работ, выполняемых генеральным разработчиком системы на стадии «Технический проект», и включает разработку всех алгоритмов, реализуемых средствами вычислительной техники, общего алгоритма функционирования ИИС как человекомашинной системы и завершается выпуском задания на программирование, которое передается соисполнителю программной

документации. Результат работы этапа оформляется в виде отдельного раздела (тома) технического проекта ИИС.

Документация ТП разделяется на общесистемную, математического, информационного и технического обеспечения.

В состав общесистемной документации должны включаться:

- пояснительная записка к техническому проекту ИИС;
- описание постановок функциональных задач, обеспечивающих выполнение всех основных функций системы;
- схема функциональной структуры системы;
- схема организационной структуры системы;
- расчет ожидаемой экономической эффективности и сметы затрат на создание ИИС.

Пояснительная записка к ТП должна раскрывать цель и назначение ИИС, суть всех проектных решений и кроме описания общих вопросов должна содержать разделы по видам обеспечения ИИС, где приводятся соответствующие пояснения.

Схема функциональной структуры системы должна отражать все функции, выполняемые ИИС. Структурными элементами схемы могут быть отдельные функции или функции, сгруппированные по каким-либо логическим признакам.

Схема организационной структуры системы показывает взаимодействие оперативного персонала ИИС, пункты управления (места расположения оперативного персонала ИИС) и связи между пунктами управления, соответствующие передаче информации (автоматически, в виде документов, по телефону и т. п.).

Расчет ожидаемой экономической эффективности ИИС должен определять результирующие показатели эффективности ИИС (годовой экономической эффект, срок окупаемости и коэффициент эффективности) с указанием конкретных технически обоснованных источников эффективности и социальных факторов, влияющих на результаты работы.

Смета на создание ИИС включает детальный перечень затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы; приобретение и монтаж средств технического обеспечения; проектирование; разработку новых технических средств; приобретение и монтаж средств технического обеспечения.

В состав документации математического обеспечения технического проекта ИИС должны входить следующие документы:

- пояснительная записка к разделу проекта «Специальное математическое обеспечение»;
- алгоритмы контроля и управления, а также контрольных задач;
- алгоритмы функционирования системы в реальном масштабе времени, обеспечивающие работоспособность, надежность и возможность развития системы в пределах указанных в техническом задании;

- алгоритмы контрольных задач, которые должны обеспечивать контроль правильности функционирования комплексных технических средств (КТС);

- задание на программирование, которое должно содержать описание алгоритмов, указание о конфигурации технических средств, языке программирования, операционной системе и др.

В состав документации информационного обеспечения технического проекта ИИС должны входить следующие документы:

- пояснительная записка к разделу «Информационное обеспечение»;

- перечень входных сигналов и данных, в которых приводятся входные измеряемые (аналоговые и дискретные) и инициативные сигналы, поступающие в информационно-управляющий комплекс, и их характеристики;

- перечень выходных сигналов и документов, включающий способы представления выходной информации и ее дальнейшего использования при выполнении функций системы;

- схема сбора, обработки и использования информации с указанием видов устройств и процедур.

В состав документации технического обеспечения, входящей в технический проект ИИС, должны включаться в основном следующие документы:

- пояснительная записка к разделу «Техническое обеспечение»;

- структурная схема КТС, которая определяет состав комплекса технических средств ИИС и основные взаимосвязи в нем; структурными схемами могут быть отдельные средства или группы средств, объединенные по каким-либо логическим признакам. Например, можно сгруппировать средства, обеспечивающие выполнение отдельных или нескольких функций ИИС, отдельных или нескольких систем автоматизации, можно принять группировку по назначению средств (для получения, формирования, передачи, переработки информации и т. д.), а также по другим признакам;

- структурная схема вычислительного информационного комплекса, которая раскрывает состав и построение ИВК;

- планы расположения пунктов контроля, щитов, пультов средств вычислительной техники и т. п.;

- ведомости (перечни) приборов и средств, контроля и автоматизации, средств телемеханики, вычислительной техники, электроаппаратуры, трубопроводной арматуры, щитов и пультов, основных монтажных материалов и изделий, нестандартизованного оборудования и др.

**Рабочая документация.** Цель работ, выполняемых на этой стадии, — выработка рабочих решений по создаваемой системе с выпуском проектно-сметной документации, необходимой и достаточной для приобретения, монтажа и наладки КТС системы, а

также документации программного и организационного обеспечения, необходимой и достаточной для наладки и эксплуатации системы.

Основанием для начала работ стадии являются утверждение технического проекта и наличие документа об их финансировании.

Исходные данные для выполнения рабочего проекта ИИС — утвержденное ТЗ на создание ИИС, утвержденный технический проект ИИС и исходные данные заказчика о ТО исследования и управления, здании, энергоснабжении и др. Основные участники работ, привлекаемые к выполнению на стадии «Рабочий проект», определяются планом-графиком создания ИИС.

Результатом стадии является выпуск документации рабочего проекта и передача заказчику специальных программ на машинных носителях.

Рабочая документация делится на общесистемную, информационную, программную, техническую, организационную и метрологического обеспечения.

В состав общесистемной документации рабочего проекта должны включаться в основном документы, раскрывающие общие решения:

- пояснительная записка к рабочему проекту ИИС;
- схема функциональной структуры системы;
- схема организационной структуры системы;
- другие общесистемные документы ТП.

В состав документации технического обеспечения рабочего проекта должны включаться:

- пояснительная записка к разделу технического обеспечения;
- схема (структурная) комплекса технических средств;
- схема (структурная) средств ВТ;
- схемы (функциональные) контроля и измерений;
- схемы принципиальные и др.

В состав документации организационного обеспечения проекта должны включаться:

- техническое описание системы;
- инструкция по эксплуатации ИИС;
- прочие документы (по усмотрению генерального разработчика системы).

Этап, относящийся к созданию рабочей документации программного и информационного обеспечения, имеет целью разработку программного обеспечения ИИС, включающую изготовление оригиналов и копий программ специального обеспечения, а также выпуск полного комплекта программной документации и документации информационного обеспечения функций, реализуемых с помощью программируемых средств вычислительной техники. Этап включает следующие работы:

- синтез полной программной структуры системы;

- анализ синтезированной структуры с целью выделения программных модулей, подлежащих непосредственному программированию и изготовлению в виде отдельных программ;
- программирование, отладку и проверку модулей;
- изготовление программ-оригиналов, дубликатов и копий в необходимых количествах;
- разработку и оформление программной и эксплуатационной документации системы в целом;
- разработку рабочей документации информационного обеспечения ИИС.

Результаты работ этапа представляются в виде программ на машинных носителях (оригиналы, дубликаты и копии в необходимом количестве), эксплуатационной программной документации в целом и рабочей документации для информационного и метрологического обеспечения

**Стадии реализации. Ввод в действие.** Целью работ на этой стадии является физическая реализация системы и передача ее в промышленную эксплуатацию. Основанием для начала работ по вводу ИИС служит готовность рабочей документации. Работы проводятся в соответствии с планом-графиком, утвержденным организацией-заказчиком и согласованным с организацией-разработчиком и соисполнителями. План-график работ по внедрению может предусматривать поочередный ввод системы.

Основные этапы работ ИИС: подготовка объекта к вводу; наладка и испытания системы; опытная эксплуатация; приемосдаточные испытания.

*Подготовка объекта к вводу ИИС* включает в себя организационно-технические работы (в том числе строительные работы и модернизацию технологического оборудования), комплектацию системы, монтаж оборудования ИИС.

Комплектация системы производится в установленном порядке в соответствии с заказными спецификациями, разработанными на стадии рабочего проектирования. Монтаж оборудования ИИС производится специализированными организациями, привлекаемыми заказчиком на основании рабочей документации на систему и в соответствии с ней. Завершение всех работ по монтажу технических средств ИИС в полном объеме фиксируется комиссией из представителей заказчика и исполнителя в виде двухстороннего акта.

*Наладка и испытания ИИС* охватывают отладку комплекса технических средств системы, ее программного обеспечения и проведение предварительных испытаний системы до ее передачи в опытную эксплуатацию. В результате предварительных испытаний определяются количественные и качественные характеристики выполнения отдельных функций, выявляются возможность совместного функционирования всех подсистем и характеристики системы в целом.

*Опытная эксплуатация ИИС* проводится силами заказчика с участием исполнителя для проверки работоспособности системы и готовности оперативного и ремонтного персонала к работе в условиях промышленной эксплуатации системы. На этапе опытной эксплуатации выполняются следующие работы: включение системы в опытную эксплуатацию, определение эксплуатационных характеристик системы, дополнительная отладка программ и устройств, коррекция эксплуатационной документации. В ходе опытной эксплуатации осуществляются устранение ошибок в программах и внесение исправлений в техническую и эксплуатационную документацию.

*Приемосдаточные испытания* проводятся с целью проверки соответствия созданной системы общим техническим требованиям ИИС, требованиям, содержащимся в ТЗ на создание системы, и приемки ее в промышленную эксплуатацию. Приемосдаточные испытания ИИС организуются и проводятся заказчиком, который совместно с исполнителем представляет государственной (межведомственной) комиссии следующую техническую документацию на систему: техническое задание, технико-экономическое обоснование, протокол опытной эксплуатации, проекты программ и методику проведения приемосдаточных испытаний, эксплуатационную документацию. Комиссия после изучения представленных материалов принимает решение о готовности (неготовности) ИИС для проведения государственных (межведомственных) испытаний.

После окончания приемосдаточных испытаний составляется акт, в котором формулируется заключение о соответствии (несоответствии) рассматриваемой ИИС предъявляемым к ней требованиям и целесообразности (нецелесообразности) передачи ее в промышленную эксплуатацию.

