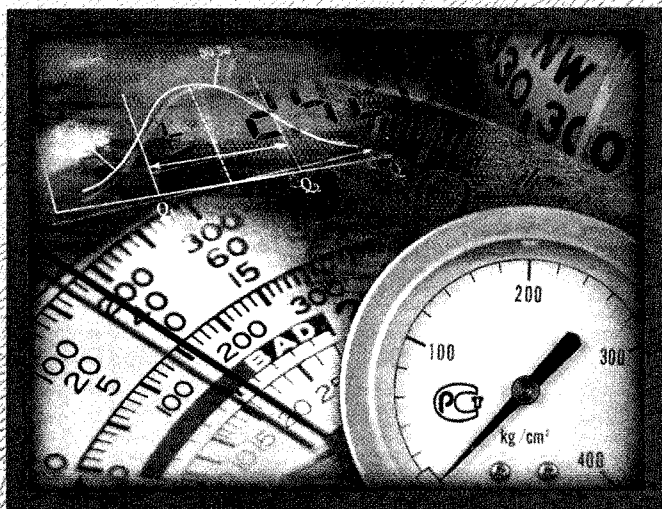


МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Под редакцией К. К. Кима



СЕРИЯ

УЧЕБНОЕ / ПОСОБИЕ

 ПИТЕР®

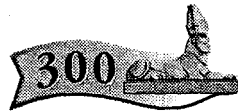
УЧЕБНОЕ / ПОСОБИЕ

К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, В. Ю. Барборович, Б. Я. Литвинов

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Под редакцией К. К. Кима

Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки в области техники и технологии



Издательская программа

300 лучших учебников для высшей школы

осуществляется при поддержке Министерства образования и науки РФ

ПИТЕР®

Москва · Санкт-Петербург · Нижний Новгород · Воронеж
Ростов-на-Дону · Екатеринбург · Самара · Новосибирск
Киев · Харьков · Минск

2006

ББК 30.10я7
УДК 006.91(075)
М54

Рецензенты:

*кафедра теоретических основ электротехники,
заместитель заведующего кафедрой С. М. Курмашев;
главный научный сотрудник ФГУП «ВНИИ им. Д. И. Менделеева»,
д. т. н., профессор Е. Д. Колпик*

М54 Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника: Учебное пособие / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, В. Ю. Барбарович, Б. Я. Литвинов. — СПб.: Питер, 2006. — 368 с.: ил.

ISBN 5-469-01090-2

В настоящем издании метрология рассмотрена в свете современных представлений как базовая наука, обеспечивающая взаимосвязь всех естественных наук. Рассказано о роли измерений в повышении эффективности научных исследований и создании новых технологий. Изложены основы системы обеспечения единства измерений, действующие на территории Российской Федерации. В книге представлены основные понятия метрологии, основы теории погрешностей, теории подобия и моделирования измерительных задач, методы практической обработки результатов измерений. Приведены сведения о Международной системе единиц СИ, международных организациях по метрологии и стандартизации, Государственной метрологической службе РФ, метрологических службах юридических лиц, об аккредитации метрологических служб на право поверки или калибровки средств измерений.

В учебном пособии изложены основные сведения об электрических измерениях и о технических средствах, используемых при электрических измерениях, описаны устройство и принцип действия измерительных приборов, дано понятие об измерительных информационных системах, а также об основных принципах измерения магнитных и неэлектрических величин.

Материал, представленный в книге, соответствует закону «О техническом регулировании», введенному в действие на территории Российской Федерации с 1 июля 2003 года. Обобщен первый опыт его применения.

Настоящее издание предназначено для студентов общетехнических специальностей, аспирантов и преподавателей высших технических учебных заведений, а также работников метрологических служб.

Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки в области техники и технологии.

ББК 30.10я7
УДК 006.91(075)

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 5-469-01090-2

© ЗАО Издательский дом «Питер», 2006

Краткое содержание

Предисловие	10
Введение	11

Часть I. Метрология

Глава 1. Введение в метрологию	20
Глава 2. Погрешности измерений	56
Глава 3. Средства и методы измерений	84
Глава 4. Обработка результатов измерений	96
Глава 5. Обеспечение единства измерений	118

Часть II. Электроизмерительная техника

Глава 6. Меры электрических величин	140
Глава 7. Масштабные измерительные преобразователи	153
Глава 8. Электромеханические измерительные преобразователи и приборы	161
Глава 9. Электронные аналоговые приборы	204
Глава 10. Приборы сравнения	219
Глава 11. Приборы для измерения и регистрации изменяющихся во времени величин	234
Глава 12. Цифровые измерительные преобразователи и приборы	248
Глава 13. Измерительные информационные системы	281
Глава 14. Магнитоизмерительные приборы	293
Глава 15. Электрические преобразователи и приборы для измерения неэлектрических величин	300

Часть III. Техническое регулирование

Глава 16. Обязательные требования к объектам технического регулирования. Цели принятия технических регламентов	314
Глава 17. Стандартизация	320
Глава 18. Подтверждение соответствия	345
Литература	359
Алфавитный указатель	361

Содержание

Предисловие	10
Введение	11

Часть I. Метрология

Глава 1. Введение в метрологию	20
1.1. Величины, физические величины	20
1.2. Виды физических величин, измерительные шкалы	22
1.2.1. Шкала наименований (шкала классификаций)	24
1.2.2. Шкала порядка (шкала рангов)	25
1.2.3. Шкала интервалов (шкала разностей)	25
1.2.4. Шкала отношений	26
1.2.5. Абсолютные шкалы	27
1.3. Системы единиц физических величин и принципы их построения	27
1.4. Из истории создания систем единиц физических величин	32
1.5. Международная система единиц	36
1.6. Другие системы единиц, используемые в практике измерений. Внесистемные единицы	41
1.7. Классификация измерений	43
1.8. Физические константы и стандартные справочные данные	46
1.9. Элементы теории подобия и моделирования	50
1.10. Постулаты теории измерений	54
Глава 2. Погрешности измерений	56
2.1. Классификация погрешностей	56
2.2. Правила округления результатов измерений и значений погрешности	60
2.3. Случайные погрешности и их вероятностное описание	61
2.3.1. Понятие случайной величины	61
2.3.2. Дискретные и непрерывные случайные величины	62
2.3.3. Случайные погрешности результатов измерений	70
2.4. Методы исключения и компенсации систематических погрешностей	74
2.4.1. Исправленный результат измерения и поправки, влияющие факторы	74
2.4.2. Исключение систематических погрешностей при планировании и выполнении измерений	77
Глава 3. Средства и методы измерений	84
3.1. Классификация средств измерений	84
3.2. Метрологические характеристики средств измерений, классы точности	88
3.3. Методы измерений	93
Глава 4. Обработка результатов измерений	96
4.1. Статистическая обработка многократных показаний	96
4.2. Однократные измерения	100

4.3. Косвенные, совокупные и совместные измерения	103
4.4. Оценка неопределенности в измерениях	107
4.5. Информационная теория измерений	111
Глава 5. Обеспечение единства измерений	118
5.1. Поверочные схемы	118
5.2. Закон РФ «Об обеспечении единства измерений». Государственный метрологический контроль и надзор	123
5.3. Метрологические службы предприятий, аккредитация на право проведения поверочных и калибровочных работ	129
5.4. Государственная метрологическая служба, другие государственные службы по метрологии и стандартизации РФ	132
5.5. Международные организации в области метрологии	136

Часть II. Электроизмерительная техника

Глава 6. Меры электрических величин	140
6.1. Меры ЭДС на основе нормальных элементов	140
6.2. Меры напряжения на основе кремниевых стабилитронов	142
6.3. Калибраторы напряжения и силы тока	146
6.4. Меры сопротивления, емкости, индуктивности	148
Глава 7. Масштабные измерительные преобразователи	153
7.1. Токовые шунты	153
7.2. Добавочные сопротивления	154
7.3. Делители напряжения	155
7.4. Измерительные усилители	156
7.5. Измерительные трансформаторы переменного тока и напряжения	156
Глава 8. Электромеханические измерительные преобразователи и приборы	161
8.1. Принцип действия	161
8.2. Общие узлы и детали	163
8.3. Магнитоэлектрические измерительные преобразователи и приборы	166
8.4. Применение магнитоэлектрических приборов для измерений в цепях переменного тока	177
8.5. Электромагнитные измерительные преобразователи и приборы	181
8.6. Электростатические измерительные преобразователи и приборы	184
8.7. Электродинамические и ферродинамические измерительные преобразователи и приборы	188
8.8. Индукционные приборы	199
Глава 9. Электронные аналоговые приборы	204
9.1. Электронные вольтметры	204
9.2. Электронные омметры	212
9.3. Электронные ваттметры и счетчики электрической энергии	214
9.4. Электронные частотомеры и фазометры	216

Глава 10. Приборы сравнения	219
10.1. Общие сведения	219
10.2. Общая теория мостовых схем	219
10.3. Мосты постоянного тока	221
10.4. Мосты переменного тока	224
10.5. Измерительные компенсаторы	230
Глава 11. Приборы для измерения и регистрации изменяющихся во времени величин	234
11.1. Назначение и классификация средств регистрирующей техники	234
11.2. Ленточные самописцы	235
11.3. Электронно-лучевые осциллографы	235
Глава 12. Цифровые измерительные преобразователи и приборы	248
12.1. Общие сведения	248
12.2. Основные характеристики ЦИП	253
12.3. Основные компоненты цифровых измерительных приборов	257
12.4. Цифровые измерительные приборы последовательного счета	263
12.4.1. ЦИП с непосредственным преобразованием измеряемой величины в код временных интервалов	263
12.4.2. ЦИП с непосредственным преобразованием измеряемой величины в код частоты	269
12.4.3. ЦИП с непосредственным преобразованием измеряемой величины в код напряжения постоянного тока	270
12.5. Цифровые измерительные приборы последовательного приближения (поразрядного уравнивания)	272
12.6. Цифровые измерительные приборы считывания	276
Глава 13. Измерительные информационные системы	281
13.1. Классификации ИИС	281
13.2. Измерительные системы	283
13.3. Системы автоматического контроля. Системы технической диагностики. ИИС на основе агрегатных комплексов	288
13.4. Микропроцессорные системы в измерительной технике. Измерительно-вычислительные комплексы	289
Глава 14. Магнитоизмерительные приборы	293
14.1. Приборы для измерения магнитного потока	293
14.2. Приборы для измерения магнитной индукции	296
Глава 15. Электрические преобразователи и приборы для измерения неэлектрических величин	300
15.1. Основные понятия и классификации	300
15.2. Измерительные преобразователи и приборы, в которых они применяются	302
15.2.1. Параметрические преобразователи	303
15.2.2. Генераторные преобразователи	309
15.3. Основные разновидности применяемых измерительных схем	311

Часть III. Техническое регулирование

Глава 16. Обязательные требования к объектам технического регулирования. Цели принятия технических регламентов . . .	314
16.1. Федеральный закон Российской Федерации «О техническом регулировании». Общие положения	314
16.2. Технические регламенты	315
16.3. Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов	317
16.4. Переходные положения	319
Глава 17. Стандартизация	320
17.1. Сущность стандартизации	320
17.2. Цели и принципы стандартизации	323
17.3. Международная и межгосударственная стандартизация	324
17.4. Документы в области стандартизации	329
17.5. Национальная система стандартизации	331
17.6. Соглашение по техническим барьерам в торговле	336
17.7. Применение международных стандартов при разработке системы национальных стандартов	337
17.8. Методы стандартизации	338
Глава 18. Подтверждение соответствия	345
18.1. Формы подтверждения соответствия. Основные определения	345
18.2. Обязательная и добровольная сертификация	347
18.3. Декларирование соответствия	350
18.4. Системы сертификации. Система сертификации ГОСТ Р	351
18.5. Международные стандарты ISO серии 9000. Системы менеджмента качества	355
18.6. Аттестация испытательного оборудования	356
Литература	359
Алфавитный указатель	361

Предисловие

В настоящем издании метрология рассматривается в свете современных представлений как наука, обеспечивающая взаимосвязь естественных наук. Здесь говорится о роли измерений в повышении эффективности научных исследований и создании новых технологий. Излагаются основы системы обеспечения единства измерений, действующей на территории Российской Федерации.

В книге рассматриваются основные понятия метрологии, основы теории погрешностей, теории подобия и моделирования измерительных задач, методы практической обработки результатов измерений. Приводятся сведения о международной системе единиц СИ, международных организациях по метрологии и стандартизации, государственной метрологической службе РФ, метрологических службах юридических лиц, об аккредитации метрологических служб на право поверки или калибровки средств измерений.

В учебном пособии содержатся основные сведения об электрических измерениях и о технических средствах, используемых при электрических измерениях, описываются устройство и принцип действия измерительных приборов, дается понятие об измерительных информационных системах, а также об основных принципах измерения магнитных и неэлектрических величин.

Авторами рассмотрены устоявшиеся представления о стандартизации и сертификации продукции и услуг. Даны основные понятия технического регулирования и технических регламентов, рассмотрены новые представления о стандартизации и подтверждении соответствия, введенные в действие на территории Российской Федерации с 1 июля 2003 г. законом РФ «О техническом регулировании», обобщен первый опыт их применения на практике.

Настоящее издание предназначено для студентов общетехнических специальностей, аспирантов и преподавателей высших технических учебных заведений, а также работников метрологических служб.

От издательства

Ваши замечания, предложения и вопросы отправляйте по адресу электронной почты comr@piter.com (издательство «Питер», компьютерная редакция).

Мы будем рады узнать ваше мнение!

Подробную информацию о наших книгах вы найдете на веб-сайте издательства: <http://www.piter.com>.

Введение

Из опыта известно, что ни одно измерение, как бы тщательно оно ни проводилось, не может дать абсолютно точный результат, вследствие чего часто говорят о наличии ошибок и погрешностей при проведении измерительного эксперимента. Всегда существует множество факторов, в том числе и случайных, приводящих к искажениям получаемой измерительной информации.

Пусть определяется сила электрического тока в первой и второй цепях (рис. В1). При этом показание амперметра А1 составило $I_1 = 1$ А, а показание амперметра А2 — $I_2 = 1,02$ А. Можем ли мы утверждать, что сила электрического тока во второй цепи больше? Идеальных измерительных приборов не бывает, и их точность всегда ограничена, к тому же разные типы приборов имеют разную точность. Из технической документации на первый и второй амперметры экспериментатор может узнать, что в первом случае значение силы тока находится в пределах от 0,98 до 1,02 А, а во втором случае — в пределах от 0,97 до 1,07 А. В отличие от показаний приборов — измеренных значений — истинные значения силы тока находятся в неизвестной точке внутри некоторых интервалов, поэтому

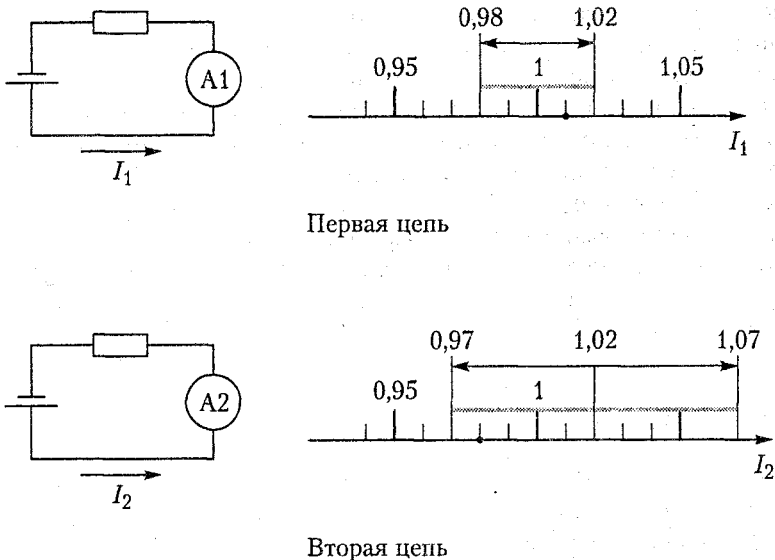


Рис. В1. Сравнение показаний двух измерительных приборов

сила тока в первой цепи может быть больше, чем во второй (отмечены точками на рис. В1).

Рассмотрим другой пример, приведенный Дж. Тейлором в книге «Введение в теорию ошибок». Плотнику для того, чтобы установить дверь, необходимо измерить высоту дверного проема. Производя измерения «на глаз», он мог бы определить, что высота проема находится в пределах от 205 до 215 см. Для того чтобы повысить точность измерений, плотник может использовать рулетку и определить, что высота находится в пределах от 211,2 до 211,3 см. Применяя более точную рулетку, улучшив освещение, можно сократить пределы до долей миллиметра. Если решить провести измерения с наилучшей точностью, допускаемой современным техническим уровнем, можно использовать лазерный интерферометр и сократить интервал до долей микрометра, но определить высоту дверного проема *точно* по-прежнему окажется невозможным. Более того, стремясь достичь все более высокой точности, плотник столкнется с важной и принципиальной проблемой. Выяснится, что высота в разных местах различна. Но даже в одном и том же месте высота будет меняться в зависимости от температуры, влажности, от того, что стерт слой пыли. Плотник обнаружит, что такой величины, как высота дверного проема (как она понималась в начале эксперимента), нет. Подобного рода проблема связана с проблемой определения порогового несоответствия и играет важную роль во многих научных измерениях.