*Анализ функционирования.* Цель работ, выполняемых на стадии «Анализ функционирования», состоит в получении объективных и систематизированных данных о качестве созданной системы, о текущем состоянии и реальном эффекте от использования системы на основании опыта ее промышленной эксплуатации. Для этого определяются показатели эксплуатационной надежности системы в целом и отдельных реализуемых ею функций, показатели технико-экономической эффективности системы и оценивается функционально-алгоритмическая полнота (развитость) системы.

Исходными данными для проведения работ этой стадии являются:

- эксплуатационная документация, содержащая все сведения о системе, необходимые для освоения ИИС и ее эксплуатации;
- формуляр системы (отражающий работу системы и ее комплекса технических средств с фиксацией всех видов неисправностей и способов их устранения);
- известные методики по определению экономической эффективности и эксплуатационной надежности ИИС.



Исследования, проводимые на стадии «Анализ функционирования», включают следующие этапы:

- предварительное обследование состояния ИИС;
- экспериментально-статистические исследования;
- анализ полученных результатов;
- разработка рекомендаций и заключительных материалов обследования.

Основные итоговые материалы стадии «Анализ функционирования» — научно-технический отчет по результатам анализа функционирования конкретной ИИС и техническое заключение или справка о результатах обследования.

Результаты работ по анализу функционирования ИИС могут использоваться для развития и совершенствования данной ИИС, разработки унифицированных и типовых решений как в части технических структур, так и программного обеспечения, необходимых для тиражирования ИИС, создания ИИС, предназначенных для аналогичных или близких по технологии объектов, научных обобщений по всему циклу работ при создании ИИС.

**Экономическая эффективность.** Основным показателем народнохозяйственной экономической эффективности ИИС является годовой экономической эффект от внедрения системы, представляющий собой суммарную экономию в расчетном году всех производственных ресурсов: трудовых, материальных и финансовых, которую получают как предприятия, использующие ИИС, так и предприятия, потребляющие произведенную продукцию с помощью ИИС. Показатель годового экономического эффекта используется для оценки целесообразности разработки каждой конкретной ИИС, выбора наиболее эффективного варианта системы, оценки экономической эффективности научно-исследовательских работ по созданию ИИС и научно-производственной деятельности организаций-разработчиков систем, а также для определения размера премий по новой технике за разработку и внедрение ИИС.

Другими важными показателями экономической эффективности ИИС являются годовая экономия (годовой прирост прибыли), коэффициент эффективности и срок окупаемости.

Годовая экономия (годовой прирост прибыли). Она представляет собой прирост по сравнению с базовым вариантом прибыли (снижение себестоимости) потребителя ИИС в результате функционирования системы. Показатель годовой экономии применяется при планировании развития производства, формировании фондов экономического стимулирования работников предприятий, изменении норм, нормативов и основных хозяйственных показателей работы предприятия.

Коэффициент эффективности. Коэффициент эффективности капитальных вложений на внедрение ИИС характеризу-

ет годовой прирост прибыли (и годовую экономию) от увеличения объема производства, снижения себестоимости и улучшения качества продукции, получаемый на каждый рубль капитальных вложений на внедрение ИИС.

**Срок окупаемости.** Срок окупаемости капитальных вложений на внедрение ИИС характеризует период времени, в течение которого капитальные вложения на внедрение ИИС возмещаются за счет годового прироста прибыли (годовой экономии) от увеличения объема производства, снижения себестоимости и улучшения качества продукции, достигаемых в результате применения системы.

Дополнительными показателями экономической эффективности ИИС, характеризующими изменение степени полезного использования отдельных видов ресурсов и повышение технико-экономического уровня выпускаемой продукции в результате применения системы, являются увеличение объема производства, повышение производительности труда, снижение материала и энергоемкости производства, повышение фондоотдачи, улучшение качества продукции.

Источники экономической эффективности, характер и степень воздействия ИИС на технико-экономические показатели производства зависят от функциональных, алгоритмических, программных и технических решений, а также от особенностей объекта измерения и контроля. Обычно основной экономический эффект от применения ИИС получается благодаря улучшению функционирования объекта исследования в результате вывода его нерегламентированных режимов, вызванных внешними помехами.

В соответствии с существующей практикой планирования и с учетом мероприятий научно-технического прогресса годовой экономический эффект принято определять только на один расчетный год — первый полный календарный год после окончания планируемого (нормативного) срока освоения системы. Годовой экономический эффект от применения ИИС определяется по формуле

$$\mathcal{E} = P^A - E_n K_d^A,$$

где  $P^A$  — годовая экономия (годовой прирост прибыли) от функционирования ИИС, тыс. руб.;  $K_d^A$  — единовременные затраты, связанные с созданием и внедрением ИИС, тыс. руб.;  $E_n$  — среднеотраслевой нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, равный 0,15.

Расчетный коэффициент экономической эффективности характеризует величину годовой экономии и определяется по формуле

$$E_p = P^A / K_k^A,$$

где  $K_k^A$  — капитальные вложения на создание ИИС.

Для решения вопроса об экономической целесообразности капитальных вложений, затраченных на разработку ИИС, расчетный коэффициент экономической эффективности  $E_p$  сопоставляется с нормативным значением коэффициента экономической эффективности капитальных вложений на создание ИИС и внедрение вычислительной техники для данной отрасли  $E_{н.в.т.}$ . Этот коэффициент представляет собой нижнюю допустимую границу эффективности капитальных вложений на ИИС. Создание ИИС считается экономически целесообразным мероприятием, если расчетный коэффициент эффективности окажется не меньше нормативного:

$$E_p > E_{н.в.т.}$$

Если ИИС обеспечивает решение социальных и других специальных задач,  $E_{н.в.т.}$  может быть ниже нормативного.

Срок окупаемости капитальных вложений на разработку и внедрение ИИС представляет собой отношение капитальных вложений на создание системы к годовой экономии:

$$T_p = K_k^A / П^A.$$

#### 10.14. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ САПР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Из множества проблем интенсивного количественного и качественного проектирования измерительных информационных, а в последнее время и управляющих систем, формируемых в соответствии с концепцией «информационного общества», в мировой практике широко рассматриваются: первичные преобразователи информации; каналы связи; структуры измерительных информационно-управляющих систем (ИИУС).

При проектировании ИИУС выделяют два класса задач: поиск решения (solving) и собственно принятие решения (decision making) по выбору оптимального варианта.

В мировой практике известны несколько направлений: выбор оптимального варианта человеком без применения ЭВМ; выбор оптимального варианта ЭВМ; выбор оптимального варианта человеком с использованием рекомендаций ЭВМ; выбор оптимального варианта в результате диалога человека и ЭВМ с использованием САПР, автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) и информационно-поисковых систем.

В настоящее время основным элементом ИИУС является первичный преобразователь с программируемым устройством и

встроенными вспомогательными средствами. Эти устройства также способны выполнять все функции сбора, обработки и представления информации в реальном масштабе времени. Традиционные первичные преобразователи начинают уступать место, так как рассмотренные приборы способны осуществлять функции управления и экспериментом, и объектом без больших и дорогих ЭВМ.

С начала 1980-х годов локальные информационно-вычислительные сети (ЛИВС) получили широкое распространение среди каналов связи для передачи данных и распределенной обработки информации. В настоящее время ЛИВС служат для связи отдельных ЭВМ, процессоров, микропроцессоров, при создании ИИС, автоматизации объектов и др. Глобальные сети строятся в соответствии с 7-уровневой моделью взаимодействия открытых сетей, а локальные — в соответствии со стандартом IEEE-802.

Однако в последние годы широкий интерес вызывают интегральные цифровые сети (ИЦС). Как показывают теоретические исследования, эксперименты и конкретные разработки, ИЦС способны обеспечить наиболее эффективное использование ресурсов (пропускная способность каналов связи и производительности центров коммутации); унифицировать программные и технические средства; существенно расширить перечень режимов доставки; обеспечить гибкость, надежность и высокую экономическую эффективность, особенно при использовании волоконно-оптических систем.

Из всего многообразия структур при проектировании ИИС и ИИУС следует выделить комплексы: с иерархической структурой типа дерева; с иерархической структурой и перекрестными связями; с сетью распределенной обработки информации; с мультиплексным каналом передачи данных.

Так как проектирование сложных ИИУС обычно ведется в условиях неполной информации, в последнее время вместо различных вероятностно-статистических экспертных методов, теории нечетких размытых множеств, различных игр широко применяют энтропийные методы. Что касается использования полученной информации в управлении экспериментом, то все шире выдвигается на инженерный уровень проектирования математическая теория систем и такие понятия, как управляемость, стабильность и инвариантность.

К рассмотренному кругу задач следует добавить проблему системного анализа и синтеза «вход-выход» систем с распределенными параметрами и некоторые вопросы теории реализации.

Все это, по оценкам экспертов, обеспечит повышение производительности на 25... 50 %, сокращение сроков проектирования в 2...4 раза, улучшение технико-экономических показателей на 10... 25 %, экономию материалов на 5... 10 %.

## 10.15. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Наиболее полную информацию для оценки погрешности ИИС содержат функция распределения вероятностей  $F(x)$  и плотность распределения вероятностей  $f(x)$ , однако эти функции не всегда известны, тем более при проектировании систем. Наиболее часто применяются экспериментальные интегральные оценки и оценки доверительных интервалов и вероятностей.

Оценка систематической составляющей  $\tilde{\Delta}_c$  погрешности конкретного экземпляра средства измерений в точке  $X$  диапазона измерения определяется формулой

$$\tilde{\Delta}_c = \frac{\bar{\Delta}_m + \bar{\Delta}_r}{2},$$

где  $\bar{\Delta}_m$ ,  $\bar{\Delta}_r$  — средние значения погрешности в точке  $X$  диапазона измерений, полученных экспериментально при медленных измерениях информативного параметра входного сигнала средства измерений со стороны меньших (больших) значений  $X$ :

$$\bar{\Delta}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{mi}}{n}; \quad \bar{\Delta}_r = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{ri}}{n},$$

где  $n$  — число опытов при определении  $\bar{\Delta}_m$  и  $\bar{\Delta}_r$  ( $n \geq 1$ );  $\Delta_{mi}$ ,  $\Delta_{ri}$  — первая реализация (отсчет) погрешности средства измерений информативного параметра входного или выходного сигнала со стороны меньших (больших) значений до значения  $X$ .