Результаты измерений используются при принятии решений. Выводы и заключения, сделанные на их основе, во многом зависят от того, насколько правильно оценивается точность результатов измерений. Рассмотрим еще один пример, приведенный Д. Ф. Тартаковским в работе «Измерительная информация в системе доказательств». Измерениями, проведенными в рамках судебно-медицинской экспертизы (СМЭ), установлено, что содержание алкоголя в крови потерпевшего составляет 2,9 ‰ (‰ — промилле — тысячная доля). При этом в экспертном заключении оценка точности результата измерений экспертом указана не была. По данным этого измерения суду необходимо определить степень опьянения потерпевшего. В руководстве по СМЭ приведены следующие справочные данные о степени опьянения человека в зависимости от содержания алкоголя в крови:

- 1,5–2,5 ‰ — опьянение средней тяжести;
- 2,5–3,0 ‰ — сильное опьянение;
- 3,0–5,0 ‰ — тяжелое отравление.

Ориентируясь на результат измерения 2,9 ‰, можно было бы сделать вывод, что в момент взятия пробы крови на анализ потерпевший находился в состоянии сильного опьянения. Вывод однозначен, но он получен на основании измерения, не заслуживающего доверия, поскольку не оценена его точность. Допустим, что, согласно технической документации на измерительный прибор, возможны отклонения $\pm 20\%$ от полученного результата, то есть истинное значение измеряемой величины находится в интервале от 2,32 до 3,48 ‰ (что часто соответствует истине). Согласно справочным данным, значение 2,32 ‰ соответствует опьянению средней тяжести, а содержание алкоголя 3,48 ‰ попадает в интервал, соответствующий тяжелому отравлению. Таким образом, возможны все три вывода

о состоянии потерпевшего. Каждый из выводов основан на результате измерения с учетом оценки его точности и может быть признан правильным с некоторой вероятностью. Как видим, анализ ситуации с учетом неопределенности результата измерения порождает серьезные сомнения в правильности первоначального вывода, и в данном случае требуется дополнительная, более точная количественная оценка.

Можно привести еще много примеров, подтверждающих необходимость правильной оценки точности проводимых измерений, метрологически грамотной аргументации относительно необходимой и достаточной точности результатов измерений, а также знания специфических факторов, ограничивающих точность измерений, правил обработки результатов измерений и соблюдения условий, повышающих точность.

В более же общем виде можно сказать, что измерения являются одним из важнейших путей познания природы. Они дают количественную информацию об интересующих нас объектах и явлениях, а также позволяют устанавливать действующие в природе закономерности. Физику и другие естественные науки называют точными потому, что благодаря измерениям они имеют возможность устанавливать точные количественные соотношения между физическими величинами, выражающие, в конечном счете, фундаментальные физические законы и соотношения. В этом смысле можно отметить, что измерения являются критерием истинности научных открытий.

Основоположник отечественной метрологии как науки Д. И. Менделеев выразил значение измерений следующим образом: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немислима без меры».

Все отрасли науки и техники не могли бы существовать без измерений. Метрология способствует развитию всех областей естественных наук. В то же время можно отметить и обратное: успехи в естественных науках, в технике, в развитии технологий способствуют прогрессу в метрологии. С развитием науки и техники совершенствуются средства измерений, а это означает, что повышается точность измерений, расширяется их диапазон, и это, в свою очередь, создает условия для развития технологий, совершенствования средств производства, получения новых, более точных научных знаний и т. д. Таким образом, метрология и другие естественные науки и техника взаимосвязаны.

Точные измерения преследуют очень важную цель. Они позволяют проверить наши теоретические представления о веществах и явлениях, и возникновение расхождений приводит к созданию новых теорий и к новым открытиям. В истории есть немало тому примеров.

Так, например, был открыт инертный газ аргон, который содержится в атмосфере, как теперь известно, в количестве около 1 %. Это открытие было сделано в 1895 г. Рэлеем и Рамсеем после измерений плотности атмосферного воздуха, которая отличалась от нормальной плотности смеси кислорода и азота. Еще одним примером служит открытие дейтерия, которое было сделано на основании результатов измерений средней массы естественного водорода.

На мысль о постоянстве скорости света в пустоте для всех наблюдателей, движущихся равномерно один относительно другого, физиков-теоретиков впервые натолкнули опыты Майкельсона и Морли, проведенные в период 1881–1888-х гг.

Очень тщательные наблюдения интерференции света, распространяющегося в двух взаимно перпендикулярных направлениях, не обнаружили сколько-нибудь значимой разницы в значении скорости света в этих направлениях, в какое бы время дня и года измерения ни проводились. Эти и подобные им измерения привели Эйнштейна к созданию специальной теории относительности.

Итак, *метрология*. В переводе с греческого *метрон* означает мера, а *логос* — учение или наука. Таким образом, дословно *метрология* — это наука о мерах, что и было справедливо на заре становления единиц измерения и соответствующих им мер, хранящих в себе размер этих единиц измерения.

А в современном понимании, которое отражено в РМГ (Рекомендации по межгосударственной стандартизации) 29–99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения», *метрология* — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

В это определение входит понятие *единства измерений*, которое там же определяется как *состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимым первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы*.

В приведенном определении единства измерений следует отметить два принципиальных момента. Во-первых, результаты измерений должны быть выражены в узаконенных единицах, то есть тех единицах, размер которых принят в установленном порядке. Так, в большинстве стран мира законодательно принята к применению система единиц СИ (система интернациональная), в которой единицей длины является метр, массы — килограмм, силы тока — ампер и т. д. либо кратные или дольные от этих единиц. И во-вторых, погрешность результата измерений не выходит с заданной вероятностью за некоторое указанное значение. Это означает, что результат измерения физической величины, выполненного в какое-то время в каком-то месте, должен соотноситься с результатом измерения этой же самой величины, выполненного в другом месте и в другое время, в рамках указанной погрешности (оценки точности) результатов измерений.

Проблема обеспечения единства измерений имеет возраст, сопоставимый с возрастом человечества. Как только человек стал продавать или обменивать результаты своего труда, возник вопрос об эквиваленте этого труда, или единице измерения. В тех условиях первыми величинами, которые надо было измерять, были длина, площадь, объем, масса, и первыми средствами обеспечения единства измерений были объекты, которые имелись в распоряжении человека. Так появились первые меры длины, базирующиеся на размерах частей человеческого тела. На Руси это были вершок, пядь, локоть, аршин, сажень, косая сажень, в странах Европы — дюйм, фут и т. п.

Поскольку размеры частей тела у разных людей разные, то вопрос о равных условиях для всех участников торговли (или вопрос об обеспечении единства измерений) стоял довольно остро. Шагом, призванным урегулировать такие споры, стали законодательные акты правителей, обязывающие торговцев соблюдать единство измерений с помощью, например, двух зарубок на стене рыночной площади, устанавливающих размер «эталонной» меры длины.

Затем стали появляться государственные службы, хранящие установленные в государстве меры, с которыми торговцы были обязаны сравнивать имеющиеся у них меры. С развитием математики, физики, средств производства, с совершенствованием средств измерений на базе этих служб выросли современные метрологические лаборатории и центры.

По мере развития техники и науки человечество сталкивалось с новыми свойствами физических объектов, которые нужно было как-то характеризовать, оценивать количественно и использовать в повседневной практике. Например, при решении задачи Архимеда было введено новое понятие — плотность вещества, а также найдено решение задачи измерения объема предметов сложной формы. По мере развития человечества появлялась необходимость в измерении новых величин, которые характеризовали физические объекты с другой, неизвестной до этого стороны. Так появились другие физические величины: температура, твердость, цвет, сила тока, потенциал, разность потенциалов и т. д.

Физическая величина (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.

В настоящее время в науке классифицировано около 2000 физических величин, и все они в той или иной степени должны быть определены количественно. А это и есть задача метрологии. Отсюда вытекает еще одно определение: *метрология — это наука о получении количественной информации опытным путем.*

Опытным путем, то есть экспериментально, количественная информация получается при помощи измерений. Измерение — познавательный процесс, заключающийся в сравнении данной величины с известной величиной, принятой за единицу.

Приведем еще одно определение, данное в РМГ 29–99. *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.*

В простейшем случае, 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). Или с помощью измерительного прибора сравнивают размер величины, преобразованной в перемещение указателя, с единицей, хранимой шкалой этого прибора, и проводят отсчет.

Измерения выполняют с помощью средств измерений. *Средство измерений — 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.*

Итак, рассмотрим, к чему сводится процесс измерения какой-либо физической величины (рис. В.2).

Реальный объект исследований характеризуется множеством свойств, каждое из которых может служить предметом отдельного исследования. Интересующее нас свойство должно быть обнаружено и идентифицировано как физическая ве-

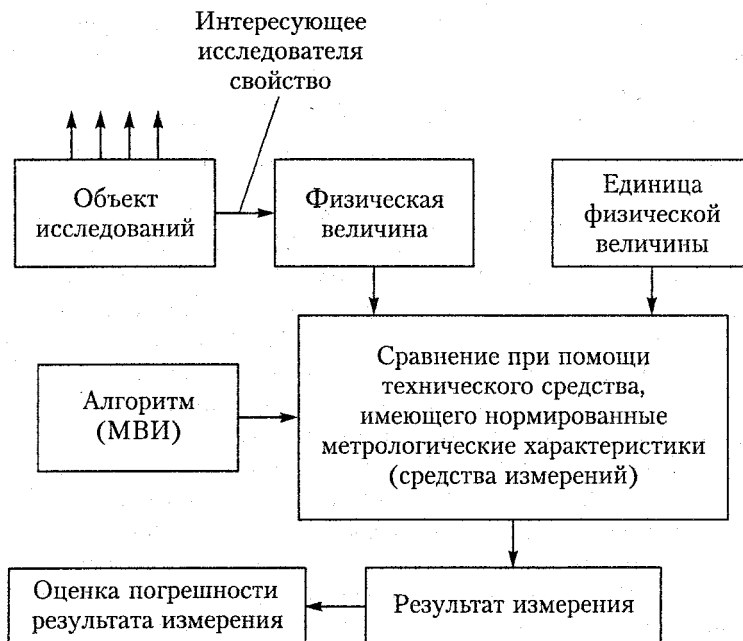


Рис. В2. Процесс измерения физической величины

личина, имеющая свою узаконенную единицу физической величины, с которой и сравнивается количественно исследуемое свойство объекта исследований. Сравнение производится с помощью технического устройства, имеющего нормированные метрологические характеристики, — средства измерений, по определенному алгоритму, называемому *методикой выполнения измерений* (МВИ).

После выполнения измерения и получения числового значения результата измерения должна быть произведена *оценка погрешности измерения*, включающей в себя погрешность средства измерений, погрешность метода измерений, погрешность от влияния внешних воздействий и индивидуальных особенностей наблюдателя.

Метрология как наука не является чем-то застывшим и неизменным. С принятием в 1993 г. трех законов Российской Федерации: «Об обеспечении единства измерений», «О стандартизации», «О сертификации продукции и услуг» — существенно возросла роль метрологии в научном, техническом и общественном прогрессе. Введение государственного метрологического контроля и надзора во многих областях деятельности и обязательной сертификации продукции, работ и услуг обусловило изменение отношения к измерениям и средствам измерений как инструментам повышения качества и достоверности научных исследований, технических разработок, выпускаемых и реализуемых потребителю товаров.

С введением в действие федерального закона «О техническом регулировании», принятого Государственной Думой 15 декабря 2002 г., утратили силу законы РФ «О стандартизации» и «О сертификации продукции и услуг». Стандар-

тизация и сертификация теперь вошли в более емкое понятие — *техническое регулирование*.

Нормативную базу стандартизации, которая федеральным законом отнесена к деятельности по установлению правил и характеристик в целях их *добровольного* многократного использования, составляют наработанные за многие годы и утвержденные Госстандартом России государственные стандарты (ГОСТ), которые в настоящее время переименованы в национальные стандарты под тем же обозначением. Действуют правила (ПР) по метрологии, стандартизации, сертификации, утвержденные после 1993 г. По-прежнему действуют рекомендации (Р), рекомендации метрологических институтов (МИ) и другие нормативные документы, принятые до введения в действие федерального закона «О техническом регулировании». В этих документах, еще не подвергшихся переработке, в качестве головной организации страны по метрологии, стандартизации и сертификации назван ныне не существующий Госстандарт России.

Термин *сертификация* в Российской Федерации стал широко применяться после принятия в 1992 г. закона РФ «О защите прав потребителей», и под ней понималась единственная форма подтверждения соответствия выпускаемой продукции установленным требованиям, главным образом — требованиям безопасности ее потребления. Правовые нормы сертификации продукции были установлены законом РФ «О сертификации продукции и услуг». Обязательные требования к продукции устанавливались главным образом в государственных стандартах.

Федеральным законом «О техническом регулировании» установлено, что сертификация — это одна из форм подтверждения соответствия, выполняемая независимым испытательным центром (лабораторией). Другая форма подтверждения соответствия — *декларирование соответствия* — либо осуществляется самим изготовителем (продавцом) на основании собственных доказательств, либо, если собственных доказательств недостаточно, с помощью третьей стороны, привлекаемой изготовителем для сбора доказательств, например испытательного центра, проводящего дополнительные измерения. Обязательные для исполнения требования к выпускаемой продукции, работам или услугам теперь должны устанавливаться в новых для нашей страны нормативных документах — *технических регламентах*, имеющих статус федерального закона.

Федеральный закон Российской Федерации «О техническом регулировании», вступивший в силу с 1 июля 2003 г., затронул не только сферы стандартизации и сертификации продукции и услуг, но и область обеспечения единства измерений. В законе указано, что технические регламенты, устанавливающие обязательные требования к продукции, содержат минимально необходимые требования в областях безопасности продукции, электромагнитной совместимости и единства измерений. Под единством измерений здесь следует понимать требования к средствам и методикам выполнения измерений при сертификации и испытаниях выпускаемой продукции.

После принятия федерального закона РФ «О техническом регулировании» перестал существовать Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт России), который в настоящее время называется Федеральным агентством по техническому регулированию и метро-

логии (Ростехрегулирование) и находится в ведении Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации (Минпромэнерго РФ). В целях демонополизации деятельности в области технического регулирования в Минпромэнерго РФ образован Департамент по техническому регулированию и метрологии, принявший на себя часть функций бывшего Госстандарта России. Распределение функций между агентством и департаментом в полной мере еще не сформировалось, поэтому в ближайшем будущем следует ожидать выхода новой редакции закона РФ «Об обеспечении единства измерений», принятого в 1993 г.

Несмотря на то что Госстандарта России больше не существует, авторы вынуждены использовать это наименование в тексте книги при изложении материала по обеспечению единства измерений (действует закон РФ «Об обеспечении единства измерений» в редакции федерального закона от 10.01.2003 г.), а также в главах, посвященных стандартизации и подтверждению соответствия (действуют нормативные документы: национальные стандарты, правила по метрологии, стандартизации, сертификации и др.). При изложении основных положений и особенностей федерального закона «О техническом регулировании» авторы используют наименования, применяемые в законе.

В высших учебных заведениях в учебные планы по многим техническим специальностям введен курс «Метрология, стандартизация, сертификация». Данное учебное пособие отражает опыт преподавания такого курса, включающего раздел «Электроизмерительная техника», на электромеханическом и электротехническом факультетах Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС).

Часть I

Метрология

ГЛАВА 1 Введение в метрологию

1.1. Величины, физические величины

Многообразие черт окружающего нас мира проявляется прежде всего в свойствах различных физических объектов, явлений и процессов. Каждый физический объект может быть описан с помощью различных свойств, присущих этому объекту, причем этих свойств при тщательном анализе оказывается огромное количество.

Свойство — категория качественная, оно отражает такую сторону объекта (явления или процесса), которая характеризует этот объект с новой стороны и в этом смысле обуславливает его отличие от других объектов или общность с ними. Одно и то же свойство может быть обнаружено у многих объектов или быть присутствующим только некоторым из них.

Так, массой, геометрическими размерами, температурой или плотностью обладают все материальные тела, а ферромагнитной характеристикой или кристаллической структурой — только некоторые из них. Каждое из свойств физических объектов прежде всего должно быть обнаружено, затем описано и классифицировано, и после этого можно приступать к его количественному изучению.

Для количественного исследования свойств физических объектов, явлений и процессов вводится понятие *величины*. Величина существует не сама по себе, а постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной.

Все величины можно разделить на два вида: *реальные* и *идеальные* (рис. 1.1).

Идеальные величины относятся в основном к области математики, и метрология как наука ими не занимается, хотя и использует в практике обработки результатов измерений. Идеальные величины могут быть вычислены тем или иным способом и при определенных условиях могут не иметь погрешности вычисления, чего нельзя сказать о величинах реальных.

Реальные величины, в свою очередь, делятся на *физические* (ФВ) и *нефизические*. Физическая величина может быть определена как величина, присущая свойствам материальных объектов, а также физических явлений и процессов. Физические величины изучают в рамках естественных и технических наук. Нефизические величины используют в своей практике общественные науки, такие как философия, социология, экономика, психология и т. д.

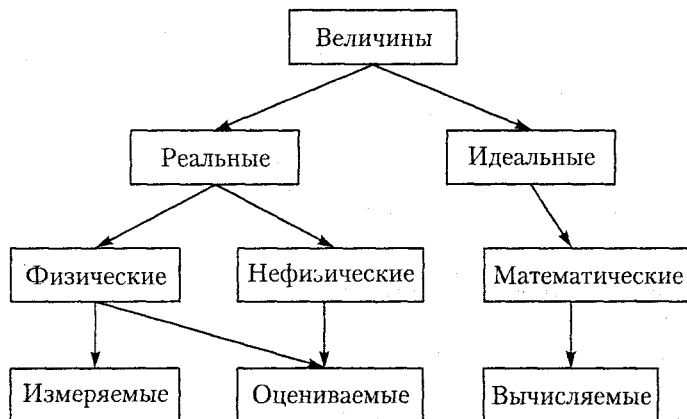


Рис. 1.1. Виды величин

Для нефизических величин единица измерения не может быть введена в принципе. Они могут быть только оценены с использованием экспертных оценок, балльной системы, набора тестов, расчетных коэффициентов и т. п. Нефизические величины, при оценке которых неизбежно влияние субъективного фактора, так же, как и величины идеальные, к области метрологии не относятся.

Метрология как наука занимается физическими величинами. Физические величины разделяют на *измеряемые* и *оцениваемые*. Измеряемая физическая величина имеет свою единицу измерения и может быть выражена количественно в виде определенного числа единиц измерения. Основное уравнение измерения имеет вид

$$Q = q[Q],$$

где Q — истинное значение физической величины; q — числовое значение физической величины; $[Q]$ — единица измерения физической величины.

Следует оговориться, что реальный результат измерения X отличается от истинного значения физической величины Q на значение погрешности измерения Δ .

Для определения размера физической величины используют некоторое измерительное преобразование, позволяющее установить однозначное соответствие размера физической величины и ее числового значения.

Измеряемая физическая величина, для которой установлена единица измерения, имеет *линейное измерительное преобразование*. Измерительное преобразование называется линейным, если при увеличении размера физической величины Q на ΔQ результат преобразования (числовое значение) q увеличивается на Δq , а при увеличении ΔQ в n раз Δq увеличивается также в n раз. Другими словами, при увеличении Q на одну единицу измерения $[Q]$ числовое значение физической величины q также увеличивается на одну единицу.

Физические величины, для которых по тем или иным причинам не найдено линейное измерительное преобразование, не имеют единицы измерения и не могут быть измерены. Их размер может быть только оценен. Под оцениванием в таком случае понимается операция приписывания данной физической величине определенного числа, характеризующего ее размер.

Размеры физических величин как измеряются, так и оцениваются при помощи шкал.

Шкала физической величины — это упорядоченная совокупность значений физической величины, служащая исходной основой для измерений данной величины.

В дальнейшем под термином «величина» будем понимать только физические величины.

1.2. Виды физических величин, измерительные шкалы

Среди множества специфических проявлений свойств физических объектов выделяют три наиболее общих проявления в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности, описываемых простейшими выражениями.

- **Отношение эквивалентности** — это отношение, в котором данное свойство X у различных объектов оказывается одинаковым или неодинаковым:

$$X(A) \approx X(B) \text{ или } X(A) \neq X(B).$$

- **Отношение порядка** — это отношение, в котором данное свойство X у различных объектов оказывается больше или меньше:

$$X(A) > X(B),$$

причем если $X(A) > X(B)$ и $X(B) > X(C)$, то $X(A) > X(C)$.

- **Отношение аддитивности** — это отношение, в котором однородные свойства различных объектов могут суммироваться:

$$X(A) + X(B) = X(C).$$

В зависимости от проявлений свойств физических объектов в отношении эквивалентности, порядка и аддитивности можно выделить три вида физических величин, размер которых определяется по принципиально различным правилам. В четвертую группу входят свойства объектов, не имеющие по тем или иным причинам количественной оценки.

К первой группе относят экстенсивные величины, для которых определены операции сложения и вычитания, то есть величины, в результате сложения которых (имеются в виду величины одного свойства) получается качественно та же самая физическая величина. Операция сложения определяет операцию умножения размеров величин на любое рациональное число n . Результат такого умножения есть просто сумма n размеров данной величины.

К подобным величинам относятся, например, длина, масса, сила электрического тока и т. д. Эти величины наиболее удобны в физике. Они входят в основные физические законы и соотношения, поэтому часто только их и называют физическими величинами.

Вторая группа — это интенсивные величины, для которых определены отношения порядка и эквивалентности (больше — меньше, теплее — холоднее, одинаково теплые). Операция сложения для таких величин не имеет физического смысла. Но интервалы этих величин (разница двух размеров) относятся уже

к величинам первой группы (экстенсивные величины) и для них определена операция сложения. В виде разности размеров эти величины входят в физические законы и соотношения.

Величины, относящиеся ко второй группе, имеют единицу измерения, но их шкалы не имеют естественного нуля. К числу таких величин относятся время и электрический потенциал. Сложить две календарные даты, отсчитанные от Рождества Христова, не представляется возможным, но суммируя несколько интервалов времени, например, измеренных секундомером, в результате можно получить физически такой же интервал времени. Взяв разницу двух электрических потенциалов, получим величину первой группы — разность потенциалов, для которой определены операции сложения и умножения.

К третьей группе относят величины, для которых определены только отношения порядка и эквивалентности (интенсивные величины). Существование подобных отношений устанавливается теоретически, исходя из общефизических соотношений, или экспериментально, с помощью специальных измерительных преобразований и технических устройств, производящих эти преобразования. Так, мы знаем, что медь тверже резины, но для обнаружения различия в твердости двух образцов необходимы специальные измерительные преобразования и соответствующие технические устройства.

К величинам третьей группы наряду с твердостью относят интенсивность землетрясений, силу ветра и другие величины, единицу измерений для которых ввести не удастся, но которые тем не менее оцениваются с помощью технических устройств по некоторому алгоритму. Часто в качестве числовых значений физических величин используются отвлеченные числа или баллы, характеризующие размер величин в соответствии с выбранным измерительным преобразованием.

Например, оценка интенсивности землетрясений в сейсмических шкалах разных стран различна. В ее основу положены бытовые последствия землетрясений, но на уровне измерительных приборов фиксируются колебания земной коры. Силу ветра оценивают по его скорости. О линейности примененных измерительных преобразований в этих случаях говорить не приходится из-за того, что прямым измерениям подвергаются другие величины, по которым производится оценка интересующих нас физических величин, причем вид косвенной связи между величинами неизвестен. Поэтому единицы измерений у величин третьей группы отсутствуют.

Следует отметить, что определения многих физических величин не являются неизменными, а постоянно уточняются. Уточнение определений происходит в направлении, позволяющем вскрыть новые физические соотношения между величинами и таким образом перевести величины третьей группы в первую или хотя бы во вторую. И примеры этого в истории имеются.

Так, температуру тел следовало отнести к величинам третьей группы, когда ее определяли интуитивно как степень нагретости тела (теплее — холоднее, одинаково теплые). Определение, связавшее температуру со шкалой термометра, позволило перевести ее во вторую группу величин. Шкалы Цельсия или Фаренгейта уже имеют единицу измерения, что говорит о линейности измерительного преобразования, но ноль шкалы выбран произвольно. Благодаря этому температура вошла в некоторое число уравнений физики, но только в виде интервалов

температур. И только определение, которое дал лорд Кельвин, основанное на законе состояния идеальных газов, позволило перевести температуру в разряд величин первой группы и сделать ее равноправной физической величиной. Шкала термодинамической температуры, или шкала Кельвина, имеет не только единицу измерения, но и естественный «ноль» шкалы, то есть температуру, при которой отсутствует тепловое движение частиц.

Выделяют и четвертую группу — для свойств физических объектов, которые проявляют себя только в отношении эквивалентности. Эти свойства не относят к величинам, и термин «размер» для них применить нельзя. Но эти свойства могут быть обнаружены, идентифицированы и классифицированы. Они могут быть как-то названы, им может быть присвоено некоторое число, ничего не говорящее о размере и характеризующее данное свойство с точки зрения предъявляемых к нему требований. Примерами объектов, обладающих свойствами в отношении эквивалентности, могут служить, например, виды животных (заяц или медведь), атлас цветов в оптических и стандартные образцы в физико-химических измерениях, различные каталоги и даже таблица Д. И. Менделеева, если рассматривать ее как перечень наименований химических элементов и использовать для идентификации атомов вещества.

Для обоснования возможности количественного представления, то есть измерения или оценки величин, относящихся к различным группам, необходимо остановиться на понятии *измерительное преобразование*. Это такой вид преобразования, при котором устанавливается взаимно однозначное соответствие между размерами двух величин. Измерительное преобразование осуществляется техническими устройствами — средствами измерений. Преобразуемая (измеряемая) величина тогда является входной, а результат преобразования — выходной величиной.

Целью измерения является нахождение *размера физической величины*, который определяется как количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

В результате измерения получают *значение физической величины* — выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Проявления (количественные или качественные) любого свойства реальных объектов образуют в нашем представлении упорядоченные множества чисел или, в более общем случае, условных знаков, которые называют *шкалами измерений*.

Шкала физической величины — упорядоченная совокупность значений физической величины, служащая исходной основой для измерений данной величины.

Условная шкала физической величины — это шкала физической величины, исходные значения которой выражены в условных единицах.

В зависимости от вида проявлений свойств физических объектов различают пять основных типов шкал измерений.

1.2.1. Шкала наименований (шкала классификаций)

Шкала наименований — это самый простой тип шкал, основанный на приписывании качественным свойствам объектов чисел или имен. Такие шкалы применяют для свойств, проявляющих себя только в отношении эквивалентности, которые у различных объектов могут совпадать или не совпадать. Измерительное

преобразование для этих свойств не найдено либо не требуется по условиям познания данного объекта или явления. В таких шкалах отсутствуют понятия нуля и единицы измерения. Часто по таким шкалам классифицируют свойства, определяемые с помощью органов чувств человека (экспертные оценки).

Примерами шкал наименований могут служить атлас цветов для идентификации оттенков цвета или экспертные оценки запахов.

1.2.2. Шкала порядка (шкала рангов)

Шкалы порядка применяют для оценивания размеров величин третьей группы, которые проявляют себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления данного свойства. В этих шкалах обычно имеется понятие о нуле шкалы, но единицы измерения ввести нельзя в принципе, так как для них не установлена пропорциональность (линейность) изменения размеров величины относительно выбранного измерительного преобразования. Поэтому эти величины не измеряют, а оценивают по заранее выбранным правилам в порядке убывания или возрастания размера величины.

Оценивание может осуществляться двумя способами. Во-первых, может быть использована *условная шкала* с нанесенными на нее опорными (реперными) точками. К таким шкалам, например, относится шкала Мооса для определения твердости минералов, которая содержит десять опорных минералов с условными числами твердости: 1 — тальк, 2 — гипс, 3 — кальций, 4 — флюорит, 5 — апатит, 6 — ортоклаз, 7 — кварц, 8 — топаз, 9 — корунд, 10 — алмаз. Отнесение минерала к той или иной степени твердости осуществляется на основании царапания испытуемого материала опорным. Если после царапания кварцем (7) на нем остается след, а после царапания ортоклазом (6) — не остается, то твердость испытуемого материала составляет более 6, но менее 7. Более точный ответ в этом случае дать невозможно.

Во-вторых, может быть подобрано измерительное преобразование, переводящее размер изучаемой величины в некоторую совокупность размеров величин первой группы, числовые значения которых и принимают за числовые значения данной величины.

Так, например, твердость по шкале Бринелля определяют, вдавливая стальной закаленный шар в образец с определенным усилием, а числовое значение твердости рассчитывают как отношение этого усилия к площади отпечатка на испытуемом материале. Аналогично определяют твердость по шкале Виккерса, но вместо стального шарика в образец вдавливают алмазную пирамиду.

Как уже отмечалось, линейность преобразований величин третьей группы проверить нельзя. Можно лишь утверждать, что их числовые значения связаны друг с другом некоторым монотонным преобразованием.

1.2.3. Шкала интервалов (шкала разностей)

Измерительные шкалы интервалов применяют для измерений интервалов величин второй группы, которые, в отличие от самих величин, удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности. Шкала интервалов состоит из одинаковых интервалов и, как следствие, линейна и имеет единицу измерения. Ноль такой шкалы принят по соглашению и поэтому является условным.

К таким шкалам относится летоисчисление по различным календарям, в которых за нулевую отметку принимается либо Рождество Христово, либо сотворение мира. К таким же шкалам относятся температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта, Реомюра.

Так, во введенной Фаренгейтом температурной шкале первой опорной точкой и началом отсчета служила температура смеси льда, поваренной соли и нашатыря (как наиболее низкая температура, которую можно было достаточно точно воспроизвести в то время), а в качестве второй опорной точки была выбрана температура человеческого тела. Единица температуры определялась как одна девяносто шестая часть полученного таким образом основного интервала и была названа градусом Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$). Температура таяния льда оказалась равной 32°F , а температура кипения воды — 212°F .

В температурной шкале Цельсия началом отсчета является температура таяния льда, второй опорной точкой служит температура кипения воды, а за единицу температуры принят градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), или одна сотая часть основного интервала.

В шкале измерения времени единица измерения воспроизводится непосредственно как интервал времени, начало отсчета выбирают каждый раз по-разному в зависимости от конкретных условий изучаемого явления и часто просто связывают с началом этого явления.

Аналогично строится шкала для измерения электрических потенциалов.

В общем случае размер Q физической величины второй группы может быть определен по шкале интервалов на основании уравнения

$$Q = Q_0 + q[Q],$$

где Q_0 — начало отсчета; $[Q]$ — единица измерения; q — числовое значение величины.

1.2.4. Шкала отношений

Физические шкалы отношений являются наиболее совершенными из всех перечисленных, так как имеют не только единицу измерения, но и естественный ноль шкалы. Размер величины Q может быть описан уравнением

$$Q = q[Q].$$

С помощью этих шкал измеряются физические величины первой группы, для которых справедливы отношения эквивалентности, порядка и аддитивности и определены все арифметические операции: сложение, вычитание, умножение и деление, — что имеет важное значение для измерения этих величин.

Из приведенного уравнения следует, что числовое значение величины первой группы показывает, во сколько раз значение измеряемой величины больше некоторого значения, принятого за единицу, и это числовое значение q зависит от размера принятой единицы.

Примерами величин, для которых существуют шкалы отношений, являются масса, длина, термодинамическая температура, связанная со шкалой Кельвина, сила электрического тока, электрическое напряжение и т. д. Действительно, складывая две массы m_1 и m_2 , получим в результате физически то же свойство — массу с размером m_3 , причем $m_3 = m_1 + m_2$.

1.2.5. Абсолютные шкалы

Иногда для физических величин, для которых справедливы отношения эквивалентности, порядка и аддитивности, но дополнительно имеющих естественное определение единицы измерения, не зависящее от принятой системы единиц, используют понятие *абсолютных шкал*. Эти шкалы обладают всеми признаками шкал отношения, но при этом имеют безразмерную единицу измерения. Это относительные величины, такие как коэффициенты усиления, ослабления, плоский или телесный угол и т. д. Введение таких величин объясняется удобством выражения некоторых физических процессов или явлений, их математического описания и практической реализации в измерительной технике.

1.3. Системы единиц физических величин и принципы их построения

Количественная информация о свойствах изучаемых объектов может быть получена при помощи измерения. Для того чтобы ее можно было получать, то есть устанавливать различия в количественном содержании свойства, отображаемого физической величиной, в метрологии введены понятия размерности и размера. Эти понятия связаны с тем, что любая физическая величина может выделяться качественно и определяться количественно.

Отражением качественного различия между физическими величинами является их *размерность*. В соответствии с международным стандартом ISO 31/0 размерность следует обозначать dim. Размерность основных физических величин обозначается прописными латинскими или греческими буквами. Если основными физическими величинами являются длина, масса и время, то они обозначаются L , M , T соответственно.

Совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют в качестве функций независимых величин, называется *системой физических величин*. Физическая величина, условно принятая в качестве независимой от других величин системы, называется основной. Физическая величина, входящая в систему величин и определяемая через основные величины этой системы, называется производной.

При определении размерности производных величин используют уравнения связи — уравнения, отражающие связь между величинами, в которых буквенными символами обозначают физические величины. Уравнения связи могут отражать законы природы (например, закон Ома $I = U/R$) или быть определениями некоторых величин (например, плотности $\rho = m/V^3$). Чтобы найти размерность производной физической величины в некоторой системе величин, надо в правую часть уравнения связи, используемого для определения этой величины, вместо обозначений величин подставить их размерности. При этом соблюдаются следующие правила:

1. Размерности левой и правой частей уравнений должны быть одинаковыми, так как сравниваться между собой могут только одинаковые свойства.

2. Алгебра размерностей состоит из одного действия — алгебраического умножения, то есть над размерностями можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечение корня.

Размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей. Если зависимость между величинами имеет вид $Q = ABC$, то

$$\dim Q = \dim (ABC) = \dim A \dim B \dim C.$$

Размерность частного при делении одной величины на другую равна отношению их размерностей, то есть если $Q = A/B$, то

$$\dim Q = \dim A/B = \dim A/\dim B.$$

Для величины, возводимой в степень, то есть $Q = A^n$, размерность возводится в ту же степень:

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

Пример 1.1. Если сила, согласно второму закону Ньютона, $F = ma$, где ускорение $a = v/t$, то $\dim F = \dim m \dim a = ML/T^2 = LMT^{-2}$.