**Примечание.** Если вариация не учитывается или отсутствует,  $\tilde{\Delta}_c$  определяется формулой

$$\tilde{\Delta}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i,$$

где  $n$  — число опытов при определении  $\tilde{\Delta}_c$  ( $n \geq 1$ );  $\Delta_i$  —  $i$ -я реализация (отсчет) погрешности средства измерений.

Оценка среднего квадрата отклонения  $\overset{\circ}{\sigma}(\Delta)$  случайной составляющей погрешности конкретного экземпляра средств измерений определяется формулой

$$\overset{\circ}{\sigma}(\Delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{mi} - \bar{\Delta}_m)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta_{ri} - \bar{\Delta}_r)^2}{2n - 1}}.$$

**Примечание.** Если вариация не учитывается или отсутствует, то

$$\tilde{\sigma}(\Delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta}_m)^2}{i-1}}.$$

Оценка погрешностей средств измерений, у которых наибольшее значение среднеквадратичного отклонения  $\tilde{\sigma}(\Delta)$  случайной составляющей погрешности не превышает  $q$  в процентах от предела допускаемого значения погрешности  $\Delta$ , определяется при  $n = 1$  как наибольшее по абсолютному значению из полученных экспериментально значений  $\Delta_m$  и  $\Delta_x$ , или как единственное полученное значение погрешности, если вариация не учитывается или отсутствует.

Для средств измерения, у которых наибольшее значение среднеквадратичного отклонения  $\tilde{\sigma}(\Delta)$  случайной составляющей погрешности превышает  $q$  в процентах от допускаемого значения  $\Delta_d$  погрешности  $\Delta$ , определяется как граница интервала, симметричного относительно нулевого значения погрешности, в который попадают  $p$  реализаций из общего числа  $n$  реализаций погрешностей. Значения  $n$  и  $p$  регламентируются в разделе «Методы испытаний» нормативно-технической документации, указанной в водной части стандарта.

Погрешности образцовой аппаратуры, применяемой при контроле метрологических характеристик, и число опытов (объем выработки) при поверке средств измерений, случайная составляющая погрешности которых соизмерима с систематической составляющей, должны устанавливаться в стандартах технических требований на отдельные виды средств измерений как функция вероятности брака контроля (поверки).

Оценка вариации  $b$  должна определяться как абсолютное значение разности между значениями  $\bar{\Delta}_m$  и  $\bar{\Delta}_\sigma$  (при  $n > 1$ ),  $\Delta_\sigma$  и  $\Delta_m$  (при  $n = 1$ ):

$$b = |\Delta_m - \Delta_\sigma|;$$

$$b = |\Delta_x - \Delta_\sigma|.$$

Значения характеристик могут корректироваться по мере накопления статистических данных в процессе серийного выпуска средств измерений. Если значения характеристик  $M[\Delta_c]$ ,  $\sigma(\Delta_c)$  и  $M[\Delta]$ ,  $\sigma(\Delta)$  отличаются от ранее установленных значений, это не может служить основанием для признания средств измерения негодными.

Оценка математического ожидания  $M(\Delta_c)$  систематической составляющей погрешности и математического ожидания  $M[\Delta]$  погрешности  $\Delta$  средств измерений данного типа определяется соответственно формулами:

$$M[\Delta_c] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta_{ci}; \quad M[\Delta] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta_i,$$

где  $m$  — количество средств измерений, используемых при оценке  $M[\Delta_c]$  и  $M[\Delta]$ ;  $\tilde{\Delta}_{ci}$ ,  $\tilde{\Delta}_i$  — значение величины  $\tilde{\Delta}_0$ ,  $\Delta$  для  $i$ -го экземпляра средств измерений.

Оценки среднеквадратичного отклонения систематической составляющей погрешности  $\tilde{\sigma}(\Delta_c)$  и среднеквадратичного отклонения  $\tilde{\sigma}(\Delta)$  погрешности  $\Delta$  средств измерений данного типа определяются соответственно формулами:

$$\tilde{\sigma}(\Delta_c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\tilde{\Delta}_{ci} - M[\Delta_c])^2}{m-1}}; \quad \tilde{\sigma}(\Delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\tilde{\Delta}_i - M[\Delta])^2}{m-1}}.$$

Оценка нормализованной автокорреляционной функции

$$r \overset{\circ}{\Delta}(\lambda) = \frac{1}{(n - \frac{\lambda}{T_0}) \overset{\circ}{D}(\Delta)} \sum_{i=1}^{i=n-\frac{\lambda}{T_0}} (\Delta_i - \bar{\Delta})(\Delta_i + \frac{\lambda}{T} - \bar{\Delta}),$$

где  $n$  — число отсчетов погрешностей при определении автокорреляционной функции;  $T_0$  — интервал времени между двумя последовательными отсчетами;  $\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i$  для средств измерений,

допускающих плавное изменение входной величины, отсчеты берутся при подходе к данной точке диапазона измерения только с одной (любой) стороны,  $\Delta_i$  —  $i$ -я реализация (отсчет) погрешности

допускающих плавное изменение входной величины, отсчеты берутся при подходе к данной точке диапазона измерения только с одной (любой) стороны,  $\Delta_i$  —  $i$ -я реализация (отсчет) погрешности

$$\overset{\circ}{D}[\overset{\circ}{\Delta}] = \frac{1}{n-1} \sum (\Delta_i - \bar{\Delta})^2.$$

## 10.16. ИНТЕРФЕЙСЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Интерфейс** — совокупность цепей, объединяющих различные устройства и алгоритмы, определяющая порядок передачи информации между этими устройствами.

Цепи интерфейса делятся на три группы: информационные, адресные и управляющие.

Различают программные и физические интерфейсы. Информация передается в виде кодов определенного числа или словами.

Для различия байтов данных, команд и адресов используются осведомительные сигналы. Для инициирования передач, синхронизации работы устройств и завершения передачи служат управляющие сигналы.

Основной характеристикой интерфейса является скорость передач информации, которая зависит от алгоритма передачи и технических характеристик цепей связи.

С целью модульного принципа построения систем разработаны стандартные интерфейсы, обеспечивающие информационную, электрическую и конструктивную совместимость различных устройств. К настоящему времени появились структуры интерфейсов: одноступенчатые и двухступенчатые с возможными вариантами исполнения: цепочная, радиальная, магистральная, радиально-магистральная, каждая из которых может быть с централизованным или децентрализованным управлением.

Обмен информацией может быть осуществлен синхронным и асинхронным методами.

Синхронный метод передачи и приема сигналов производится в фиксированные моменты времени. Темп обмена информацией при асинхронном методе определяется сигналом квитирования. Этот метод особенно эффективен при обмене информацией с различным быстродействием функциональных блоков.

В ИИС используются следующие основные интерфейсы: EEEE-480, ISA, EISA, PSKI, PCI, RS-232, RS-485, КАМАК, PDP-11, а также системные интерфейсы: 8, 16, 32-разрядных микроЭВМ и др.

Приборный интерфейс предназначен для взаимодействия программируемых и непрограммируемых приборов и построения на их основе измерительных информационных систем. Соединение приборов осуществляется через многопроходный магистральный канал общего пользования (КОП, зарубежный аналог IEEE-488) длиной не более 20 м. Число приборов, подключаемых к магистрали, не должно превышать 15. Обмен информацией между приборами происходит под управлением контроллера. Всего регламентируется десять интерфейсных функций. Каждая функция позволяет прибору выполнять прием, передачу и определенную обратную обработку сообщений. Функции могут быть реализованы как аппаратно, так и программно.

Интерфейс КАМАК применяется для разветвленных систем сбора информации с большим числом первичных преобразователей и служит для построения ИИС с двумя уровнями централизации.

Основными конструктивами являются крейт, модуль, стойка.

Крейт (каркас) имеет 25 станций (ячеек), в которые вставляются модули (вставные кассеты). Из них 23 станции — рабочие, служат для включения модулей, две вводятся для контроллера крейт-



та (КК). Функциональные блоки (ФБ) могут располагаться произвольно, так как адрес каждому ФБ присваивается после его установки в крейт.

Структурная схема системы в стандарте КАМАК представлена на рис. 10.26.

Магистраль крейта состоит из 81 сквозной шины, проходящей через все модули, и двух индивидуальных шин связи каждого управляемого модуля с контроллером крейта. Внутри крейтовые связи образуют горизонтальный интерфейс системы КАМАК (Dataway). Крейты связываются между собой и с центральной ЭВМ верхнего уровня. Межкрейтовые связи проходят через контроллеры крейтов и строятся по принципам ветви (до семи крейтов вертикальный) или замкнутого кольца. Эти связи образуют интерфейс си-