Таким образом, размерность — это выражение в форме степенного многочлена, отражающее связь данной физической величины с основными физическими величинами:

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

где L, M, T, \dots — размерности соответствующих основных физических величин; α, β, γ — целые или дробные, положительные или отрицательные вещественные числа. Показатели степени, в которую возведена размерность основной величины, называют *показателем размерности*. Если все показатели размерности равны нулю, то такую величину называют *безразмерной*. Показатель размерности основной величины в отношении самой себя равен единице и не зависит от других величин, то есть формула размерности основной величины совпадает с ее символом. Теория размерностей широко используется для выяснения зависимости между величинами и оперативной проверки правильности формул.

Пример 1.2. Найдено выражение для определения скорости в момент времени t

$$v_t = v_0 + at^2/2,$$

где v_0 — скорость в начальный момент времени; a — ускорение. На основании алгебры размерностей

$$LT^{-1} = LT^{-1} + LT^{-2} T^2 = LT^{-1} + L,$$

то есть размерности правой и левой частей уравнения не совпадают, значит, в формуле присутствует ошибка. Если изменить показатель степени во втором слагаемом:

$$v_t = v_0 + at/2,$$

то размерности правой и левой частей уравнения совпадут. Но из курса физики известно, что

$$v_t = v_0 + at,$$

то есть правильность введения безразмерного коэффициента следует проверять другим путем, например экспериментально.

Количественной характеристикой (определенностью) измеряемой величины служит ее *размер*. Получение информации о размере физической величины является содержанием любого измерения. При этом нет иного экспериментального способа получить информацию о каких бы то ни было размерах, как выполнить сравнение их между собой. При измерении по шкале отношений или шкале интервалов выполняется сравнение неизвестного размера с известным, принятым за единицу.

Единица измерения физической величины — физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин. *Значение физической величины* — выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Значение измеряемой величины Q определяется числовым значением q , которое является отвлеченным числом, входящим в значение величины, и некоторым размером $[Q]$, принятым за единицу:

$$Q = q [Q]. \quad (1.1)$$

Увеличение или уменьшение $[Q]$ приводит к обратно пропорциональному изменению q . Числовые значения измеряемых величин зависят от того, какие единицы измерения используются. Если допустить произвол в выборе единиц, то результаты измерений окажутся несопоставимыми между собой. Чтобы этого не произошло, единицы измерения физических величин устанавливаются по определенным правилам и закрепляются законодательным путем.

Система единиц физических величин — это совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принципами, принятыми для заданной системы физических величин. На практике широко применяется понятие *узаконенные единицы*, которое раскрывается как «система единиц и/или отдельные единицы, установленные для применения в стране в соответствии с законодательными актами».

Основной принцип построения систем единиц заключается в удобстве их использования. Для обеспечения этого принципа в произвольном порядке выбираются основные физические величины, а затем, также произвольно, выбирают единицы основных физических величин. По этой причине могут быть построены самые разные системы единиц физических величин. Ученые стремятся к созданию теоретически оптимальной системы единиц или по возможности близкой к ней. Однако правила, по которым тот или иной комплекс единиц выбирают в качестве основного, не могут быть обоснованы теоретически. Единственные аргументы в пользу выбора — эффективность и целесообразность использования системы. Для практических целей выполнения измерений в качестве основных величин и их единиц следует выбирать такие, которые можно воспроизвести с наивысшей точностью и которые удобно использовать для установления единиц производных физических величин.

Исходя из сказанного можно принять следующий порядок построения систем единиц:

1. Выбираются основные физические величины.
2. Устанавливаются единицы основных физических величин.
3. Выбираются уравнения связи и устанавливаются единицы производных физических величин.

Для обеспечения основного принципа построения системы единиц — практической целесообразности — применяются следующие критерии:

- простота образования производных физических величин и их единиц, возможность приравнять к единице коэффициенты пропорциональности в уравнениях связи;
- высокая точность воспроизведения основных и производных единиц и передачи их размеров нижестоящим эталонам и рабочим средствам измерений;
- возможность восстановления эталонов основных единиц в случае утраты;
- преемственность единиц, сохранение их размеров и наименований при введении новой системы единиц;
- близость размеров основных и производных единиц к размерам физических величин, наиболее часто встречающихся на практике;
- выбор в качестве основных минимального числа физических величин, отражающих наиболее общие свойства материи.

Приведенные критерии вступают в противоречие между собой, поэтому путем соглашения выбирается наиболее выгодный для практики вариант.

Производные величины выражаются через основные величины на основе известных уравнений связи между ними, при этом различают уравнения связи между величинами, в которых под буквенными символами понимаются физические величины, и уравнения связи между числовыми значениями физических величин, в которых под буквенными символами понимают числовые значения величин, соответствующих выбранным единицам. Вид уравнения связи между числовыми значениями зависит от выбора единиц.

Пример 1.3. Если в уравнении скорости равномерного движения $v = l/t$ скорость v выразить в километрах в час, длину пути l — в метрах, а время t — в секундах, то получим:

$$v = v_{\text{км/ч}} \text{ (км/ч)}; \quad l = l_{\text{м}} \text{ (м)}; \quad t = t_{\text{с}} \text{ (с)}; \quad v_{\text{км/ч}} \left(\frac{\text{км}}{\text{ч}} \right) = \frac{l_{\text{м}}}{t_{\text{с}}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right),$$

или

$$v_{\text{км/ч}} = \left(\frac{\text{ч}}{\text{км}} \right) \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \frac{l_{\text{м}}}{t_{\text{с}}}.$$

Учитывая, что $1 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$ и $1 \text{ км} = 1000 \text{ м}$, получим следующее уравнение связи между числовыми значениями:

$$v_{\text{км/ч}} = 3,6 l_{\text{м}} / t_{\text{с}}.$$

Таким образом, выражая скорость в километрах в час, длину пути — в метрах, время — в секундах, получим уравнение связи с числовым коэффициентом 3,6. Если выразить скорость в милях в час, длину пути — в ярдах, время — в секундах, то уравнение между числовыми значениями примет вид

$$v_{\text{миль/ч}} = 2,045 l_{\text{ярд}} / t_{\text{с}}.$$

Пусть производная физическая величина Q образуется путем перемножения двух основных величин A и B : $Q = A \cdot B$, тогда $q[Q] = a[A]b[B]$, и единица произ-

водной величины выражается через единицы основных величин с помощью соотношения

$$[Q] = (ab/q)[A][B].$$

Для случая, когда $Q = A/B$,

$$[Q] = (a/qb)[A][B]^{-1}.$$

В общем случае единицы производных величин выражаются через единицы основных величин с помощью степенного одночлена

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

где коэффициент пропорциональности k полагается безразмерным, а величины $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ являются уже известными показателями размерности. К коэффициенту k предъявляют еще одно требование: он должен равняться 1. Получаемые при этом условии так называемые *когерентные* (или *согласованные*) системы единиц являются наиболее удобными.

Когерентная производная единица физической величины — производная единица физической величины, связанная с другими единицами системы единиц уравнением, в котором числовой коэффициент принят равным 1.

Когерентная система единиц физических величин — система, состоящая из основных единиц и когерентных производных единиц.

Различают кратные и дольные единицы физических величин, системные и внесистемные единицы.

Кратная единица физической величины в целое число раз больше системной или внесистемной единицы.

Дольная единица физической величины в целое число раз меньше системной или внесистемной единицы.

Системная единица физической величины — единица, входящая в принятую систему единиц. Все основные, производные кратные и дольные единицы являются системными.

Внесистемная единица физической величины — единица, не входящая в принятую систему единиц. Внесистемные единицы (по отношению к единицам СИ) разделяются на четыре группы: допускаемые наравне с единицами СИ; допускаемые к применению в специальных областях; временно допускаемые; устаревшие (не допускаемые).

Впервые понятие системы единиц было введено немецким математиком К. Гауссом в 1832 г. В дальнейшем по мере развития науки и техники возникали все новые и новые системы, пока их количество не стало тормозом для дальнейшего развития. В этих условиях XI Генеральная конференция по мерам и весам в 1960 г. приняла Международную систему единиц физических величин.

Классом систем единиц физических величин называется совокупность систем единиц, различающихся между собой только размером, но не физической природой основных единиц физических величин. Система СГС и система СИ принадлежат к одному классу, система МКГСС — к другому. Основные единицы системы СГС: сантиметр — единица длины, грамм — единица массы, секунда — единица времени. Основные единицы в системе СИ: метр, килограмм, секунда (подробнее о системе СИ см. в разделе 1.5). Системы СГС и СИ относятся к классу

LMT. Система МКГСС относится к классу LFT, ее основные единицы: метр — единица длины, килограмм-сила — единица силы, секунда — единица времени. Размерность определяется классом систем единиц, и в разных классах систем единиц размерность одной и той же физической величины будет различна. Например, размерность силы в классе LMT будет $[F] = LMT^{-2}$, а в классе LFT она будет F , как размерность основной единицы.

1.4. Из истории создания систем единиц физических величин

Измерения человек начал производить уже в глубокой древности, но в начальный период старался свести их к счету. Время выражалось в сутках, месяцах, годах; расстояние — в шагах, локтях, выстрелах, днях пути; количество товаров — в штуках, тюках, пачках, дюжинах, головах скота и т. д. Эти измерения были весьма грубы, и их результаты зависели как от индивидуальных особенностей наблюдателя, так и от вида товара. Технические устройства — средства измерений — отсутствовали.

По мере развития торговли, а затем и промышленности появилась необходимость иметь более точную количественную оценку различных величин: линейных размеров, расстояний, объемов, массы, времени и т. д. Так появились меры длины, массы (веса), объема и первые технические приспособления: весы, часы и т. д., — пришедшие на смену обычным палке, горшку и камню.

О единстве измерений в нашем понимании речи еще не было, так как в каждом местечке, княжестве или государстве «своим аршином мерили». Многообразие мер одного наименования в пределах некоторого региона могло достигать нескольких десятков. Так, в XVIII в. в Европе существовало до сотни различных футов, около полусотни различных миль, свыше 120 фунтов. Неодинаковые единицы измерения имели не только различные страны, но и отдельные провинции одного и того же государства.

Россия здесь не была исключением. В то время в разных областях России в ходу были различные по размеру вершки и пяди, аршины и локти, сажени и версты. В более поздние времена, когда Россия стала активно участвовать в международной торговле через прорубленное «окно в Европу», в ходу появились европейские наименования мер: футы и дюймы, морская миля и др. Аналогичное состояние наблюдалось для мер массы, площади и объема (вместимости для жидких и сыпучих веществ).

Соотношения между мерами одной величины в истории неоднократно изменялись. Так, верста в разное время и в различных областях России колебалась от 1000 до 500 сажений, сажень приравнивали к трем локтям, а позднее к трем аршинам. Петр I приравнял сажень к семи английским футам с делением ее на три аршина.

Надзор за мерами в Древней Руси поручался духовенству, которое должно было «торговой веси и всякие мерила блюсти без пакости — ни умножати, ни умалити, за все то дати ему ответ во день страшного суда». В ведении церкви находились весы и меры, служащие для взаимных расчетов при купле и продаже.

Началом регулярного государственного надзора за состоянием мер и весов в России считают 1845 г., когда вступило в действие «Положение о мерах и весах», разработанное комиссией образцовых мер и весов. Положение устанавливало порядок надзора за изготовлением, выпуском, поверкой и клеймением мер и весов. Предусматривались также внезапные проверки находящихся в применении мер и весов, устанавливались пределы допустимой погрешности. Были изготовлены основные образцы русских мер: платиновая сажень и платиновый фунт. Для хранения их на территории Петропавловской крепости в Санкт-Петербурге было построено негорючее здание – Депо образцовых мер и весов (1842 г.).

Основными задачами Депо являлись хранение эталонов, составление таблиц русских и зарубежных мер, изготовление образцовых мер и рассылка их в различные регионы страны. Контроль правильности мер и весов на местах входил в обязанности городских дум, управ и казенных палат.

Многообразие мер, применявшихся в разных странах, и десятичная система образования дюльных (меньшего размера) и кратных (большого размера) мер сильно затрудняли пересчет одних единиц в другие. Так, например, 1 аршин = 16 вершкам, 1 пуд = 40 фунтам, 1 золотник¹ = 96 долям, 1 бутылка² = 5 чаркам, 1 фут = 12 дюймам и т. п.

Еще в XVII–XVIII вв. обсуждался вопрос о создании единого для всех народов и устойчивого во времени масштаба измерений, и важный шаг в этом направлении был сделан во времена Французской революции в конце XVIII в. Тогда по инициативе шотландского изобретателя и предпринимателя Дж. Уатта во Франции было принято решение о создании метрической системы мер, основанной на естественных и неразрушимых эталонах и построенной по десятичному принципу. В разработке системы принимали участие французские ученые П. Лаплас, Ж. Лагранж, Ж. Деламбре, П. Мешен и др. Было решено в основу системы положить единицу длины – 1 метр, равный одной десятиллионной части четверти земного меридиана, проходящего через Париж. За единицу веса (в те времена масса и вес считались одной и той же величиной) был принят вес одного кубического дециметра чистой воды при температуре ее наибольшей плотности (около +4 °С).

Тщательные геодезические и астрономические измерения, с риском для жизни выполненные в неспокойной революционной Франции Жаном-Батистом Деламбре и Пьером Мешеном (1792–1798 гг.), позволили определить длину Парижского меридиана и изготовить (1799 г.) эталон метра в виде платиновой меры шириной 25 мм и толщиной 4 мм. Платиновый метр передали на хранение в Национальный архив Франции, где он находится и по сей день. По этой причине первый эталон метра получил название «метр Архива» или «архивный метр».

Первый прототип килограмма, изготовленный на основе тщательных взвешиваний одного кубического дециметра чистой воды при температуре 4 °С, представлял собой платиновую цилиндрическую гирию высотой 39 мм и таким же диаметром. Как и прототип метра, он был передан на хранение в Национальный архив Франции и получил название «килограмма Архива».

¹ Мера массы.

² Мера вместимости жидких веществ.

Принятая французским парламентом метрическая система мер еще не была системой единиц в современном понимании, так как мал был перечень величин, охваченных ею. К числу несомненных достоинств этой системы следует отнести десятичный принцип образования дольных и кратных единиц. В действие эта система во Франции была введена только в 1840 г.

Повторные измерения дуги меридиана, выполненные в XIX в., показали, что длина «метра Архива» несколько короче того, каким он должен быть по определению, а повторные измерения массы одного кубического дециметра чистой воды при температуре 4 °С показали, что масса «килограмма Архива» немного превышает эту массу. Так как в дальнейшем при более точных измерениях можно было получить различные значения метра и килограмма, Международная комиссия по прототипам метрической системы, созданная по инициативе Петербургской академии наук, в 1872 г. решила отказаться от «естественных» эталонов метра и килограмма и принять «метр Архива» и «килограмм Архива» в качестве исходных мер метрической системы.

В 1875 г. была созвана дипломатическая конференция, на которой 17 государств, в том числе и Россия, подписали Метрическую конвенцию, в соответствии с которой для стран-участниц были изготовлены образцы метра и килограмма из сплава платины и иридия. Прототип метра представлял собой штриховую меру общей длиной 102 см, на расстояниях 1 см от краев которой были нанесены штрихи, определяющие единицу длины — метр. Прототип килограмма представляет собой гирю в виде прямого цилиндра с закругленными ребрами диаметром и высотой 39 мм. По решению I Генеральной конференции по мерам и весам, состоявшейся в 1889 г. в Париже, Россия получила два прототипа метра (№ 11 и 28) и два прототипа килограмма (№ 12 и 26).

В XIX в. непрерывно укреплялось взаимодействие различных отраслей науки и техники, расширялись международные научные и экономические связи. Это настойчиво требовало единообразия в выражении результатов измерений физических величин. Начались работы по созданию приемлемой для всех системы единиц.

Методику построения такой системы впервые предложил в 1832 г. немецкий ученый К. Гаусс. Его идея заключалась в том, что за основу системы принимают несколько основных независимых друг от друга физических величин, единицы измерения которых выбирают независимо одна от другой и называют основными единицами системы. Все остальные величины называют производными и их единицы измерений устанавливают через основные, используя известные физические законы и соотношения. Эти соотношения в метрологии называют уравнениями связи между величинами.

К. Гаусс по предложенной им методике построил систему на основе трех основных единиц: миллиметра как единицы длины, миллиграмма как единицы массы, секунды как единицы времени. Он назвал свою систему абсолютной. Единицы величин, предложенные К. Гауссом, были неудобны для использования в господствовавших в те времена разделах физики, поэтому его система единиц широкого распространения не получила, но методика построения системы осталась.

В дальнейшем стали появляться системы единиц физических величин, приспособленные для нужд в различных областях науки и техники. В числе других в практике измерений применялись следующие системы.

Система СГС. Была разработана еще в 1861–1870-е гг. и введена в мировую практику 1-м Международным конгрессом электриков в 1881 г. Основными единицами системы являются сантиметр, грамм, секунда (СГС). Исторически сложилось так, что в разное время существовало семь разновидностей системы СГС, применявшихся в разных видах измерений. Так, в электрических измерениях применялась система СГСЭ, в которой наряду с тремя основными единицами принималась равной безразмерной единице диэлектрическая проницаемость вакуума, что позволяло связать механические величины с электрическими, используя закон Кулона. В магнитных измерениях использовали систему СГСМ, в которой принималась равной безразмерной единице магнитная проницаемость. Размеры электрических и магнитных единиц в этих системах не совпадали друг с другом. Например, единица силы электрического тока в системе СГСЭ имеет значение 1 ед. СГСЭ = $3,33564 \cdot 10^{-10}$ А, а в системе СГСМ — 1 ед. СГСМ = 10 А. Этого недостатка лишена так называемая симметричная система СГС, в которой одновременно приравнены к единице диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума. Но в «наказание» за это удобство в некоторых уравнениях электромагнетизма появляется дополнительный множитель в виде физической константы — скорости света.

Система СГС (симметричная) отличается стройностью и логичностью построения, она когерентна (согласована) и широко применялась в большинстве областей физики для измерений и расчетов до введения в практику международной системы СИ. Но следует отметить, что многие единицы СГС имеют неудобные для практического использования размеры.

Система МКГСС. Как известно, первый прототип килограмма был принят как единица веса. Применение килограмма как единицы веса, а затем как единицы силы привело в конце XIX в. к созданию системы единиц с тремя основными единицами: метр — единица длины, килограмм-сила — единица силы, секунда — единица времени (система МКГСС). Эта система применялась в механике и в технике. Одной из причин популярности системы явилось удобство выражения сил в единицах веса и удобный для практики размер основной единицы силы. Основным недостатком системы является ее несогласованность (некогерентность) с единицами электрических и магнитных величин, так что для перехода в расчетах от механических величин к электрическим требуется переходный множитель. Кроме того, единица массы системы МКГСС связана с единицей массы системы СИ через ускорение свободного падения, 1 ед. МКГСС $\approx 9,81$ кг.

Система МТС. Впервые была установлена во Франции. Основными единицами системы МТС являются: метр — единица длины, тонна — единица массы и секунда — единица времени. Выбор тонны в качестве единицы массы казался удачным, так как достигалось соответствие между единицами длины, объема и массы (с точностью, достаточной для многих технических расчетов, 1 т соответствует массе 1 м^3 воды).

Абсолютная практическая система электрических единиц. Была установлена 1-м Международным конгрессом электриков в 1881 г. в качестве производной

от системы СГСМ и предназначалась для практических измерений с целью приближения к практике размеров единиц электрических и магнитных величин. В абсолютной практической системе электрические и магнитные единицы были образованы умножением единиц системы СГСМ на соответствующие степени числа 10. Так появились распространенные ныне единицы электрических величин: вольт, ампер, ом, фарада. На 2-м Международном конгрессе электриков, состоявшемся в 1889 г., к этим единицам добавились джоуль, ватт, квадрант (впоследствии замененный на генри).

Система МКСА. Основными единицами системы являются метр, килограмм, секунда и ампер. Введение в число основных единиц единицы силы тока позволило согласовать механические единицы: метр, килограмм, секунду и др. — с практическими электрическими единицами: вольт, ом, ватт и т. д. В настоящее время система МКСА является составной частью международной системы единиц СИ.

1.5. Международная система единиц

Международная система единиц (международное сокращенное наименование SI, а в русской транскрипции СИ) построена на основе системы величин LMTI Ω JN. Решение о создании практической международной системы единиц было принято в 1948 г. на IX Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ). В 1960 г. проект Международной системы единиц, основанной на шести основных единицах, был утвержден. В 1971 г. к единицам СИ была добавлена седьмая основная единица — количество вещества — моль. Международная организация по стандартизации (ISO) издала международные стандарты ISO 31: 1992 «Величины и единицы» в 14 частях и ISO 1000: 1992 «Единицы СИ и рекомендации по использованию их кратных и некоторых других единиц».

Принципы построения СИ:

1. СИ базируется на семи основных единицах, размеры которых устанавливаются независимо друг от друга.
2. Производные единицы образуются с помощью простейших уравнений связи между величинами — определяющих уравнений, в которых размеры величин приняты равными единицам СИ. Для величины каждого вида имеется только одна единица СИ.
3. Производные единицы вместе с основными единицами формируют когерентную систему.
4. Наряду с единицами СИ к применению допущено ограниченное число внесистемных единиц (вне СИ — внесистемных) из-за их практической важности и повсеместного применения в различных областях деятельности.
5. Единицы СИ или внесистемные единицы могут применяться с приставкой, что означает умножение единицы на десять, возведенное в определенную степень. Единицы, содержащие приставку, называются десятичными кратными или дольными в зависимости от того, является показатель степени положительным или отрицательным.

Основными единицами Международной системы являются:

- **метр** (международное обозначение m; русское — м; размерность L) — единица длины, равная пути, пройденному в вакууме светом за интервал времени $1/299\,792\,458$ с (одоброено на XVII ГКМВ, 1983 г., резолюция 1);
- **килограмм** (международное обозначение kg; русское — кг; размерность M) — единица массы, равная массе международного прототипа килограмма (одоброено на III ГКМВ, 1901 г., резолюция 3);
- **секунда** (международное обозначение s; русское — с; размерность T) — единица времени, равная $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 (одоброено на XIII ГКМВ, 1967 г., резолюция 1);
- **ампер** (международное обозначение A; русское — А; размерность I) — единица силы электрического тока. Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н (одоброено на IX ГКМВ, 1948 г.);
- **кельвин** (международное обозначение K; русское — К; размерность Θ) — единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды (одоброено на XIII ГКМВ, 1967 г., резолюция 4);
- **кандела** (международное обозначение cd; русское — кд; размерность J) — единица силы света. Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540,10^{12}$ Гц, электрическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср (одоброено на XVI ГКМВ, 1979 г., резолюция 3);
- **моль** (международное обозначение mol; русское — моль; размерность N) — единица количества вещества. Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц (одоброено на XIV ГКМВ, 1971 г., резолюция 3).

Несмотря на то что названия единиц в разных языках различны, их обозначения являются международными, и по рекомендациям ISO 31-0:1992 никакие другие обозначения единиц, кроме международных, использовать не следует. Тем не менее ГОСТ 8.417 установил два вида буквенных обозначений величин: международное (с использованием букв латинского или греческого алфавита) и русское (с использованием букв русского алфавита). Но при договорно-правовых отношениях сотрудничества с зарубежными странами, при участии в деятельности международных организаций, а также в поставляемой за границу вместе с экспортной продукцией технической и другой документации применяют международные обозначения единиц.

В систему СИ были введены две дополнительные единицы — радиан и стерадиан.

- **радиан** (обозначение международное rad, русское — рад) — единица измерения плоского угла, равная внутреннему углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу;
- **стерадиан** (обозначение международное sr, русское — ср) — единица телесного угла. Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности этой сферы площадь, равной площади квадрата со стороной, равной радиусу.

Во всех системах единиц плоский φ и телесный Ω углы вводятся посредством уравнений

$$\varphi = l/R; \Omega = S/R^2,$$

где l — длина дуги, вырезаемой центральным плоским углом на окружности с радиусом R ; S — площадь, вырезаемая центральным телесным углом на шаре с радиусом R . В соответствии с этими определениями у обоих углов нет размерности в любой системе единиц:

$$\dim \varphi = \dim l / \dim R = L \cdot L^{-1} = 1; \dim \Omega = \dim S / \dim R^2 = L^2 \cdot L^{-2} = 1,$$

то есть их единицы не связаны с основными единицами. Поэтому они и были выделены в отдельную группу, но решением XX ГКМВ в 1995 г. радиан и стерадиан перестали быть дополнительными единицами СИ (этот класс ликвидировали) и включены в число безразмерных производных единиц. Дальнейшее развитие метрологии упрочит судьбу радиана и стерадиана.

Система СИ является когерентной. Если уравнение связи содержит числовой коэффициент, отличный от 1, то для образования когерентной производной единицы СИ в правую часть подставляют величины со значениями в единицах СИ, дающими после умножения на коэффициент общее числовое значение, равное 1.

Пример 1.4. Если для образования единицы энергии используют уравнение $E = 1/2 mv^2$, где E — кинетическая энергия, m — масса материальной точки, v — скорость движения точки, то когерентную единицу СИ образуют, например, следующим образом:

$$[E] = 0,5(2[m][v]^2) = 0,5(2 \text{ кг})(1 \text{ м/с})^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}$$

или

$$[E] = 0,5(1 \text{ кг})(\sqrt{2} \text{ м/с})^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}.$$

Следовательно, единицей энергии СИ является джоуль, равный ньютон-метру. В этих примерах джоуль равен кинетической энергии тела массой 2 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, или же тела массой 1 кг, движущегося со скоростью $\sqrt{2}$ м/с.

Одновременно с принятием Международной системы единиц XI ГКМВ приняла 12 десятичных кратных и дольных приставок, к которым впоследствии были добавлены новые. Приставка, объединенная с единицей, означает, что единица умножена на десять в целой степени. Новая единица называется кратной или дольной. В табл. 1.1 приведены 20 приставок, которые используются в СИ.

Таблица 1.1. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка, СИ			
	Наименование		Обозначение	
	русское	международное	русское	международное
10^{24}	йотта	yotta	И	Y
10^{21}	зетта	zetta	З	Z
10^{18}	экса	exa	Э	E
10^{15}	пета	peta	П	P
10^{12}	тера	tera	Т	T
10^9	гига	giga	Г	G
10^6	мега	mega	М	M
10^3	кило	kilo	к	k
10^2	гекто	hecto	г	h
10^1	дека	deca	да	da
10^{-1}	деци	deci	д	d
10^{-2}	санти	centi	с	c
10^{-3}	милли	milli	м	m
10^{-6}	микро	micro	мк	μ
10^{-9}	нано	nano	н	n
10^{-12}	пико	pico	п	p
10^{-15}	фемто	femto	ф	f
10^{-18}	атто	atto	а	a
10^{-21}	zepto	zepto	з	z
10^{-24}	йокто	yocto	и	y

Приставки используются для того, чтобы избежать больших или малых числовых значений, но следует обращать внимание на то, что дольные и кратные единицы не являются когерентными единицами СИ. Чтобы использовать только когерентные единицы, в процессе вычислений все величины необходимо выражать в единицах СИ, а кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат.

Из многообразия кратных и дольных единиц, которые могут быть образованы при помощи приставок, выбирают единицу, позволяющую получить числовые значения, приемлемые на практике. Кратные и дольные единицы выбира-

ют таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне 0,1–1000.

Приставки «гекто», «деци», «дека», «санти» должны использоваться, когда применение других приставок неудобно. Присоединение к наименованию единицы двух и более приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы микромикрофарад следует писать пикофарад.

В связи с тем что наименование основной единицы — килограмма — содержит приставку «кило», для образования кратных и дольных единиц массы используется дольная единица грамм и приставки необходимо присоединять к слову «грамм»: например, миллиграмм (мг), вместо микрокилограмм (мккг). Дольную единицу массы — грамм — допускается применять без присоединения приставки.

Единицы СИ охватывают практически все области науки и техники. Однако ГКМВ было признано использование некоторых внесистемных единиц наравне с единицами СИ из-за их практической важности. Некоторые единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Время	минута	min	мин	1 min = 60 s
	час	h	ч	1 h = 60 min = 3600 s
	день	d	сут	1 d = 24 h = 86 400 s
Плоский угол	градус	°	°	1° = (π/180) rad
	минута	'	'	1' = (1/60) = (π/10 800) rad
	секунда	"	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
Объем	литр	L	л	1 L = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
Масса	тонна	t	т	1 t = 10 ³ kg
Уровень	непер	Np	Нп	1 Np = 1
	бел	B	Б	1 B = (1/2)ln 10 Np

Если единица, к которой присоединяется приставка, образована как произведение или отношение единиц, приставку присоединяют к наименованию первой единицы. Например, единицу паскаль-секунда на метр (Па·с/м) с приставкой *правильно* писать так: килопаскаль-секунда на метр (кПа·с/м) — и *неправильно*: паскаль-килосекунда на метр (Па·кс/м). Для ряда единиц, получивших широкое распространение, делается исключение и приставка применяется во втором множителе, например: тонна-километр (т·км), ампер на квадратный миллиметр (А/мм²).

При образовании производных единиц СИ, как правило, полученная единица имеет наименование, состоящее из наименований соответствующих основных единиц, например: метр в секунду (м/с), метр в секунду в квадрате (м/с^2). Из практических соображений некоторым производным единицам дали специальные наименования и обозначения по именам ученых, сокращенное наименование таких единиц пишется с прописной буквы, например: один ампер — 1 А. При склонении наименований производных единиц, состоящих из произведения единиц, изменяют только последнее наименование и относящееся к нему прилагательное, например: килограмм-метра в квадрате, ньютон-секунды и т. д.

Нельзя в тексте давать обозначение единицы без указания числового значения величины. Например, будет неверным выражение: «Вычисления ведутся в %». Правильно: «Вычисления ведутся в процентах».

1.6. Другие системы единиц, используемые в практике измерений. Внесистемные единицы

Несмотря на то что Международная система единиц имеет несомненные преимущества по сравнению со всеми существовавшими до нее системами, так как она охватывает все области измерений и позволяет образовывать единицы для любых физических величин во всех областях науки и техники, тем не менее в ряде случаев удобнее на практике использовать другие системы единиц.

В некоторых разделах теоретической физики применяют системы единиц, основанные на атомных постоянных, называемые системами естественных единиц (системы Планка, Хартри, релятивистская система единиц). Подобную систему впервые предложил М. Планк. В его системе в качестве основных единиц выбраны четыре физические константы: гравитационная постоянная, скорость света, постоянная Больцмана и постоянная Планка, — которым по определению придано значение, равное единице. Система Планка не получила распространения, причем не потому, что входящие в нее единицы очень далеки от практики, а потому, что в этой системе уравнения теоретической физики не получают упрощения.

В настоящее время в теоретической физике применяют систему Хартри (система атомных единиц) и релятивистскую систему единиц. Система Хартри, как и система Планка, содержит четыре основные единицы: заряд и массу электрона, постоянную Планка, радиус первой борновской орбиты атома водорода — и применяется преимущественно в нерелятивистской квантовой механике при решении задач, связанных со структурой атомов и молекул и процессами их взаимодействия. Основное преимущество этой системы заключается в значительном упрощении ряда основных уравнений квантовой механики, например, уравнения Шредингера.

В релятивистской системе единиц скорость света, масса электрона и постоянная Планка приравнены к единице. Эта система используется преимущественно в квантовой электродинамике.

Следует упомянуть еще одну систему, построенную на физических константах и предложенную польским ученым Б. Людовичи. В его системе за основу приняты три разных поля: гравитационное, электрическое и магнитное. В соответствии с этим в качестве основных единиц выбраны следующие три константы: гравитационная постоянная, диэлектрическая проницаемость вакуума и магнитная проницаемость вакуума. В качестве четвертой основной единицы выбрана атомная константа — электрический заряд электрона.

Системы естественных единиц опираются на естественные, природные, а не условные, выбранные научной общественностью, единицы. По этой причине они неразрушимы, неизменны во времени и независимы от местоположения. Они применяются в соответствующих областях физики, однако мало пригодны для применения в макромире. Так, в системе Хартри единица длины равна $5,292 \cdot 10^{-11}$ м, а единица массы $9,109 \cdot 10^{-31}$ кг, в системе Людовичи единица длины составляет $4,88 \cdot 10^{-36}$ м, единица массы $6,60 \cdot 10^{-9}$ кг.

С метрологической точки зрения эти системы обладают еще одним недостатком, заключающимся в том, что значения некоторых физических констант известны с недостаточной точностью и их уточнение может привести к существенному изменению соотношений между размерами единиц.

В англоязычных странах традиционно применяется (и будет применяться еще долгие годы) система единиц «фут — фунт — секунда», основными единицами которой являются следующие: фут, равный 0,3048 м; фунт, равный 0,45359237 кг; секунда; ампер; градус Ренкина ($^{\circ} Ra = 5/9 K$); кандела. Определение секунды, ампера и канделы в этой системе совпадают с определениями, принятыми в Международной системе СИ.

Кроме отмеченных систем единиц физических величин, отличных от Международной системы единиц СИ, на практике (в быту и в некоторых видах измерений) применяют большое количество внесистемных единиц, как допущенных к применению системой СИ, так и не допущенных.

Значение атмосферного давления чаще всего указывают в миллиметрах ртутного столба, хотя в СИ существует единица давления паскаль, равный ньютону на квадратный метр. В нашей стране в середине 80-х гг. прошлого века делалась попытка передавать по радио атмосферное давление в гектопаскалях, и уже многие привыкли к тому, что нормальное атмосферное давление составляет 1013 гПа. Попытка вскоре была «временно отложена» из-за большого количества протестов со стороны широких кругов населения и даже специалистов. Как оказалось, в миллиметрах ртутного столба измеряют не только атмосферное давление, но и кровяное давление человека, и всем знакомые «120 на 80» очень сложно перевести в другие единицы не только больным, но и специалистам-медикам.