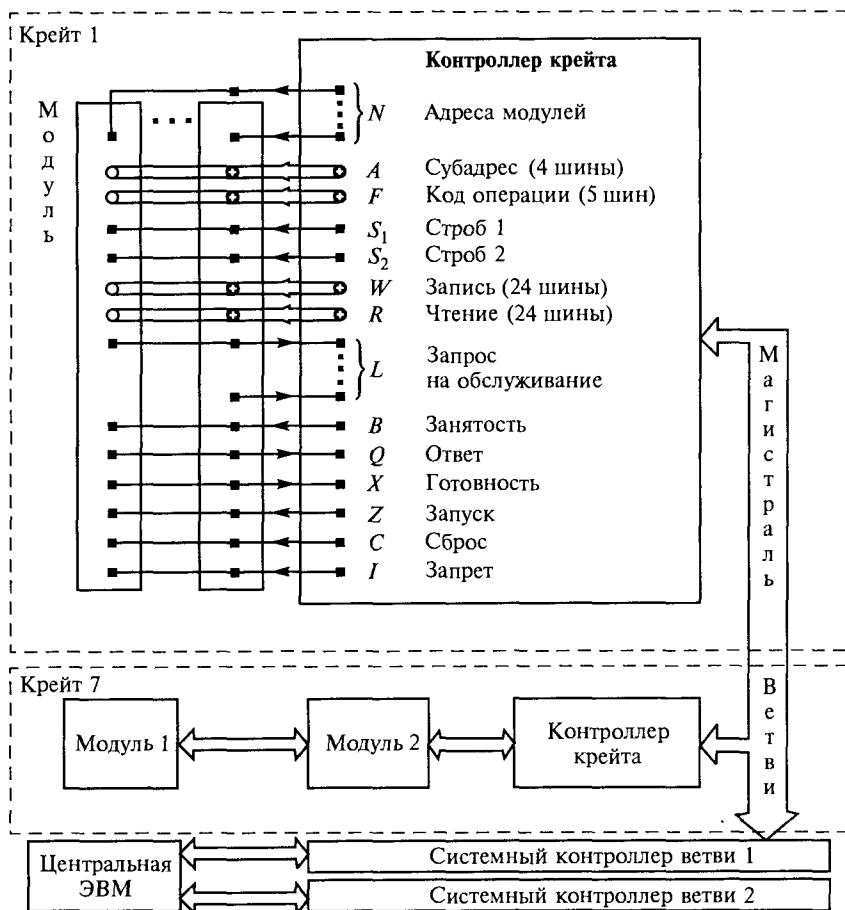


Рис. 10.26. Структурная схема системы в стандарте КАМАК

стемы КАМАК (Branch highway). Структура КАМАК, таким образом, пирамидальная и включает в себя 2...4 уровня: верхний — ЭВМ; второй — контроллеры ветвей; третий — контроллеры крейтов; четвертый — управляемые модули. Однокрейтовые системы двухуровневые.

Основной принцип, заложенный в системе КАМАК, — принцип использования центральной ЭВМ, направление протоколов команд и информации жестко связано. Для защиты от помех используются экранирование, заземление, согласование характеристик линий связи, а также контроль по четности и повторение передачи кодов.

Основной недостаток системы — большая аппаратурная избыточность и наличие сложной системной части практически в каждом модуле, большая стоимость интерфейса и всей системы в целом. Поэтому стандарт КАМАК следует использовать только в слоеных ИИС.

**Интерфейсы периферийной части ЭВМ.** Интерфейс «Общая шина» разработан для связи центрального процессора семейства IBM, где используется магистральная система шин с отдельными объединенными шинами для адресных сигналов и данных, а также отдельной шиной для сигналов управления. К каналу обмена информацией между отдельными функциональными блоками ЭВМ можно подключать дополнительные блоки памяти и различные устройства ввода-вывода. Такое расширение возможностей ЭВМ позволяет использовать ее в ИИС, АСУТП и строить на ее базе ИВК.

Обмен информацией между функциональными блоками происходит асинхронно по каналу, который представляет собой магистраль, состоящую из 38 линий (рис. 10.27).

Интерфейс 2К предназначен для ЭВМ, совместимого с HP.

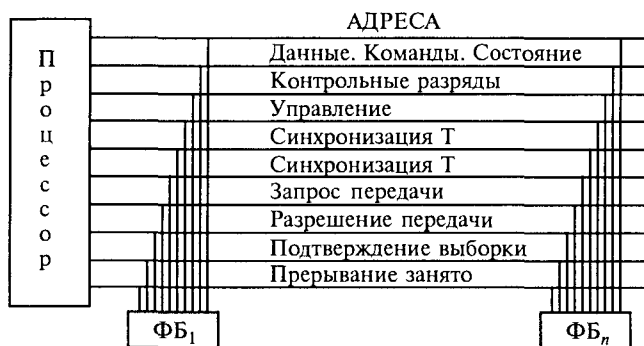


Рис. 10.27. Структурная схема интерфейса «Общая шина»

Наибольшее распространение в мировой практике получили ЭВМ фирмы IBM и HP. К сожалению, российские компьютеры не выдержали конкуренции.

Следует отметить специальные промышленные компьютеры фирм Digital Equipment (DE), (CUIA)-PDP-8 и PDP-11, а затем 7531/32 на базе Intel 80286-80486; Texas Micro(США)-486DK и Pentium; Hewlet Pakard модели 745/747i. Память 16... 128 Мбайт с ОСРВ.

Микропроцессоры и микроЭВМ в ИИС используют для связи приборов в единый комплекс и выполнения следующих функций: контроллерных, вычислительных, тестовых, сервисных и распределенной обработки данных. Кроме того, необходимо отметить функции метасистемы, обеспечивающей выполнение всех перечисленных выше функций и их согласование между собой.

**Контроллерные функции.** Их можно подразделить на ряд подфункций:

*управление измерительной цепью*, т.е. переключение каналов и диапазонов, подключение образцовых мер;

*управление измерительными усилителями.*

Обычно они выполняются чисто программными методами, иногда с участием таймера — с помощью микропроцессора и портов ввода-вывода;

*управление аналого-цифровым преобразователем;*

*управление средствами общения с оператором* — управление клавиатурой, индикаторами, звуковой сигнализацией и дисплеем;

*управление регистраторами*, т.е. печатающими устройствами, самописцами, графопостроителями, накопителями на магнитных носителях;

*управление внешней памятью*, т.е. быстродействующие накопители на магнитной ленте в режиме двухстороннего обмена на дисках и дополнительные внешние модули памяти.

**Вычислительные функции.** К ним относятся первичная, вторичная и окончательная обработка данных. Сюда относятся: калибровка, нормализация, масштабирование, фильтрация, сжатие данных, распознавание, устранение ошибок, статистическая обработка, корреляционный, спектральный, амплитудно-временной анализ и др.;

**Тестовые функции.** К этим функциям относятся обнаружение и локализация неисправности, в большинстве случаев до типового элемента. Известны три класса тестирования: 1) с применением внешних микропроцессорных средств; 2) полностью автономное тестирование; 3) комбинированное.

Для первого класса применяются специальные тестеры микроЭВМ. Программы тестирования входят в программное обеспечение тестера или самой системы. Для второго класса — функции тестирования чаще всего выполняет основной процессор ИИС,

однако возможно наличие специального микропроцессорного узла, предназначенного только для автоматической диагностики. Тестирование производится в двух основных режимах: определения работоспособности, диагностики неисправности. При этом хранение программы тестирования может быть осуществлено либо во внешнем устройстве памяти, если оно имеется в ИИС, либо в тестовом ПЗУ.

**Сервисные функции.** Они расширяют возможности измерительных приборов и систем со всесторонними микропроцессорами или микроЭВМ, увеличивающими объем информации, число режимов измерений и обработки, число параметров и их комбинаций, число дополнительных директив, объем визуальной и звуковой информации, число альтернативных вариантов измерений и обработки.

При этом можно выделить ряд этапов измерения и анализа с применением диалога: ввод задания, сбор и предварительную обработку первичной информации, вторичную обработку и интерпретацию результатов, вывод результатов исследования для интерпретации документации, архивации и управления.

**Распределенная обработка данных.** Вычислительные функции распределяются между программируемыми контроллерами. Возможность распределения обработки данных обеспечивает высокую надежность управления измерительной информационной системой.

Таким образом, использование микропроцессоров и микроЭВМ в ИИС повышает точность, быстродействие, надежность, помехоустойчивость; расширяет динамический диапазон измерений; улучшает конструктивные показатели, качество метрологического обеспечения; расширяет многофункциональность системы; повышает удобство представления, хранения, регистрации, что способствует созданию интеллектуальных приборов и систем и ремонтпригодности аппаратуры за счет повышения степени взаимозаменяемости, самоконтроля, диагностики, автоподстройки.

Выбор микропроцессора или ЭВМ определяется техническим заданием на ИИС и зависит от необходимого числа входов-выходов, их типа (аналоговый, дискретный) и объема необходимой памяти.

**Интеллектуальные измерительные системы.** Интеллектуальные измерительные системы способны выполнять все функции измерения и контроля в реальном масштабе времени. Это позволяет системе осуществлять функции измерения и контроля «высокого уровня» без использования больших и дорогих ЭВМ. При автономном функционировании такая система обеспечивает непрерывные измерения и контроль заданных параметров, сбор данных и обработку сигналов. Модульная конструкция позволяет осуществлять постепенное расширение существующей системы пу-

тем введения дополнительных модулей и, наконец, превращение ее в систему средств супервизорного или цифрового управления измерительным экспериментом путем включения в нее миниЭВМ.

Интеллектуальные измерительные системы могут индивидуально программироваться на выполнение специфических задач, используя программируемый терминал (программатор) для ввода параметров конфигурирования. Системы обычно имеют средства представления информации: дисплей для визуализации мнемонических символов команд, цифровые индикаторы, дающие оператору всю необходимую информацию, а также клавиши переключения видов работы. Резервный блок питания обеспечивает сохранность программы при отключении питания на длительный период времени.

Интеллектуальные измерительные системы имеют значительные преимущества перед традиционными, описанными выше:

*универсальность* — стандартные интерфейсы обеспечивают простое подключение к любым системам и оборудованию;

*высокая надежность* на каждом системном уровне, а также применение четко определенных и универсальных методов обеспечивают безотказную работу;

*высокое быстродействие* контуров управления процессами измерения и контроля любого производства, а также высокая скорость сбора данных;

*взаимозаменяемость* — важное свойство, поскольку интеллектуальные системы выпускаются в виде стандартных устройств, индивидуально программируемых в расчете на их специфические функции, каждое из них может быть заменено другим того же функционального назначения. Поэтому каждая система может рассматриваться как резервная для любого типа систем того же класса, что снижает число дополнительных резервных средств измерения, контроля и регулирования и сводит к минимуму аварийный период в маловероятном случае выхода из строя какого-либо элемента.