Такой же неудачей закончилась попытка революционной Франции конца XVIII в. ввести в обращение новый календарь и новые часы. В то время, наряду со введением новых единиц — метра и килограмма, было предложено ввести десятичную систему и при исчислении времени: год разделить на десять месяцев, неделю — на 10 дней, день — на 10 часов, час — на 100 минут и минуту — на 10 секунд. Были изготовлены новые календари и часы, показывающие новое «метрическое» время. Тем не менее традиция делить сутки на 24 часа, а час — на 60 минут, заведенная еще в Древнем Вавилоне, благодаря психологической инер-

ции людей победила. Переход к стоминутному часу означал бы для всего мира переделку всех географических, топографических, морских и звездных карт, астрономических и морских инструментов, переработку справочников, расписаний, замену всех часов и т. д.

Таким образом, не все единицы измерений, применяемых на практике, соответствуют десятичной метрической системе. Мощность двигателей автомобилей указывают в лошадиных силах, а не в киловаттах, скорость движения — в километрах в час, а не в метрах в секунду, показания счетчика электроэнергии записывают в киловатт-часах, а не в кило- или мегаджоулях.

В астрономии для выражения расстояний используют астрономическую единицу, парсек и световой год, в физике элементарных частиц энергию указывают в электрон-вольтах, в технике применяют единицу давления — атмосферу, в оптике — диоптрию как единицу оптической силы, ювелиры — карат как единицу массы, моряки — узел и милю как единицы скорости и длины и т. п. Для технических и бытовых измерений широко применяют единицы дольные или кратные от единиц системы СИ, но имеющие собственное наименование, такие как единица объема литр, единицы длины микро и ангстрем, единицы площади ар и гектар, единицы массы центнер и тонна.

Внесистемные единицы приходят в наш язык из зарубежных стран. Мы уже привыкли к тому, что количество нефти указывают в баррелях, бензина — в галлонах, драгоценных металлов — в унциях. Даже размер экрана телевизора стали указывать в английских дюймах вместо привычных когда-то сантиметров.

1.7. Классификация измерений

В литературе по метрологии встречается довольно большое количество вариантов классификации видов измерений. Приведем лишь основные из них.

По числу выполненных наблюдений или снятых показаний средств измерений все измерения делят на однократные и многократные.

Однократным называют измерение, выполненное один раз. Во многих случаях на практике выполняются именно однократные измерения, если результат измерений удовлетворяет условиям конкретной измерительной задачи.

Многократным называют измерение физической величины одного размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, то есть состоящее из ряда однократных измерений.

Многократное измерение выполняют в случае, когда случайная составляющая погрешности однократного измерения может превысить требуемое по условиям задачи значение. Выполнив ряд последовательных отдельных измерений (наблюдений или показаний), получают одно многократное измерение, погрешность которого может быть уменьшена методами математической статистики.

В зависимости от способа получения результата измерений или числового значения измеряемой величины все измерения делят на прямые, косвенные, совместные и совокупные.

Прямыми называют измерения, в которых искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных сравнением данной вели-

чины с мерой этой величины или из отсчета показаний средства измерений, градуированного в единицах этой величины.

Примерами прямых измерений могут быть измерения длины линейкой, массы — при помощи весов, электрического напряжения — вольтметром и т. д. Прямые измерения являются основой для более сложных измерений.

Косвенными называют измерения, в которых значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и другими величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

Косвенные измерения выполняют тогда, когда прямые измерения данной физической величины по каким-либо причинам затруднены или даже невозможны или когда косвенные измерения дают более точный результат по сравнению с прямыми.

В качестве примеров косвенных измерений можно привести нахождение объема тела путем прямых измерений его геометрических размеров или определение температуры в некотором объеме по изменению значения сопротивления терморезистора. Более точный результат косвенные измерения дают, например, при нахождении очень малых значений электрического сопротивления (микроомы) прямыми измерениями силы тока и падения напряжения на сопротивлении и дальнейшим расчетом его значения по известному закону Ома.

Совместными называют производимые одновременно (прямые или косвенные) измерения двух или нескольких разноименных величин для установления функциональной зависимости между ними (или нахождения значения измеряемой величины при известной зависимости между этой величиной и другими величинами, влияющими на ее размер).

Примерами совместных измерений могут быть измерения длины физического объекта в зависимости от температуры окружающего воздуха или сопротивления изоляции в зависимости от температуры и влажности среды. Во многих видах измерений следует контролировать условия применения средств измерений, влияющие на их метрологические характеристики. Так, в электрических измерениях высокой точности следует контролировать температурный режим в термостате с установленными в нем нормальными элементами или мерами сопротивления, на измерения магнитных характеристик вещества могут повлиять внешние электромагнитные поля и т. д.

Для обеспечения требуемой точности измерений физической величины в таких случаях следует одновременно с основной величиной измерять влияющие на результат измерения величины.

Совокупными называют измерения, в которых значения измеряемых величин находят решением системы уравнений, составленной по данным повторных измерений нескольких одноименных величин при различных сочетаниях этих величин.

Для определения значений искомых величин число уравнений должно быть не меньше числа величин. Так, совокупными являются измерения, при которых массы отдельных гирь набора находят по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь. Совокупными являются также измерения при передаче размера единицы электродвижущей силы (ЭДС) групповой мере ЭДС на основе насыщенных нормальных элементов по известным значениям ЭДС некоторых из них.

По характеру зависимости измеряемой величины от времени все измерения разделяют на статические и динамические.

Статическими называют измерения, при которых измеряемая физическая величина принимается за неизменную, по крайней мере на время, необходимое для измерений.

Статическими являются измерения размеров объекта, его массы, измерения режимов и параметров электрической цепи в установившемся режиме. Статическими считают все измерения, при которых скорость изменения величины не вносит в результат измерения дополнительную составляющую погрешность, обусловленную инерционными свойствами средства измерений.

Динамическими называют измерения, при которых измеряемая величина изменяется со скоростью, превышающей возможности средства измерений отслеживать изменение входной измеряемой величины.

В этом случае возникает дополнительная динамическая составляющая погрешности, обусловленная инерционными свойствами измерительного прибора. Примерами динамических измерений являются измерения мгновенных значений быстро протекающих процессов: пульсаций, вибраций, импульсов, переходных процессов в электрических цепях.

Следует отметить, что измерение одной и той же величины различными средствами измерений, имеющими различные инерционные свойства, может оказаться как динамическим, так и статическим.

По уровню точности все измерения делят на измерения максимально возможной точности, контрольные и технические.

Измерения максимально возможной точности, достижимой при существующем уровне науки и техники, выполняют прежде всего в метрологических центрах при создании и эксплуатации исходных эталонов, определяющих точность всех нижестоящих эталонов и рабочих средств измерений. Такие измерения необходимы также при некоторых физических экспериментах, например при определении значений физических констант, многих стандартных справочных данных и т. д.

Контрольные (контрольно-поверочные, метрологические) измерения, погрешность которых не должна превышать некоторое заранее заданное контрольное значение, выполняют, например, при поверке или калибровке средств измерений. В этом случае погрешность эталона должна быть в определенное число раз меньше погрешности поверяемого или калибруемого средства измерений. Соотношения погрешностей поверяемого прибора и эталона устанавливаются в поверочных схемах и методиках поверки.

Технические (рабочие) измерения выполняют в промышленности и в технике — везде, где погрешность измерений определяется применяемыми средствами измерений. Такие средства измерений называют *рабочими*, и значения их метрологических характеристик достаточны для решения поставленной перед ними задачи.

По особенностям обработки результатов все измерения делят на равноточные и неравноточные.

Равноточными измерениями называют ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях и с одинаковой тщательностью.

Неравноточными измерениями называют ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и/или в разных условиях.

Прежде чем обрабатывать ряд измерений, сначала следует убедиться в том, что все измерения из данного ряда являются равноточными. Если установлено, что ряд измерений является неравноточным, обрабатывать такой ряд следует с учетом веса отдельных измерений, входящих в ряд.

Следует также рассмотреть принцип и метод измерений.

Принцип измерений — физическое явление или совокупность физических явлений, положенные в основу измерения.

Метод измерений — совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с выбранным принципом измерений.

Метод измерений обычно обусловлен устройством средства измерений. Так, измерение массы тела с использованием силы тяжести путем взвешивания — это принцип измерения, а взвешивание тела с помощью пружинных или рычажных весов — это методы измерения.

Какой из этих двух методов измерений может быть применен на Луне, если учесть различие в значениях силы тяжести и то, что весы градуированы в земных условиях? Очевидно, что в тех условиях могут быть использованы только рычажные весы, ведь жесткость пружины в пружинных весах не изменилась и в условиях другого значения силы тяжести пружинные весы будут давать другие показания. И еще один вопрос: какой метод измерений может быть использован в безвоздушном пространстве в условиях невесомости? Нетрудно догадаться, что в невесомости отсутствует сила тяжести и там невозможно применить не только оба метода, но и сам принцип измерений. В таких условиях следует найти другой принцип измерений.

1.8. Физические константы и стандартные справочные данные

Большое значение для метрологии имеют физические константы и стандартные справочные данные. Их изучением и все более точным определением занимается большой раздел метрологии — квантовая, или фундаментальная, метрология. Опубликовано множество статей, сборников и монографий, посвященных технике экспериментов, методам измерений и полученным результатам, имеющих одну цель — повысить точность и улучшить наше знание физических констант. Это, в свою очередь, позволяет лучше понимать физические законы и полнее их использовать в физике, технике и метрологии.

Многие современные исходные средства измерений (исходные эталоны) созданы с использованием квантовых явлений. В этом смысле метрология приближается к решению задачи установления системы естественных единиц измерения, имеющихся в природе. Такая задача была выдвинута еще во времена Великой французской революции, когда была сделана первая попытка ввести естественные неразрушимые эталоны: метра — как единицы длины, равной $1/10\,000\,000$ части четверти земного меридиана, проходящего через Париж, и ки-

лограмма — как единицы массы, равной массе 1 дм³ чистой воды при температуре ее наибольшей плотности (около 4 °С).

В настоящее время эталоны метра, секунды, канделы, воспроизводящие соответствующие единицы в ведущих метрологических центрах мира, функционируют благодаря стабильным квантовым эффектам в атомах вещества и используют такие понятия, как скорость света, постоянная Планка в формуле для энергий фотона $E = h\nu$, значения дискретных уровней поглощения и излучения возбужденных состояний атомов различных веществ. Эталон Волта, работающий на основе квантового эффекта Джозефсона, использует константу Джозефсона $K_J = \frac{2e}{h}$, где e — заряд электрона. Эталон Ома на основе квантового эффекта

Холла, открытого в 1980 г., использует константу, названную в честь открывателя эффекта, — константу Клитцинга $K_K = \frac{h}{e^2}$ и т. д. Сейчас метрологию без физических констант уже невозможно себе представить.

Все физические константы подразделяют на *фундаментальные физические константы* и *универсальные постоянные*. Фундаментальные константы — это константы, реально существующие в природе и имеющие вполне определенный физический смысл. К ним относятся: скорость света в вакууме, постоянная Авогадро, заряд электрона, масса протона, радиус Бора и т. д.

Другая разновидность физических констант — универсальные постоянные, которые появляются из-за произвольного выбора основных единиц в системе единиц и определяющих уравнений связи между основными и производными единицами. К таким единицам относятся диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная) ϵ_0 , магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная) μ_0 , гравитационная постоянная γ и т. д. Эти константы, широко применяемые на практике и имеющие размерность, физического смысла (по сравнению с фундаментальными константами) не имеют и в другой системе единиц могут вообще отсутствовать.

Так, например, в системе СГС отсутствуют постоянные ϵ_0 и μ_0 . В этой системе единиц в них нет необходимости. Единицы электрических и магнитных величин в системе СГС образуются через механические основные единицы (сантиметр, грамм, секунда) и законы Кулона и Ампера.

Закон Кулона для вакуума в общем виде записывается как

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

или сила взаимодействия F двух точечных электрических зарядов q_1 и q_2 прямо пропорциональна их произведению и обратно пропорциональна квадрату расстояния r^2 между ними. Коэффициент пропорциональности k зависит от выбора системы единиц, в данном случае от того, как связаны между собой электрические величины q_1 и q_2 и механические r^2 и F .

В системе единиц СГС коэффициент k принят равным единице, $k = 1$, и закон Кулона для вакуума имеет лаконичный вид

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Это выражение является уравнением связи электрического заряда с механическими величинами. Считая, что $q_1 = q_2$, получим:

$$q = \sqrt{Fr^2}.$$

Сила электрического тока I в системе СГС определяется через заряд:

$$I = \frac{q}{t}.$$

В системе единиц СИ, в отличие от системы СГС, введена основная единица для электрических и магнитных величин — ампер. Размер единицы выбран произвольно и независимо от размеров единиц основных механических величин. При этом изменился вид записи закона Кулона для вакуума:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

и появились новые физические константы — электрическая постоянная ϵ_0 и магнитная постоянная μ_0 .

Гравитационная постоянная γ появилась из-за необходимости согласовать между собой два физических закона, характеризующих инерционные и гравитационные свойства физических объектов, — второй закон Ньютона и закон всемирного тяготения:

$$F = k_1 ma \text{ и } F = k_2 \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности в общем виде записи законов Ньютона и всемирного тяготения. В системе единиц СИ уравнением связи, или определяющим уравнением для единицы силы F — ньютона, выбран второй закон Ньютона, в котором для получения когерентной производной единицы силы коэффициент пропорциональности k_1 принят равным единице, $k_1 = 1$. Тогда оба закона принимают привычный для нас вид

$$F = ma \text{ и } F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

От точности определения физических констант зависит погрешность эталонов единиц величин, использующих для расчета эти константы, поэтому фундаментальной и квантовой метрологии придается такое большое значение. Большинство физических констант имеют погрешность определения в пределах $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-8}$. Гравитационная постоянная, используемая для расчетов траектории движения космических тел, известна с погрешностью $\sim 1 \cdot 10^{-4}$. Некоторые константы, например постоянная Ридберга, определены точнее, чем $1 \cdot 10^{-8}$.

Такое состояние области измерения физических констант сдерживает развитие эталонной базы единиц физических величин. Чтобы как-то улучшить ситуацию, специально для метрологии в практику введено международное согласование констант, которое достигается путем самого серьезного анализа международного опыта в определении конкретной физической константы и приписывания константе рекомендованного числового значения для использования в расчетах при воспроизведении единицы какой-либо физической величины. Согласованию

подлежат не все константы, а только те, которые используются в эталонах. Такое согласование не вносит разногласий в значение воспроизводимой единицы из-за разных значений константы, применяемых в разных странах. Другими словами, таким образом устраняется разница в значении единицы измерения, воспроизводимой в метрологических центрах мира, из-за несогласованности коэффициентов в расчетных формулах. А для обеспечения единства измерений на международном уровне это является самым важным.

Примером такого согласования является значение скорости света c , которое применяется в эталоне метра и на котором основано определение единицы длины — метра, данное в 1983 г.: *метр равен расстоянию, проходимому светом в вакууме за 1/299 792 458 секунды*. Теперь в любом справочнике по метрологии значение скорости света записано следующим образом: «Скорость света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с (точно)». Под словом «точно» здесь следует понимать, что размеру скорости света приписано такое числовое значение и через это числовое значение определяется единица длины системы СИ — метр. Точность этого числового значения определяется только техническими возможностями воспроизведения единицы длины — метра. В настоящее время неопределенность воспроизведения метра на основе согласованного значения скорости света уменьшена до $1 \cdot 10^{-10}$.

Согласованными являются значения некоторых других констант, например константы Джозефсона $K_J = \frac{2e}{h} = 483\,597,9$ ГГц/В (1988 г.), используемой для воспроизведения единицы электрического напряжения — вольта.

Разновидностью физических констант, используемых в метрологии, являются *стандартные справочные данные* (ССД), которые все-таки выделяют в отдельную категорию по нескольким причинам. Во-первых, ССД имеют частный характер и не относятся ко всей материи в целом; во-вторых, стабильность значений ССД, как правило, существенно ниже, чем у фундаментальных физических констант и универсальных постоянных; в-третьих, на значение ССД могут оказывать влияние условия при их воспроизведении.

Стандартные справочные данные — это характеристики каких-либо объектов, предметов, материалов и веществ при различных внешних условиях. Такие объекты могут быть созданы искусственно или иметь природное происхождение. В разных разделах метрологии могут быть использованы различные группы ССД.

В механике к ССД относятся механические характеристики различных веществ: плотность чистых веществ при различных температурах, упругость паров жидкостей, твердость минералов и сплавов.

В электрических измерениях к ССД относятся изоляционные характеристики материалов, ЭДС гальванических элементов, термоЭДС на границе раздела между двумя проводниками из разных материалов, пробивные напряжения шарового разрядника в зависимости от диаметра шаров и расстояниях между ними и т. д.

В магнитных измерениях ССД — это магнитные свойства сплавов.

В пирометрии в качестве ССД используют коэффициенты поглощения и излучения веществ и материалов, характеристики абсолютно черного и абсолютно серого тела, спектры излучения нагретых тел.

В оптических измерениях — это спектральные линии атомов и молекул, энергии перехода атомов в возбужденное состояние, ширина спектральных линий при воздействии различных факторов и т. д.

В физико-химических измерениях используются ССД о связях «состав — свойство» различных веществ и материалов, свойства стандартных образцов, применяемых для аналитических измерений.

К ССД относятся психрометрические таблицы, содержащие показания сухого и влажного термометров, для измерения относительной влажности воздуха.

1.9. Элементы теории подобия и моделирования

Задачей метрологии является получение количественной информации об окружающем нас мире. Большинство реальных объектов познания обладает таким многообразием свойств, что получить достаточно точную измерительную информацию о каждом из них невозможно. Как правило, это и не нужно. Чаще всего измеряют размеры наиболее существенных на данный момент свойств объектов. Познание же проявлений этих свойств позволяет уточнить наше представление об объекте исследований и улучшить понимание окружающего мира в целом.

Чтобы измерить какую-либо физическую величину, предварительно необходимо ее обнаружить и идентифицировать, затем сформировать в сознании модель объекта исследований с учетом интересующего нас свойства и после этого приступить к решению измерительной задачи. Измерительная информация может быть использована для уточнения модели реального объекта с целью продолжения физических исследований. Схематично процесс исследований физического объекта или явления представлен на рис. 1.2.

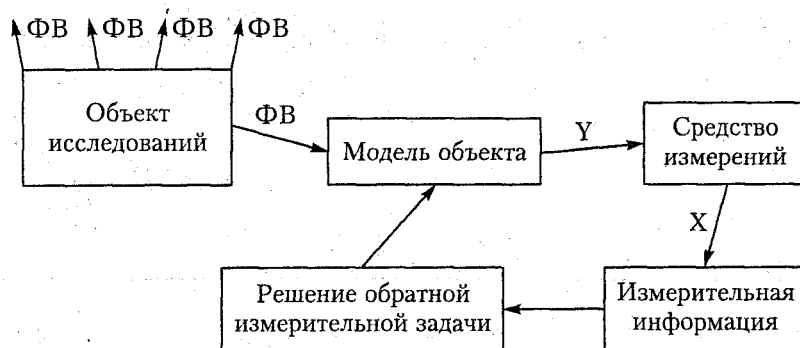


Рис. 1.2. Схема процесса исследований физического объекта или явления:
ФВ — физическая величина; X — результат измерения; Y — исследуемое свойство

В качестве примера можно рассмотреть процесс исследований металлического вала, а конкретно — его геометрических размеров. В первом приближении за модель вала может быть принят цилиндр диаметром d и длиной l , но результаты измерений показывают, что на требуемом уровне точности следует рассматри-

вать этот вал как стержень с овальным поперечным сечением и изгибом по длине с радиусом кривизны r , что и будет учтено в более точной модели вала.

Чем больше свойств реального объекта учитывается в созданной модели, тем точнее модель отражает реальный объект и тем точнее количественная информация об исследуемых свойствах. Так, если в приведенном примере учесть свойство температурного изменения геометрических размеров металла, то модель будет точнее отражать реальный объект исследований. Задачей исследователя является определение того круга свойств объекта, которые необходимы и достаточны для того, чтобы характеризовать объект на требуемом уровне точности. Эти свойства на практике и должны быть измерены.

В более сложных, чем в приведенном примере, случаях, когда реальный объект или физическое явление не могут быть исследованы непосредственно или это исследование связано с большими трудностями и затратами, прибегают к исследованиям на специально изготовленных моделях, подобных реальным объектам или явлениям, но более доступных для измерения.

Методами установления подобия объектов или явлений, а также изучением свойств подобных явлений занимается *теория подобия*.

Понятие подобия известно с древнейших времен, и всем знакомы уменьшенные копии памятников архитектуры, скульптуры или образцов машин и других технических изделий. Все это — модели реальных объектов, выполненные по правилам геометрического подобия.

Подобие имеет место тогда, когда установлено однозначное соответствие параметров модели и оригинала, связанных между собой вполне определенными соотношениями, называемыми *коэффициентами подобия*, или *масштабами*. В простейшем случае — это пропорциональность сходственных параметров. Комбинации коэффициентов подобия модели и оригинала называют *критериями подобия*. В общем случае критериями подобия можно характеризовать любое конкретное явление, и часто установить функциональную зависимость между критериями подобия бывает легче, чем между физическими величинами.

Геометрическое подобие поясним на примере двух треугольников (рис. 1.3).

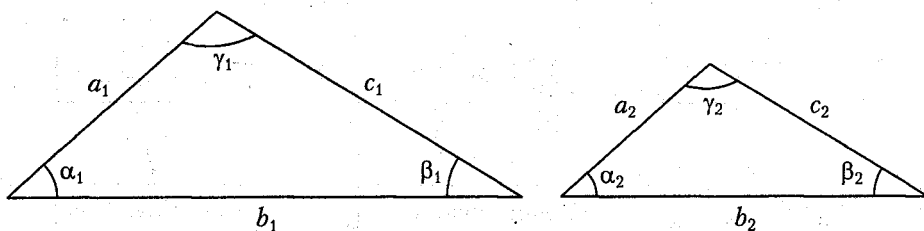


Рис. 1.3. Подобные треугольники

Треугольники подобны друг другу, если

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{c_1}{c_2} = m_1 \quad \text{и} \quad \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = 1 = m_\alpha.$$

В данном случае m_1 и m_α — коэффициенты подобия (или масштабы). Такие же критерии могут быть получены для более сложных пространственных систем.

Физическое подобие наблюдается при физически одинаковых процессах, происходящих в подобных (в смысле подобия) системах. Подобные величины имеют одинаковую физическую природу.

Физические процессы могут считаться подобными, если в подобные моменты времени в подобных (сходных) точках пространства значения переменных величин одной системы пропорциональны соответствующим переменным величинам другой системы.

Так, режимы высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП) (рис. 1.4, кривая 1) можно считать подобными режимам низковольтной электрической цепи (рис. 1.4, кривая 2), собранной в лаборатории, если справедливы соотношения

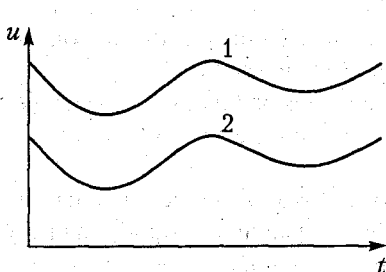


Рис. 1.4. Режимы подобных ЛЭП и электрической цепи

$$\frac{u_1}{u_2} = m_u; \quad \frac{i_1}{i_2} = m_i.$$

Аналогичные соотношения существуют и между параметрами этих систем:

$$\frac{R_1}{R_2} = m_R; \quad \frac{L_1}{L_2} = m_L; \quad \frac{C_1}{C_2} = m_C.$$

Комбинации, составленные из произведений подобных параметров и переменных величин, также имеют свои коэффициенты подобия

$$\frac{u_1 i_1}{u_2 i_2} = m_u m_i = m_p; \quad \frac{i_1 R_1^2}{i_2 R_2^2} = m_w; \quad \frac{L_1 C_1}{L_2 C_2} = m_{LC} \text{ и т. д.}$$

Математическое подобие наблюдается в процессах физически различных, но протекающих так, что между величинами существуют коэффициенты подобия. Подобные величины имеют различную физическую природу.

Так, можно установить математическую связь между распределением температуры в силовом электрическом кабеле и распределением падений напряжений на элементах электрической схемы (рис. 1.5).

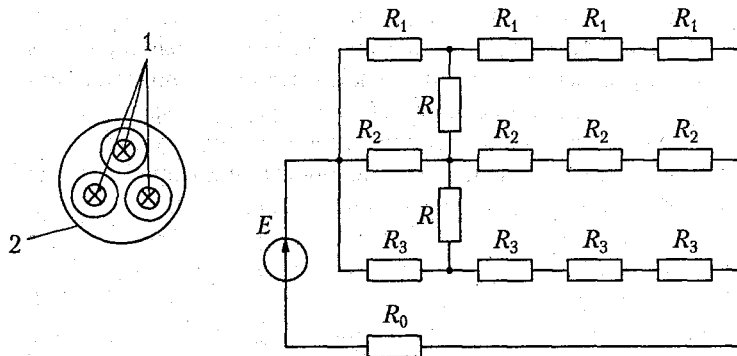


Рис. 1.5. Электрический кабель и электрическая схема: 1 — жилы кабеля, 2 — оплетка кабеля, E — источник ЭДС, R_n — активные сопротивления ($n = 0, 1, 2, 3$)

На теории подобия строится теория моделирования. Если физическое явление происходит в каком-либо месте или физическое свойство присуще сооружению-оригиналу, где непосредственный эксперимент затруднителен или даже невозможен, то имеет смысл проводить его или на уменьшенном объекте, копирующем оригинал, или на установке, воспроизводящей физически иное явление, но описываемое такими же уравнениями, что и явление в оригинале. Возможен также вариант, когда реальная материальная модель изучаемого объекта вообще не создается. Это может быть только мысленная модель, воспроизводящая объект исследований с помощью логических построений и математических выкладок.

В соответствии с этим различают физическое, аналоговое и математическое моделирование.

При *физическом моделировании* исследуемое явление (или объект) и модель имеют одинаковую природу и различаются только количественно.

Моделирование аналогиями использует свойство изоморфизма математических уравнений, подразумевающее, что одна и та же система уравнений может описывать различные физические явления.

Математическое моделирование имеет целью только решение уравнений, описывающих исследуемый процесс. В этом смысле уравнение, описывающее какой-либо физический закон, является математической моделью этого закона. Математическое моделирование возможно только при наличии уравнений, составленных по определенным правилам и преобразованных к удобному для решения виду. Если уравнение какого-либо элемента системы неизвестно, то такое преобразование невозможно.

Практическое применение теории подобия и моделирования требует оценки точности этих методов и приемов обработки экспериментальных данных. Изучение любого физического явления связано с экспериментальными и аналитическими работами, взаимно дополняющими друг друга на разных этапах исследования. Сложные реальные системы, как правило, обла дают такими глубокими внутренними связями, которые не позволяют расчленять систему на составляющие и применять метод наложения. Поэтому при изучении явлений, протекающих в таких системах, применяют модельный эксперимент. Например, созданию новой энергосистемы или расширению уже действующей предшествует физическое моделирование на электродинамической модели, представляющей собой уменьшенную копию проектируемой. Уменьшенные в размерах электрогенераторы, линии электропередачи, выключатели, устройства защиты и т. д. позволяют исследовать процессы, которые в натуральном масштабе обычно определить невозможно. Построение материальной системы в уменьшенном масштабе, подобной оригиналу и относительно недорогой, в которой интересующие нас явления будут протекать подобно явлениям в системе-оригинале, является задачей физического моделирования. В то же время физические процессы, происходящие, например, в разветвленной системе водопровода, могут быть исследованы на электрической или аналоговой модели.

Физическое и аналоговое моделирование не исключает аналитическое исследование, а, наоборот, дает материал для более точного математического моделирования, подобно тому как математический анализ, в свою очередь, позволяет уточнить эксперимент.

Следует отметить, что абсолютно точная модель, так же как и абсолютное подобие, невозможна. Каждая модель чем-то отличается от оригинала, и в соответствии с поставленной задачей на требуемом уровне точности следует создать модель, наилучшим образом отвечающую поставленным требованиям и возможностям исследователя.

1.10. Постулаты теории измерений

Любое измерение предполагает сравнение неизвестного размера с известным, принятым за единицу измерения, и выражение первого через второй в виде некоторого числа, называемого числовым значением физической величины.

Числовое значение как результат сравнения первого размера со вторым может быть записано в виде $q = Q/[Q]$, где Q — истинное значение величины, $[Q]$ — единица измерения, причем числовое значение q идеальным образом отражает истинное значение величины Q . В результате реального измерения полученное числовое значение x будет зависеть от многих факторов, влияющих на проведение эксперимента.

Главной особенностью измерительной процедуры является то, что при ее повторении на все более высоком научном и техническом уровне результат измерения не совпадает абсолютно точно с ранее полученными данными. Это дает основание для предположения о том, что полностью исключить воздействие всех влияющих факторов нельзя. Можно лишь уменьшить их вес в полученном результате. На основании громадного опыта практических измерений может быть сформировано следующее утверждение, называемое *основным постулатом метрологии*: результат измерения является случайным числом. На этом постулате, который легко поддается проверке и остается справедливым в любых областях и видах измерений, основана вся метрология.

Другими словами, основной постулат можно выразить следующим образом. В результате измерительного эксперимента всегда остается некоторая неопределенность (или погрешность), которая не позволяет утверждать, что полученное числовое значение абсолютно точно описывает размер физической величины.

В развернутом виде основной постулат записывается последовательным рядом положений, характеризующих современные представления метрологии о данном вопросе.

Первый постулат: в рамках принятой модели объекта исследований существуют определенная измеряемая физическая величина и ее истинное значение. Действительно, измерительный эксперимент лишь тогда имеет смысл, когда физическая величина обнаружена и идентифицирована в объекте и получает свое отражение в модели. Если, например, считать, что объект представляет собой цилиндр (модель — цилиндр), значит, эта модель имеет диаметр, который может быть измерен. Если же в результате предшествующих исследований (априорная информация) установлено, что объект имеет форму, отличную от цилиндрической, то в рамках новой модели, отражающей более высокий уровень точности, измерять диаметр бессмысленно, поскольку измеренное значение не несет новой полезной информации об объекте. В рамках новой модели диаметр не существу-

ет и следует искать другие величины, адекватно характеризующие модель объекта исследования.

Итак, измеряемому свойству объекта исследований должна соответствовать некоторая величина в его модели. Данная модель в течение времени, необходимого для измерения, должна позволять считать эту величину неизменной, иначе измерения не могут быть проведены. Указанный факт описывается **вторым постулатом**: истинное значение измеряемой величины постоянно (в рамках принятой модели и, по крайней мере, на момент измерения). Для переменной величины следует выделить некоторый постоянный параметр и измерить его. Примером таких постоянных параметров переменных во времени величин могут служить амплитудные, действующие или средние значения электрического тока и напряжения.

При построении модели объекта исследований неизбежно приходится вводить некоторые упрощения (или идеализировать некоторые его свойства). Модель никогда не может полностью описывать все свойства объекта или идеальным образом соответствовать реальному объекту. Это означало бы, что об объекте исследований до начала эксперимента уже известно все и в измерениях нет необходимости. Модель строится до измерения на основе имеющейся априорной информации об объекте и с учетом цели исследований. На основании результатов измерений уточняется имеющаяся информация об объекте, и она, в свою очередь, используется как априорная для создания новой модели, точнее отражающей реальный физический объект. Повышение точности измерений позволит получить еще более точную информацию об объекте, и тем не менее добиться абсолютного сходства объекта и его модели не удастся. Это неизбежное несоответствие модели объекта называют *пороговым несоответствием*, которое отмечено в **третьем постулате**: существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта. Истинное значение физической величины отыскать невозможно.

Пороговое несоответствие, в конечном счете, определяется априорной информацией об объекте исследований и достигаемой точностью имеющихся средств и методов измерений. Полностью исключить пороговое несоответствие нельзя. Обычно это и не нужно — важно в результате каждого измерения правильно оценить границы возможной погрешности.

ГЛАВА 2 Погрешности измерений

2.1. Классификация погрешностей

К настоящему времени наибольшее развитие получила теория измерений, основанная на понятии *погрешность* и являющаяся основой для подавляющего количества действующих в России нормативных документов в области метрологии.

Любое измерение есть процесс сравнения. Процедура нахождения отношения размера физической величины к размеру той же величины, принятому за единицу, может быть записана в математической форме

$$\frac{Q}{[Q]} = x, \quad (2.1)$$

где Q — размер измеряемой физической величины; $[Q]$ — размер физической величины, принятый за единицу. Уравнение (2.1) называют уравнением измерения.

Теоретически отношение двух размеров, согласно (2.1), должно быть вполне определенным неслучайным числом q , как это следует из (1.1). На практике сравнение этих размеров между собой происходит в условиях влияния множества случайных и неслучайных обстоятельств, точно учесть которые невозможно. Поэтому при измерении одной и той же величины постоянного размера результат сравнения x получается все время разным. Значение физической величины, полученное в результате сравнения, является оценкой физической величины в принятых для измерения данной величины единицах. Истинное значение измеряемой величины существует, но определить его невозможно. Однако это понятие введено в теорию измерений, при этом различают истинное и действительное значения измеряемой физической величины и результат измерения. Далее будут приводиться термины и определения, установленные в РМГ 29–99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения».

Истинное значение физической величины — это значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в количественном и качественном отношении соответствующую физическую величину.

Действительное значение физической величины — значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному

значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Результат измерения — значение величины, полученное путем ее измерения. Результат измерения представляет собой приближенную оценку истинного значения величины.

Качество средств и результатов измерений характеризуют, указывая их погрешности. *Погрешность результата измерения* — это разница между результатом измерения X и истинным (действительным) значением Q измеряемой величины:

$$\Delta = X - Q. \quad (2.2)$$

Погрешность указывает границы неопределенности значения измеряемой величины. Истинное значение применяют при решении теоретических задач метрологии. На практике пользуются действительным значением величины. За действительное значение при однократных измерениях часто принимают значение, полученное с помощью более точного, эталонного средства измерений, при многократных измерениях — среднее арифметическое ряда отдельных измерений (показаний), входящих в данный ряд. В зависимости от решаемой задачи могут использоваться и другие значения.