**Структуры и алгоритмы.** Структуры интеллектуальных измерительных систем интегрируют в себе все лучшие стороны рассмотренных в этом разделе систем, но более насыщены микропроцессорной и вычислительной техникой.

Применение интеллектуальных измерительных систем позволяет создать алгоритмы измерений, которые учитывают рабочую, вспомогательную и промежуточную информацию о свойствах объекта измерений, условия измерений, предъявляемые специфические требования и накладываемые ограничения. Обладая способностью к перенастройке в соответствии с изменяющимися условиями функционирования, интеллектуальные алгоритмы позволяют повысить метрологический уровень измерений.

## Контрольные вопросы

1. Что такое информационная технология?
2. Дайте определение понятий «система» и «измерительная информационная система».
3. Назовите этапы развития ИИС.
4. Какова роль ИИС в системах автоматического контроля, управления, диагностики, распознавания образов, АСУТП и АСУП?
5. Назовите области применения ИИС.
6. Каково назначение математических моделей объектов измерений и исследований?
7. Назовите методы описания структур и алгоритмов работы ИИС.
8. Изобразите графически структурную схему и опишите с помощью содержательных логических схем алгоритмов любой канал измерения, используемый у вас на предприятии.
9. Объясните обобщенную структурно-функциональную схему ИИС.
10. Дайте определение измерительных систем, систем автоматического контроля, технической диагностики, распознавания образов, телеизмерения, телеконтроля и телесигнализации.
11. Объясните классификационные признаки построения ИИС.
12. Назовите устройства индикации, записи и хранения информации.
13. Перечислите известные вам интерфейсы, используемые в ИИС.
14. Расскажите о назначении, характеристиках и структурах интерфейсов в ИИС.
15. В чем разница синхронного и асинхронного обмена информацией?
16. Назовите основные характеристики интерфейса КАМАК.
17. Назовите особенности приборного интерфейса.
18. Сравните интерфейсы КАМАК, приборный И-41 и оцените области их применения.
19. Расскажите об интерфейсах периферийной части ЭВМ.
20. Каковы функции, выполняемые ЭВМ в ИИС?
21. Назовите основные виды модуляции аналоговых сигналов в ИИС.
22. Дайте обоснование необходимости унификации сигналов и назовите известные унифицирующие преобразователи (тока, напряжения, частоты).
23. Каковы основные измерительные характеристики измерительных коммутаторов (контактных и бесконтактных)?
24. Расскажите о мерах по защите аналоговых измерительных цепей от продольных и поперечных помех.
25. Назовите достоинства и недостатки структур: параллельного действия (многоканальной); с общей образцовой мерой (мультиплицированной); параллельно-последовательного действия (многоточечной, коммутаторной); последовательного (сканирующего) действия.
26. Каковы основные структуры ИС и их разновидности? В чем различие между ними?
27. В каких целях используются программируемые вычислительные средства в системах измерения независимых входных величин? Перечислите функции микропроцессоров в измерительных приборах.

28. В чем особенности статистических характеристик случайных величин?

29. Назовите численные характеристики случайных процессов и приведите алгоритмы измерения этих величин.

30. Каковы основные особенности статистических измерительных систем для анализа нестационарных случайных процессов?

31. Приведите аналитические выражения и виды корреляционных функций.

32. Начертите структурные схемы систем для измерения корреляционных функций.

33. Приведите аналитические выражения, графическое изображение спектральной плотности и структурные схемы систем спектральных анализаторов.

34. Каковы основные особенности статистических измерительных систем для анализа характеристик нестационарных случайных?

35. Каковы функции и основные особенности систем автоматического контроля (АСК)?

36. В чем сложность и различие измерительных и контролирующих систем? Какова роль измерения при контроле?

37. Начертите структурную схему системы автоматического контроля с параллельным выполнением операций.

38. Каким образом производится оценка эффективности и стоимости систем автоматического контроля?

39. В чем разница между аппаратным и программным способами сравнения?

40. Начертите структурную схему САК:

а) параллельного действия;

б) последовательного действия;

в) для контроля с выдачей результатов контроля, измерения и сигналов в систему управления;

г) для схемы цифровой сканирующей САК.

41. Каково назначение и основные структуры систем технической диагностики?

42. Перечислите основные способы построения программ поиска независимостей.

43. Каковы различия, преимущества и недостатки последовательного и комбинаторного методов поиска неисправностей?

44. Как используются микропроцессорные комплексы и ЭВМ при создании СТД?

45. Назовите основные стадии проектирования ИИС.

46. Расскажите о трех возможных направлениях создания ИИС.

47. Каковы цель и содержание технического задания на проектирование ИИС?

48. Какие этапы предусматривается выполнять на стадии технического предложения?

49. Как обеспечивается техническая, информационная, программная, метрологическая и конструктивная совместимость всех функциональных элементов ИИС?

50. Какие требования предъявляются к стадиям эскизного и технического проектов на стадии ИИС?

51. Каковы состав и требования к стадии «рабочая документация» ИИС?

52. Что такое САПР и как эти системы используются при проектировании ИИС?

53. Каковы показатели точности и формы представлений результатов измерений?

54. Что понимается под погрешностями измерений?

55. Расскажите о критериях оценки погрешности. Оцените полную погрешность измерительной информационной системы.

56. Каковы перспективы при создании первичных и вторичных преобразователей?

57. В чем трудности создания измерительных информационных и управляющих систем (ИИУС)?

58. Назовите известные вам ИИС и ИИУС четвертого поколения, выпускаемые серийно.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### ОСНОВНЫЕ И ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ

Таблица П.1

#### Основные единицы

Величина	Символ	Наименование	Обозначение	Размерность
Длина	$l$	Метр	м	$L$
Масса	$m$	Килограмм	кг	$M$
Время	$t$	Секунда	с	$T$
Электрический ток	$I$	Ампер	А	$I$
Температура	$T, \theta$	Кельвин	К	$\theta$
Сила света	$I_v$	Кандела	кд	$J$

Таблица П.2

#### Производные механические единицы

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Плоский угол	$\alpha, \beta, \theta, \varphi$	РадIAN	рад	—
Телесный угол	$\omega$	Стерaдиан	ср	—
Площадь	$A$	Квадратный метр	$m^2$	$L^2$
Объем	$V$	Кубический метр	$m^3$	$L^3$
Частота	$f$	Герц	Гц	$T^{-1}$

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Угловая частота	$\omega$	Радиан в секунду	рад/с	$T^{-1}$
Скорость	$v$	Метр в секунду	м/с	$LT^{-1}$
Ускорение	$a$	Метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>	$LT^{-2}$
Угловая скорость	$\omega$	Радиан в секунду	рад/с	$T^{-1}$
Угловое ускорение	$\alpha$	Радиан на секунду в квадрате	рад/с <sup>2</sup>	$T^{-2}$
Длина волны	$\lambda$	Метр	м	$L$
Частота вращения	$n$	Оборот в секунду	об/с	$T^{-1}$
Плотность	$\rho$	Килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>	$ML^{-3}$
Вес	$W$	Ньютон	Н	$MLT^{-2}$
Удельный вес	$\gamma$	Ньютон на кубический метр	Н/м <sup>3</sup>	$ML^{-2}T^{-2}$
Сила	$F$	Ньютон	Н	$MLT^{-2}$
Давление	$p$	Паскаль	Па	$ML^{-1}T^{-2}$
Момент силы	$M$	Ньютон-метр	Н · м	$ML^2T^{-2}$

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Вращающий момент	$T$	Ньютон-метр	Н · м	$ML^2 T^{-2}$
Работа	$w$	Джоуль	Дж	$ML^2 T^{-2}$
Мощность	$P$	Ватт	Вт	$ML^2 T^{-3}$
Энергия	$E$	Джоуль	Дж	$ML^2 T^{-2}$
КПД	$\eta$	—	—	—
Напряженность гравитационного поля	$g$	Ньютон на килограмм	Н/кг	$LT^{-2}$

Таблица П.3

## Производные единицы электрических величин

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Количество электричества	$Q$	Кулон	Кл	$TI$
Электрический момент диполя	$p$	Кулон-метр	Кл · м	$LTI$
Поляризуемость	$P$	Кулон на квадратный метр	Кл/м <sup>2</sup>	$L^{-2} TI$
Диэлектрическая проницаемость вакуума	$\epsilon_0$	Фарад на метр	Ф/м	$L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Напряженность электрического поля	$E$	Вольт на метр	В/м	$LMT^{-3}I^{-1}$
Поток электрического смещения	$\psi, \Phi_e$	Кулон	Кл	$TI$
Плотность потока электрич. смещения	$D$	Кулон на квадратный метр	Кл/м <sup>2</sup>	$L^{-2}TI$
Электрический потенциал	$V$	Вольт	В	$L^2MT^{-3}I^{-1}$
Емкость	$C$	Фарад	Ф	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$
Сопротивление	$R$	Ом	Ом	$L^2MT^{-3}I^{-2}$
Удельное сопротивление	$\rho$	Ом-метр	Ом · м	$L^3MT^{-3}I^{-2}$
Проводимость	$G$	Сименс	См	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$
Удельная проводимость	$\gamma$	Сименс на метр	См/м	$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$
Плотность тока	$I$	Ампер на квадратный метр	А/м <sup>2</sup>	$L^{-2}I$
Плотность электрической энергии	$u_e$	Джоуль на кубический метр	Дж/м <sup>3</sup>	$ML^{-1}T^{-2}$
Реактивное сопротивление	$X$	Ом	Ом	$L^2MT^{-3}I^{-2}$

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Импеданс	$Z$	Ом	Ом	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$
Адмитанс (полная проводимость)	$Y$	Сименс	См	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$
Электрическая мощность	$P$	Ватт	Вт	$M L^2 T^{-3}$
Электрическая энергия	$W, U$	Джоуль	Дж	$M L^2 T^{-2}$
Характеристическое сопротивление	$Z_0$	Ом	Ом	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$
Угол потерь	$\delta$	Радіан	рад	—

Таблица П.4

## Производные единицы магнитных величин

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Магнитный скалярный потенциал	$U_m$	Ампер	А	$I$
Напряженность магнитного поля	$H$	Ампер на метр	А/м	$L^{-1} I$
Магнитный поток	$\Phi$	Вебер	Вб	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$
Магнитная индукция	$B$	Тесла	$T$	$M T^{-2} I^{-1}$

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Магнитный векторный потенциал	$A$	Вебер на метр	Вб/м	$LMT^{-2}I^{-1}$
Магнитодвижущая сила	$I$	Ампер-виток	Ав	$I$
Магнитная восприимчивость	$\chi_m$	—	—	—
Магнитная проницаемость	$\mu$	Генри на метр	Г/м	$LMT^{-2}I^{-2}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	Генри на метр	Г/м	$LMT^{-2}I^{-2}$
Относительная магнитная проницаемость	$\mu_r$	—	—	—
Магнитный момент диполя	$m$	Ампер-квадратный метр	$A \cdot m^2$	$L^2 I$
Индуктивность	$L$	Генри	Г	$L^2 MT^{-2} I^{-2}$
Взаимная индуктивность	$M$	Генри	Г	$L^2 MT^{-2} I^{-2}$
Магнитное сопротивление	$R$	Ампер на вебер	А/Вб	$L^{-2} M^{-1} T^2 I^2$
Магнитная проводимость	$P$	Вебер на ампер	Вб/А	$L^2 MT^{-2} I^{-2}$
Намагниченность	$J$	Ампер на метр	А/м	$L^{-1} I$
Число витков	$N, n$	—	—	—

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Коэффициент потерь на гистерезис	$k_h$	—	—	—
Коэффициент вихревых токов	$k_e$	—	—	—

Таблица П.5

## Производные единицы оптических величин

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Энергия излучения	$W$	Джоуль	Дж	$ML^2T^{-2}$
Поток излучения	$P$	Ватт	Вт	$ML^2T^{-3}$
Сила излучения	$I_e, i_e$	Ватт на стерадиан	Вт/ср	$ML^2T^{-3}$
Энергетическая яркость	$L_e$	Ватт на стерадиан на квадратный метр	Вт/(ср · м <sup>2</sup> )	$M^{-1}L^2T^{-3}$
Энергетическая светимость	$M_e$	Ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	$M^{-1}L^2T^{-3}$
Энергетическая освещенность	$E_e$	Ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	$M^{-1}L^2T^{-3}$
Световая энергия	$Q_V$	Люмен-секунда	лм · с	$JT$
Световой поток	$\Phi_V$	Люмен	лм	$J$

Величина	Символ	Наименование единицы	Обозначение единицы	Размерность
Светимость	$M_V$	Люмен на квадратный метр	лм/м <sup>2</sup>	$JL^{-2}$
Освещенность	$E_V$	Люкс	лк	$JL^{-1}$
Яркость	$f_V$	Кандела на квадратный метр	кд/м <sup>2</sup>	$JL^{-2}$
Световая отдача	$K(\lambda)$	Люмен на ватт	лм/Вт	$JM^{-1}L^{-2}T^3$
Полная световая эффективность	$K_t$	Люмен на ватт	лм/Вт	$JM^{-1}L^{-2}T^3$

Таблица П.6

**Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц**

Множитель	Наименование приставки	Обозначение приставки	Множитель	Наименование приставки	Обозначение приставки
$10^{18}$	Экса	Э	$10^{-1}$	Деци	д
$10^{15}$	Пета	П	$10^{-2}$	Санتي	с
$10^{12}$	Тера	Т	$10^{-3}$	Милли	м
$10^9$	Тига	Г	$10^{-6}$	Микро	мк
$10^6$	Мега	М	$10^{-9}$	Нано	н
$10^3$	Кило	К	$10^{-12}$	Пико	п
$10^2$	Гекто	Г	$10^{-15}$	Фемто	ф
10	Дека	Да	$10^{-18}$	Атто	а



## Греческий алфавит

Название буквы	Прописная	Строчная	Общепринятое потребление
Альфа	Α	α	Угол, коэффициент, ослабление, коэффициент поглощения
Бета	Β	β	Угол, коэффициент, фаза
Гамма	Γ	γ	Удельный вес, проводимость, постоянная распространения
Дельта	Δ	δ	Плотность, угол, инкремент или декремент, диэлектрическая проницаемость
Эпсилон	Ε	ε	Натуральный логарифм, диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая постоянная
Дзета	Ζ	ζ	Координата, коэффициент, импеданс
Эта	Η	η	КПД, напряженность поля, гистерезис
Тета	Θ	θ	Угол, магнитное сопротивление, постоянная времени
Йота	Ι	ι	Инерция, единичный вектор
Каппа	Κ	κ	Восприимчивость, коэффициент связи
Ламбда	Λ	λ	Магнитная проводимость, длина волны, ослабление
Мю	Μ	μ	Коэффициент трения, проницаемость, усиление
Ню	Ν	ν	Частота, удельное магнитное сопротивление, вязкость
Кси	Ξ	ξ	Координаты
Пи	Π	π	3,1416 (отношение длины окружности к ее диаметру)
Ро	Ρ	ρ	Удельное сопротивление, координаты, плотность заряда
Сигма	Σ	σ	Отклонение, удельная проводимость, утечка

Название буквы	Прописная	Строчная	Общепринятое потребление
Тау	Т	τ	Постоянная времени, плотность, коэффициент пропускания
Фи	Ф	φ	Угол, поток, фаза
Хи	Х	χ	Магнитное сопротивление, восприимчивость, угол
Пси	Ψ	ψ	Угол, фаза, поток электрического смещения
Омега	Ω	ω	Сопротивление (омы), угловая скорость

**ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВОПОЛАГАЮЩИХ СТАНДАРТОВ****Государственные испытания СИ**

1. 8.001—80 «ГСИ. Организация и порядок проведения государственных испытаний СИ».
2. 8.383—80 «ГСИ. Государственные испытания СИ. Основные положения».
3. 8.384—80 «ГСИ. Организация и порядок проведения метрологической экспертизы технических заданий на разработку СИ».
4. 8.002—86 «ГСИ. Государственный надзор и ведомственный контроль за СИ».
5. 8.008—72 «ГСИ. Методы и средства поверки приборов контроля пневматических показывающих и регистрирующих ГСП».

**Нормирование и использование метрологических характеристик СИ**

6. 8.009—84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики СИ». Методический материал по применению ГОСТ 8.009—84.
7. РД 50-453—84 Методические указания. «Характеристики погрешности СИ в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета».
8. 8.012—72 «ГСИ. Методы и средства поверки милливольтметров пиromетрических».
9. 8.015—72 «ГСИ. Методика выполнения измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков из тонколистовых материалов в диапазоне частот от 9 до 100 ГГц».
10. 8.8.019—85 «ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для СИ тангенса угла потерь».
11. 8.8.021—84 «ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для СИ массы».
12. 8.8.027—89 «ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для СИ электродвижущей силы и постоянного напряжения».
13. 8.028—86 «ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для СИ электрического сопротивления».
14. 8.029—80 «ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для СИ индуктивности».
15. 8.051—81 «ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм».
16. 8.057—80 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения».
17. 8.061—80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение».
18. 8.065—85 «ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для СИ силы».
19. 8.097—73 «ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для СИ напряженности магнитного поля в диапазоне частот от 0,01 до 300 МГц».

20. 8.109—83 «ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для СИ коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний».
21. 8.110—74 «ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для СИ коэффициента нелинейных искажений в диапазоне частот от 20 до 1 000 000 Гц».
22. 8.117—82 «ГСИ. Вольтметры диодные компенсационные. Методы и средства поверки».
23. 8.118—85 «ГСИ. Вольтметры электронные аналоговые переменного тока. Методика поверки».
24. 8.119—85 «ГСИ. Вольтметры электронные селективные. Методика поверки».
25. 8.132—74 «ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для СИ силы тока 0,04—300 А в диапазоне частот 0,1 — 300 МГц».
26. 8.146—75 «ГСИ. Манометры дифференциальные показывающие и самопишущие с интеграторами ГСП. Методика поверки».
27. 8.157—75 «ГСИ. Шкалы температурные практические».
28. 8.206—76 «ГСИ. Генераторы импульсов измерительные. Методы и средства поверки».
29. 8.207—76 «ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения».
30. 8.212—84 «ГСИ. Меры электродвижущей силы. Элементы нормальные. Методика поверки».
31. 8.216—88 «ГСИ. Трансформаторы напряжения. Методика поверки».
32. 8.217—87 «ГСИ. Трансформаторы тока. Методика поверки».
33. 8.237—77 «ГСИ. Катушки электрического сопротивления измерительные. Методы и средства поверки».
34. 8.254—77 «ГСИ. Приемники измерительные. Методы и средства поверки в диапазоне частот 1—37,5 ГГц».
35. 8.256—77 «ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых СИ. Основные положения».
36. 8.259—77 «ГСИ. Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные. Методы и средства поверки».
37. 8.261—77 «ГСИ. Гальванометры. Методы и средства поверки».
38. 8.278—78 «ГСИ. Делители напряжения постоянного тока измерительные. Методы и средства поверки».
39. 8.279—78 «ГСИ. Термометры стеклянные жидкостные рабочие. Методы и средства поверки».
40. 8.280—78 «ГСИ. Потенциометры и уравновешенные мосты автоматические. Методы и средства поверки».
41. 8.294—85 «ГСИ. Мосты переменного тока уравновешенные. Методика поверки».
42. 8.311—78 «ГСИ. Осциллографы электронно-лучевые универсальные. Методы и средства поверки».
43. 8.314—78 «ГСИ. Генераторы низкочастотные измерительные. Методы и средства поверки».

44. 8.315—91 «ГСИ. Стандартные образцы. Основные положения, порядок разработки, аттестации, утверждения, регистрации и применения».
45. 8.326—89 «ГСИ. Метрологическая аттестация СИ».
46. 8.333—78 «ГСИ. Компенсаторы переменного тока. Методы и средства поверки».
47. 8.334—78 «ГСИ. Измерители коэффициента шума транзисторов и приемников СВЧ-диапазона. Методы и средства поверки».
48. 8.335—78 «ГСИ. Меры твердости образцовые. Методы и средства поверки».
49. 8.350—79 «ГСИ. Амперметры высокочастотные. Методы и средства поверки».
50. 8.351—79 «ГСИ. Линии измерительные. Методы и средства поверки».
51. 8.372—80 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Порядок разработки, утверждения, регистрации, хранения и применения».
52. 8.381—80 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей».
53. 8.391—80 «ГСИ. Счетчики электрической энергии постоянного тока. Методы и средства поверки».
54. 8.394—80 «ГСИ. Образцовые меры добротности Q-0272-2 2-го разряда. Методы и средства поверки».
55. 8.395—80 «ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования».
56. 8.401—80 «ГСИ. Классы точности СИ. Общие требования».
57. 8.409—81 «ГСИ. Омметры. Методы и средства поверки».
58. 8.417—81 «ГСИ. Единицы физических величин».
59. 8.437—81 «ГСИ. Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения».
60. 8.449—81 «ГСИ. Мосты постоянного тока измерительные. Методы и средства поверки».
61. 8.458—82 «ГСИ. Преобразователи и компараторы термоэлектрические образцовые. Методы и средства поверки».
62. 8.461—82 «ГСИ. Термопреобразователи сопротивления. Методы и средства поверки».
63. 8.475—82 «ГСИ. Стандартный коэффициент шума и эквивалентная шумовая температура усилительных и приемных устройств. Методика выполнения измерений».
64. 8.478—82 «ГСИ. Потенциометры постоянного тока измерительные. Методы и средства поверки».
65. 8.497—83 «ГСИ. Амперметры, вольтметры, ваттметры, варметры. Методы и средства поверки».
66. 8.498—98 «ГСИ. Государственная поверочная схема для СИ электрической добротности».
67. 8.508—84 «ГСИ. Метрологические характеристики СИ и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля».
68. 8.513—84 «ГСИ. Поверка СИ. Организация и порядок проведения».

69. 8.525—85 «ГСИ. Установки высшей точности для воспроизведения единиц физических величин. Порядок разработки, аттестации, регистрации, хранения и применения».

70. 8.544—86 «ГСИ. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь твердых диэлектриков. Методика выполнения измерений в диапазоне частот 1 — 10 Гц».

71. 8.563—96 «ГСИ. Методики выполнения измерений».

72. 8.564—98 «ГСИ. Государственная поверочная схема для СИ электрической емкости в диапазоне частот 1 — 100 МГц».

73. 8.568—97 «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения».

### **Приборы для электрических и магнитных измерений**

74. ГОСТ 14265—79 «Приборы электроизмерительные аналоговые контактные прямого действия. Общие технические условия».

75. ГОСТ 1954—82 «Меры электродвижущей силы. Элементы нормальные. Общие технические условия».

76. ГОСТ 8042—93 «Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 1. Особые требования к вспомогательным частям».

77. ГОСТ 8711—93 «Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 2. Особые требования к амперметрам и вольтметрам».

78. ГОСТ 9245—79 «Потенциометры постоянного тока измерительные. Общие технические условия».

79. ГОСТ 11282—93 «Резистивные делители напряжения постоянного тока».

80. ГОСТ 23624—79 «Трансформаторы тока измерительные лабораторные. Общие технические условия».

81. ГОСТ 23625—79 «Трансформаторы напряжения измерительные лабораторные. Общие технические условия».

82. ГОСТ 26033—91 «Усилители измерительные постоянного тока и напряжения постоянного тока. Общие технические требования и методы испытаний».

### **Приборы для измерения электрической мощности и количества электричества**

83. ГОСТ 6570—75 «Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные. Общие технические условия».

84. ГОСТ 8476—93 «Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 3. Особые требования к ваттметрам и варметрам».

85. ГОСТ 10287—83 «Счетчики электрические постоянного тока. Общие технические условия».

86. ГОСТ 25372—82 «Счетчики электрической энергии. Условные обозначения».

87. ГОСТ 25990—83 «Счетчики электрические активной энергии класса точности 2,0. Приемочный контроль».

88. ГОСТ 26035—83 «Счетчики электрической энергии переменного тока электронные. Общие технические условия».

### **Приборы для измерения электрического сопротивления, емкости, индуктивности и взаимной индуктивности**

89. ГОСТ 6746—94 «Меры электрической емкости. Общие технические условия».

90. ГОСТ 7165—93 «Мосты постоянного тока для измерения сопротивления».

91. ГОСТ 21175—75 «Меры индуктивности. Общие технические условия».

92. ГОСТ 23737—79 «Меры электрического сопротивления. Общие технические условия».

### **Приборы для измерения частоты электрического тока и угла сдвига фаз**

93. ГОСТ 7590—93 «Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 4. Особые требования к частотомерам».

94. ГОСТ 8039—93 «Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 5. Особые требования к фазометрам, измерителям коэффициента мощности и синхроноскопам».

95. Приборы для измерения магнитной индукции, напряженности магнитного поля и магнитного потока.

96. ГОСТ 6746—75 «Меры емкости. Общие технические условия».

97. ГОСТ 9486—79 «Мосты переменного тока измерительные. Общие технические условия».

### **Прочие электроизмерительные приборы**

98. ГОСТ 9181—74 «Приборы электроизмерительные. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение».

99. ГОСТ 9829—81 «Осциллографы светолучевые. Общие технические условия».

100. ГОСТ 11013—81 «Гальванометры осциллографические магнитоэлектрические. Общие технические условия».

101. ГОСТ 15855—77 «Измерения времени и частоты. Термины и определения».

102. ГОСТ 27537—87 «Устройства цифровой индикации. Общие технические условия».

103. ГОСТ 23854—79 «Измерители уровня. Общие технические требования и методы испытаний».

104. ГОСТ 27300—87 «ИИС. Общие требования, комплектность и правила составления эксплуатационной документации».

105. ГОСТ 28885—90 «Конденсаторы. Методы измерений и испытаний».

## **Приборы вторичные для измерения и регулирования неэлектрических величин электрическими методами**

106. ГОСТ 7164—78 «Приборы автоматические следящего уравнивания ГСП. Общие технические условия».

107. ГОСТ 9736—91 «Приборы электрические прямого преобразования для измерения неэлектрических величин».

## **Электронные измерительные приборы и устройства**

108. ГОСТ 26104—89 «Средства измерений электронные. Технические требования в части безопасности. Методы испытаний».

## **Средства измерений и автоматизации**

109. ГОСТ 26.010—80 «Средства измерений и автоматизации. Сигналы частотные электрические непрерывные входные и выходные».

110. ГОСТ 26.011—80 «Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные».

111. ГОСТ 26.014—81 «Средства измерений и автоматизации. Сигналы электрические кодированные входные и выходные».

112. ГОСТ 9986—78 «ГСП. Преобразователи электропневматические аналоговые. Общие технические условия».

113. ГОСТ 12997—84 «Изделия ГСП. Общие технические условия».

114. ГОСТ 13033—84 «ГСП. Приборы и средства автоматизации электрические аналоговые. Общие технические условия».

115. ГОСТ 13418—79 «Средства автоматизации и устройства электрические дискретные ГСП. Общие технические условия».

116. ГОСТ 18140—84 «Манометры дифференциальные. Общие технические условия».

117. ГОСТ 18953—73 «Источники питания электрические ГСП. Общие технические условия».

118. ГОСТ 23222—88 «Характеристики точности выполнения предписанной функции средств автоматизации».

119. ГСИ РМГ 29—99 «Метрология. Основные термины и определения».

## **ГОСТы, ОСТы и нормативные документы ИИС**

120. ГОСТ 8.437—81 «Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения».

121. ГОСТ 8.438—81 «Системы информационно-измерительные. Проверка. Общие положения».

122. ГОСТ 26.003—80 «Система интерфейса для измерительных устройств с байт-последовательным, бит-параллельным обменом информацией».

123. ГОСТ 26.016—81 «Единая система стандартов приборостроения. Интерфейсы. Признаки классификации и общие требования».



124. ГОСТ 26139—84 «Интерфейс для автоматизированных систем управления рассредоточенными объектами».
125. ГОСТ 27080—86 «Система КАМАК. Крейт и сменные блоки. Требования к конструкции и интерфейсу».
126. ГОСТ 50949—96 «Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерения и оценки эргономических параметров и параметров безопасности».
127. МИ 2232—2000 «ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации».
128. МИ 2233—2000 «ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Основные положения».
129. МИ 2266—2000 «ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Создание и использование баз данных о метрологических характеристиках средств измерений».
130. Р 50779.44—2001 «Статистические методы. Индексы возможностей процессов. Основные методы расчета».
131. Р 50779.70—99 «Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 0. Введение в систему выборочного контроля по альтернативному признаку на основе приемлемого уровня качества AQL».
132. Р 50779.77—99 «Статистические методы. Планы и процедуры статистического приемочного контроля нештучной продукции».
133. Р 50948—96 «Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности».
134. ОСТ ВШ 01.002—95 «Информационные технологии в высшей школе. Термины и определения».
135. Р ИСО/МЭК 10740-1—2000; Р ИСО/МЭК 10740-2—2000 «Информационные технологии. Текстовые и учрежденческие системы». Ч. 1, 2.
136. Р 50.1.031—2001; Р 50.1.030—2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь».
137. ПР 50.1.019—2000 «Основные положения единой системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации и унифицированных систем документации в РФ».
138. ОСТ 40.5—86 «Составление исходных педагогических и технических требований к заявке на разработку и постановку на производство учебного оборудования».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецова Н. Н.* Датчики контроля и регулирования: Справочные материалы.— М.: Машиностроение, 1965.
2. Гальванометрические компенсаторы / А. Ф. Куликовский, С. Г. Рабинович и др. — М.: «Энергия», 1964.
3. *Глинков Г. М., Косырев А. И., Шевцов Е. К.* Контроль и автоматизация металлургических процессов. — М.: Металлургия, 1989.
4. *Джексон П.* Датчики сопротивления из фольги. — Прикладная механика и машиностроение: Сб. переводов и обзоров. — 1954. — № 5.
5. *Диденко Е. В.* Система управления гибкими исследовательскими и технологическими стендами. Лаборатория — 2Д. Мир компьютерной автоматизации. — 1999. — № 4.
6. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н. Н. Евтихийев, Я. А. Купершмидт, В. Ф. Папуловский и др. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Измерения в промышленности: Справочник: В 3 кн.— М.: Металлургия, 1990.
8. *Ильин В. А.* Телеуправление и телеизмерение. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Информационно-измерительная техника и технологии / В. И. Калашников, С. Ф. Нефедов, А. Б. Путилин и др.; Под ред. Г. Г. Раннева. — М.: Высш. шк., 2002.
10. *Карандеев К. Б.* Специальные методы электрических измерений. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963.
11. *Коптов К. И., Шершевер М. А.* Средства измерения, контроля и автоматизации технологических процессов. Вычислительная и микропроцессорная техника. — М.: Металлургия, 1989.
12. *Круг П. Г.* Виртуальные измерительные системы // Приборы и системы управления. — 1996. — № 11.
13. *Куликовский Л. Ф.* Индуктивные измерители перемещений.— М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961.
14. *Левшина Е. С., Новицкий П. В.* Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983.
15. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах / Под ред. *В. И. Нефедова.* — М.: Высш. шк., 2001.

16. *Муравьев С. В., Токарев С. В.* Новый стиль в измерительном программировании // Приборы и системы управления. — 1997. — № 10.
17. *Нестеренко А. Д.* Основы расчета электроизмерительных схем уравновешивания. — АН УССР, 1960.
18. *Новицкий П. В.* Основы информационной теории измерительных устройств. — М.: Энергия, 1968.
19. Основы метрологии и электрические измерения / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. М. Душин и др.; Под ред. Е. М. Душина. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987.
20. Приборы и программные средства контроля. — М.: Изд-во МГОУ, 1996.
21. Развертывающие системы: Сборник статей / Под ред. В. Л. Славинского. — М.: Энергия, 1976.
22. *Раннев Г. Г.* Измерительные информационные системы: Лекции. — М.: Изд-во МГОУ, 1993.
23. *Раннев Г. Г.* Современные проблемы информационных технологий. Современные проблемы информационных технологий: Сборник. — М.: Изд-во МГОУ, 1995.
24. *Раннев Г. Г.* Хронопотенциографы. — М.: Энергия, 1979.
25. *Раннев Г. П., Высоковский С. Н., Рулев В. А.* Автоматический контроль давления металла на валки прокатных станов. — Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1966.
26. *Раннев Г. Г., Салин А. А.* Методы и приборы автоматического контроля качества растворов. — Ташкент: Фан, 1968.
27. *Раннев Г. Г., Тарасенко А. П.* Методы и средства измерений физических величин. — М.: МГОУ, 2001.
28. *Сергеев А. Г., Крохин В. В.* Метрология. — М.: Логос, 2000.
29. *Сорока М. К.* Виртуальные приборы — не виртуальная реальность // Приборы и системы управления. — 1997. — № 7.
30. *Спектор С. А.* Электрические измерения физических величин: Методы измерений. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987.
31. *Тарасенко А. П.* Теоретические основы, метрология, стандартизация и сертификация измерительных и информационных технологий. — М.: МГОУ, 2001.
32. *Тартаковский Д. Ф., Ястребов А. С.* Метрология, стандартизация и технические средства измерений. — М.: Высш. шк., 2001.
33. *Телло Э.* Объектно-ориентированное программирование в среде Windows. — М.: Наука-Уайли, 1993.
34. *Темников Ф. Е., Харченко Р. Р.* Электрические измерения неэлектрических величин. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1948.
35. *Тиль Р.* Электрические измерения неэлектрических величин: Пер. с нем. — 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
36. *Туричина А. М.* Электрические измерения неэлектрических величин. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. — Л.: Энергия, 1966.
37. *Туричина А. М., Новицкий П. В.* Проволочные преобразователи и их техническое применение. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1957.
38. *Федоров А. М., Цыган Н. Я., Мичурин В. И.* Метрологическое обеспечение электронных средств измерений электрических величин. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.

39. *Цапенко М. П.* Измерительные информационные системы: структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

40. *Шульц Ю.* Электроизмерительная техника: Справочник: Пер. с нем.— М.: Энергоатомиздат, 1989.

41. Электрические измерения / В. Н. Малиновский, Р. М. Демидова-Панферова, Ю. Н. Евлаков и др.; Под ред. В. Н. Малиновского. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

42. *Янг С.* Алгоритмические языки реального времени: Конструирование и разработка. — М.: Мир, 1985.

43. ATE Progress Review 1980's to 2000, Recent Developments & the Future. — XVI Newsletters. Vol. 10. Issue 6. April/May 1999.

44. *Johnson G.* LabVIEW Graphical Programming. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994.

45. *Sakkinen M.* Inheritance and Other Main Principles of C and Object-oriented Languages Jyvaskyla. — University of Jyvaskyla, 1992.

46. *Weels L., Travis J.* LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Even Easier. — Englewood Cliffs: Prentice Hall, PTR, 1996.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	5
<b>Глава 1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	8
1.1. Основные понятия и определения метрологии .....	8
1.2. Единицы физических величин .....	12
1.3. Классификация и методы измерений .....	14
1.4. Классификация средств измерений .....	17
1.5. Метрологические характеристики средств измерений .....	22
1.6. Классификация погрешностей .....	25
1.7. Модели измерительного процесса .....	31
1.8. Систематические погрешности .....	33
1.9. Случайные погрешности .....	36
1.10. Обработка результатов измерений .....	43
1.11. Суммирование погрешностей .....	47
1.12. Формы записи результатов измерений .....	49
<b>Глава 2. СРЕДСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ</b> .....	52
2.1. Меры, масштабные преобразователи .....	52
2.2. Электромеханические измерительные приборы .....	54
2.3. Электромеханические приборы с преобразователями .....	68
2.4. Измерительные мосты и компенсаторы .....	71
2.5. Аналоговые электронные измерительные приборы .....	79
2.6. Цифровые измерительные приборы .....	83
<b>Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН</b> .....	87
3.1. Измерение постоянного тока, напряжения и количества электричества .....	87
3.2. Измерение переменного тока и напряжения .....	89
3.3. Измерение мощности и энергии .....	91
3.4. Измерения фазы и частоты .....	96
<b>Глава 4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ</b> .....	100
4.1. Измерение сопротивления постоянному току .....	100
4.2. Измерение емкости и тангенса угла потерь .....	101
4.3. Измерения индуктивности, добротности и взаимной индуктивности .....	102

<b>Глава 5. ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН</b> .....	103
5.1. Метрологическая основа магнитных измерений .....	103
5.2. Измерение магнитного потока .....	104
5.3. Измерение магнитной индукции и напряженности магнитного поля .....	105
5.4. Магнитные материалы .....	106
<b>Глава 6. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН</b> .....	109
6.1. Основные характеристики измерительных преобразователей .....	109
6.2. Схемы включения измерительных преобразователей .....	113
6.3. Динамические свойства измерительных преобразователей .....	122
6.4. Классификация измерительных преобразователей .....	126
<b>Глава 7. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ</b> .....	131
7.1. Фотоэлектрические преобразователи .....	131
7.2. Емкостные преобразователи .....	138
7.3. Тепловые преобразователи .....	143
7.4. Ионизационные преобразователи .....	153
7.5. Реостатные преобразователи или датчики активного сопротивления .....	160
7.6. Тензорезисторные преобразователи .....	164
7.7. Индуктивные преобразователи .....	171
7.8. Магнитоупругие преобразователи .....	180
7.9. Электролитические преобразователи сопротивления .....	186
7.10. Полярографические преобразователи .....	193
7.11. Хронопотенциографы с накопителем .....	200
<b>Глава 8. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ</b> .....	202
8.1. Пьезоэлектрические преобразователи .....	202
8.2. Гальванические преобразователи .....	208
8.3. Обращенные преобразователи .....	212
8.4. Индукционные преобразователи .....	215
8.5. Термоэлектрические преобразователи .....	223
8.6. Термоэлектрические пирометры .....	231
<b>Глава 9. ВИРТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ</b> .....	236
9.1. Основные понятия .....	236
9.2. Средства измерения и тестирования .....	237
9.3. Программное обеспечение .....	241
<b>Глава 10. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ</b> .....	246
10.1. Основные термины и определения .....	246
10.2. Роль информационных процессов .....	250
10.3. Виды и структуры измерительных информационных систем .....	251
10.4. Основные компоненты измерительных информационных систем .....	252

10.5. Поколения измерительных информационных систем ....	254
10.6. Математические модели и алгоритмы измерений для измерительных информационных систем .....	254
10.7. Разновидности измерительных информационных систем .....	256
10.8. Телеизмерительные системы .....	263
10.9. Системы автоматического контроля (автоконтроля) .....	268
10.10. Системы технической диагностики .....	272
10.11. Системы распознавания образов .....	275
10.12. Статистические измерительные системы .....	277
10.13. Особенности проектирования измерительных информационных систем .....	282
10.14. Некоторые особенности развития САПР измерительных информационно-управляющих систем .....	295
10.15. Метрологический анализ .....	297
10.16. Интерфейсы информационно-измерительных систем .....	299
Приложения .....	309
Приложение 1. Основные и производные единицы .....	309
Приложение 2. Перечень основополагающих стандартов .....	319
Список литературы .....	326