Погрешность средства измерений — разность между показанием средства измерений (значением величины, полученным при помощи этого средства) и истинным (действительным) значением. Поскольку истинное значение величины неизвестно, на практике вместо него пользуются значением величины (действительным), полученным при помощи более точного средства измерений.

По способу выражения различают абсолютную, относительную и приведенную погрешность. *Абсолютная погрешность* — это погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины и определяемая согласно выражения (2.2). Абсолютная погрешность сама по себе не может служить показателем точности измерений, так как одно и то же ее значение, например $\Delta = 0,05$ мм, при $X = 100$ мм соответствует довольно высокой точности измерений, а при $X = 1$ мм — низкой. Поэтому вводится понятие относительной погрешности.

Относительная погрешность — это погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности к действительному значению. Во многих случаях она является более наглядной характеристикой оценки качества результата измерения. Относительную погрешность δ находят из выражения

$$\delta = \frac{\Delta}{Q} = \frac{(X - Q)}{Q} \quad (2.3)$$

и выражают в относительных единицах или в процентах (в последнем случае в формуле (2.3) к правой части добавляется множитель 100 %).

Приведенная погрешность — это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерений отнесена к условно принятому значению Q_N , постоянному на всем диапазоне измерений или его части:

$$\gamma = \frac{\Delta}{Q_N} = \frac{(X - Q)}{Q_N} \quad (2.4)$$

Условно принятое значение величины Q_N называют нормирующим значением. За нормирующее значение часто принимают верхний предел измерений. Указание погрешности измерений в виде относительной приведенной погрешности говорит о том, что абсолютная погрешность измерений Δ постоянна на всем диапазоне (поддиапазоне) измерений.

Из определения погрешности не следует, что она состоит из каких-либо составляющих. Деление погрешности на составляющие введено для удобства обработки результатов измерений.

Погрешность (как и результат сравнения в (2.1)) не является постоянной величиной. Установлено, что одна ее часть проявляется как постоянная величина, а другая изменяется непредсказуемо. Эти части назвали систематической и случайной погрешностями.

По характеру проявления следует также выделить грубые погрешности (промахи). В упрощенном виде классификация погрешностей по характеру их проявления приведена на рис. 2.1.

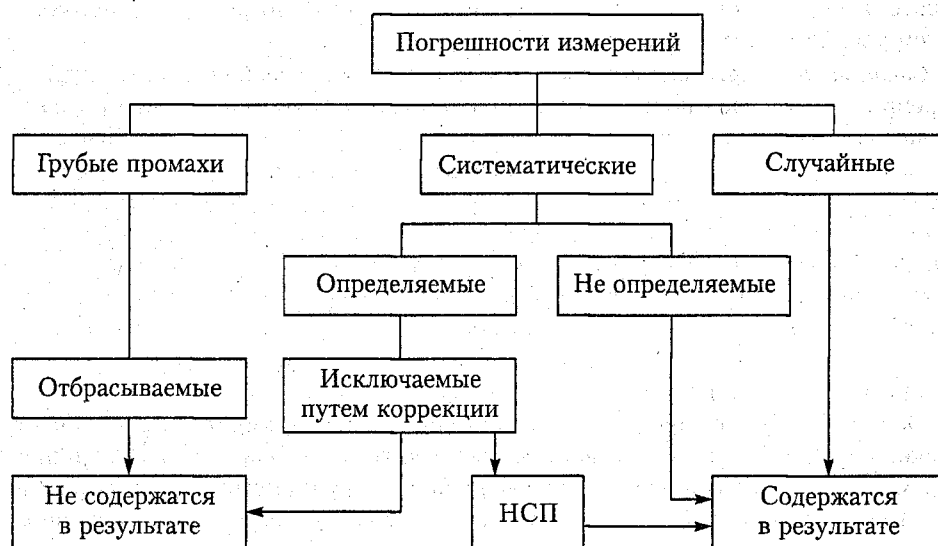


Рис. 2.1. Классификация погрешностей измерений по характеру их проявления

Грубые погрешности (промахи) — это такие погрешности, которые при исправных средствах измерений и корректных действиях экспериментатора (оператора) не должны появляться. Проявляются они в том, что результаты отдельных измерений резко отличаются от остальных. При однократном измерении промах может быть обнаружен только путем логического анализа или сопоставления результата с априорным представлением о нем. Если причина промаха установлена, то результат однократного измерения следует признать ошибочным и повторить измерение. При многократном измерении одной и той же величины постоянного размера промахи проявляются в том, что результаты отдельных измерений, входящих в один ряд, резко отличаются от остальных результатов этого ряда.

Промахи возникают из-за ошибок или неправильных действий оператора, вследствие резких кратковременных изменений условий проведения измерений (сбой в работе аппаратуры, скачки напряжения в сети, вибрация и т. п.), других аналогичных причин.

Если промахи обнаруживаются в процессе измерений, то результаты, их содержащие, отбрасывают. Чаще всего промахи выявляют при окончательной обработке результатов измерений с помощью специальных критериев, которые будут рассмотрены далее.

Случайная погрешность — составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений физической величины постоянного размера, проведенных с одинаковой тщательностью в одинаковых условиях. В появлении таких погрешностей не наблюдается какой-либо закономерности, они проявляются при повторных наблюдениях в виде некоторого разброса полученных результатов. Случайные погрешности неустранимы и всегда присутствуют в результате измерения. Описание случайных погрешностей возможно на основе теории случайных процессов и математической статистики. Уменьшение случайных погрешностей возможно путем увеличения числа наблюдений.

Систематическая погрешность — составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной для данного ряда измерений или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях физической величины постоянного размера. Систематические погрешности могут быть предсказаны, обнаружены и исключены (уменьшены) из результата измерений введением поправок. Поправки всегда определяют и вычисляются с некоторой погрешностью, часть систематических погрешностей так или иначе оказывается необнаруженной, поэтому существует понятие *неисключенная систематическая погрешность* (НСП). Иногда этот вид погрешности называют *неисключенными остатками систематической погрешности*, остающимися после введения поправок и содержащимися в результате измерений.

Особую опасность представляют постоянные систематические погрешности, поскольку их присутствие бывает чрезвычайно трудно обнаружить. В отличие от переменных, прогрессирующих или являющихся функциями определенных параметров погрешностей, постоянные систематические погрешности внешне никак не проявляются и могут долгое время оставаться незамеченными. Систематические погрешности, закономерно изменяющиеся при повторных измерениях физической величины постоянного размера, являются не изменяющимися во времени функциями вызывающих их влияющих величин (температуры, частоты, напряжения и пр.).

Особое место среди погрешностей занимают *прогрессирующие (дрейфовые) погрешности*. Их особенностью является то, что они могут быть скорректированы и учтены только в данный момент времени, а в дальнейшем вновь непредсказуемо изменяются.

Прогрессирующая погрешность является понятием, которое не может быть сведено к понятиям случайной и систематической погрешностей, однако в нормативных документах ее определяют как один из видов систематической погрешности.

2.2. Правила округления результатов измерений и значений погрешности

Значение погрешности при пользовании вычислительной техникой может быть получено с большим числом знаков. Однако погрешности измерения дают представление о том, какие цифры в числовом значении, полученном в результате измерения, являются сомнительными. Поэтому нет смысла выражать погрешность большим числом значащих цифр, и в окончательном значении рассчитанной погрешности оставляют одну-две значащие цифры. На практике для обычных измерений установилось следующее правило: если полученное число начинается с цифры, равной или большей $\sqrt{10} \approx 3$, то в нем сохраняется лишь один знак; если же оно начинается с цифр, меньших 3, то есть с цифр 1 и 2, то в нем сохраняют два знака (при ответственных и точных измерениях сохраняют, соответственно, две и три значащих цифры).

Округлять числовое значение результата измерения следует в соответствии с числовым разрядом значащей цифры погрешности, то есть числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности. В итоге можно сформулировать правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного экспериментального результата измерения:

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной — если первая цифра 3 и более.
2. Результат измерения округляется до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности.
3. Округление производится лишь в окончательном результате, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

Наряду с изложенными правилами округления используются и более сложные и обоснованные. Недостаток правила 1 состоит в том, что относительная погрешность от округления изменяется скачком при переходе, например, от числа 0,29 к числу 0,3, когда она составляет $(0,30 - 0,29)/0,30 = 3\%$, до $(0,4 - 0,3)/0,3 = 30\%$ при переходе от числа 0,3 к числу 0,4. Для устранения столь резкого скачка относительной погрешности округления существуют правила, в которых предлагается каждую декаду возможных значений округляемой погрешности делить на три части: от 0,1 до 0,2, от 0,2 до 0,5 и от 0,5 до 1,0. В каждой из этих частей используется свой шаг округления, равный 0,02, 0,05 и 0,1 соответственно. Тогда ряд разрешенных к употреблению округленных значений погрешностей получает следующий вид:

$$0,10 - 0,12 - 0,14 - 0,16 - 0,18 - 0,20 - 0,25 - 0,30 - 0,35 - \\ - 0,40 - 0,45 - 0,50 - 0,60 - 0,70 - 0,80 - 0,90 - 1,0.$$

Преимущество такого ряда состоит в том, что погрешность от округления на границах участков изменяется лишь от 5 до 10%. При этом сохраняется общее правило приведения результатов: последняя значащая цифра в любом приводимом результате должна быть того же порядка величины (находиться в той же десятичной позиции), что и погрешность. Не следует забывать о том, что абсолют-

ная погрешность имеет ту же размерность и выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Пример 2.1. Значение силы электрического тока, полученное при измерении, 2,65 А, погрешность $\pm 0,06145$ А. В результате округления результат должен быть записан в виде $I = (2,65 \pm 0,06)$ А. Если погрешность составляет $\pm 0,006145$ А, то результат представляют в виде $I = (2,650 \pm 0,006)$ А.

Более наглядно указывать пределы интервала неопределенности измеренной величины в виде $2,59 \text{ А} < I < 2,71 \text{ А}$.

2.3. Случайные погрешности и их вероятностное описание

2.3.1. Понятие случайной величины

О природе случайных погрешностей, их источниках и путях возникновения известно мало, можно лишь сказать, что существует много причин, вызывающих появление этих погрешностей. Каждая из них незаметно воздействует на результат измерения, но суммарное их воздействие может вызывать заметные погрешности. В каждый данный момент эти причины проявляют себя по-разному, без закономерной связи между собой, независимо друг от друга. Как следствие, заметные погрешности появляются без закономерной связи с предыдущими и последующими погрешностями.

Теория вероятностей разрабатывает математические методы изучения свойств случайных событий в больших совокупностях. Теория погрешностей, использующая математический аппарат теории вероятностей, основывается на аналогии между появлением случайных погрешностей при многократно повторяемых измерениях и совершением случайных событий. Недостаточное знание природы и происхождения случайных погрешностей ни в коей мере не ограничивает эффективность применения вероятностных методов.

Случайной называют такую величину, которая в результате опыта может принять то или иное значение, неизвестно заранее — какое именно. Случайные величины, принимающие только отделенные друг от друга значения, которые можно заранее перечислить, называются прерывными, или *дискретными*, случайными величинами. Такими величинами являются, например, возможное число очков при бросании кости, возможное число попаданий при ста выстрелах, возможное число горошин в одном килограмме. Величины, возможные значения которых не отделены друг от друга и непрерывно заполняют некоторый промежуток, называются *непрерывными* случайными величинами. Промежуток, который заполняют подобные величины, может иметь как резко выраженные границы, так и границы неопределенные, расплывчатые. Непрерывными случайными величинами являются длина отрезка линии, промежутки времени, интервал температуры и т. д.

Необходимо отметить, что граница между дискретными и непрерывными величинами далеко не так четко определена, как это может показаться на первый взгляд. Некоторое количество воды в стакане может рассматриваться как величина непрерывная. Но вода состоит из отдельных молекул, и количества ее могут отличаться одно от другого на целое число молекул, то есть при возможности

подсчета отдельных молекул количество воды можно было бы рассматривать как дискретную величину. Обычно при измерении принимают допущение о том, что измеряемые величины являются непрерывными. Часто это связано с недостаточной чувствительностью имеющихся средств измерения, которые не дают возможности привести измерения к счету частиц, как в примере с водой. В большинстве случаев такая точность и не требуется. Измеряемую величину можно считать непрерывной, если известно о существовании более точного метода (методики) измерения. С другой стороны, непрерывные величины иногда представляются искусственно как дискретные, то есть изменяющиеся равными ступенями, и измерения производят подсчетом этих ступеней.

2.3.2. Дискретные и непрерывные случайные величины

Для полной характеристики дискретной случайной величины необходимо и достаточно знать все возможные ее значения и вероятность появления каждого из этих значений.

Предположим, что при помощи цифрового омметра с дискретностью отсчета 1 Ом получены десять значений: 26, 24, 26, 28, 23, 24, 25, 24, 26, 25 Ом. Для лучшего восприятия информации полученные значения располагают в порядке возрастания: 23, 24, 24, 24, 25, 25, 26, 26, 26, 28 Ом.

Затем можно просто указать, что значение 24 было получено три раза и т. д. Другими словами, можно записать различные полученные значения x_i случайной величины X вместе с числом, указывающим, сколько раз получено каждое значение, как это сделано в табл. 2.1. В ней введен символ x_k ($k = 1, 2, \dots, m$), чтобы обозначить полученные значения: $x_1 = 23$; $x_2 = 24$; $x_3 = 25$ и т. д. Величины n_k ($k = 1, 2, \dots, m$) обозначают числа, показывающие, сколько раз было получено соответствующее значение.

Таблица 2.1. Значения случайной величины с учетом повторяемости

Значение x_k , Ом	23	24	25	26	27	28
Число реализаций n_k	1	3	2	3	0	1
Вероятность $p_k (F_k)$	0,1	0,3	0,2	0,3	0	0,1

На основе полученных данных может быть вычислено среднее арифметическое значение для дискретной случайной величины

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \frac{23 + 24 + 24 + 24 + 25 + \dots + 28}{10} \quad (2.5)$$

В другой форме записи оно будет выглядеть так:

$$\bar{x} = \frac{23 + 24 \cdot 3 + 25 \cdot 2 + \dots + 28}{10} = \frac{\sum_{k=1}^m x_k n_k}{N} \quad (2.6)$$

В варианте (2.5) суммировались результаты всех полученных значений. Сумма, подобная (2.6), иногда называется *взвешенной суммой*, поскольку каждое значение x_k умножается на весовой множитель n_k , показывающий, сколько раз это значение реализовывалось. При этом

$$\sum_{k=1}^m n_k = N. \quad (2.7)$$

Вместо использования n_k числа, показывающего, сколько раз было получено показание x_k , вводят относительные частоты $F_k = n_k/N$, которые при N , стремящемся к бесконечности, стремятся к вероятностям p_k появления конкретных значений дискретной случайной величины. Значения p_k и F_k приведены в третьей строке табл. 2.1.

Законом распределения (законом распределения вероятности) случайной величины называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями. Про случайную величину говорят, что она подчинена данному закону распределения.

Простейшей формой задания закона распределения является таблица, аналогичная табл. 2.1, которая часто называется рядом распределения случайной величины X .

X	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	...
P	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	...

При этом сумма вероятностей равна единице:

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1. \quad (2.8)$$

Считается, что если сумма какого-то набора чисел равна 1, то эти числа нормированы. Поэтому выражение (2.8) называется *условием нормировки*.

Ряд распределения может быть представлен в графическом виде. На графике по оси абсцисс откладывают возможные значения случайной величины, а по оси ординат — вероятности этих значений (рис. 2.2).

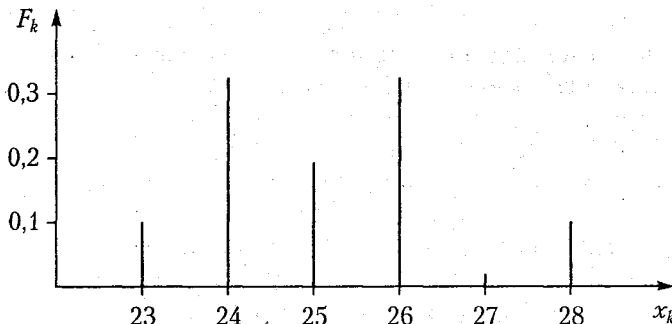


Рис. 2.2. График распределения дискретной случайной величины

Во многих случаях наряду с распределением случайной величины или вместо него информацию об этой величине могут дать числовые параметры, получившие название числовых характеристик случайной величины. Для дискретной случайной величины наиболее употребительными являются:

- **Математическое ожидание**, которое вычисляется как сумма произведений всех возможных ее значений на вероятность этих значений

$$M(X) = x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_N p_N = \sum_{i=1}^N x_i p_i. \quad (2.9)$$

На практике при ограниченном числе наблюдений пользуются оценкой математического ожидания, которой является среднее арифметическое, вычисляемое согласно (2.6). Значения x_k получаются в результате измерительного эксперимента.

- **Дисперсия**, которая является математическим ожиданием квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания

$$D(X) = M[X - M(X)]^2 = \sum_{i=1}^N [x_i - M(X)]^2 p_i. \quad (2.10)$$

Как следует из (2.10), дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины, поэтому вводят понятие *среднего квадратического отклонения* (СКО), под которым понимают квадратный корень из дисперсии. СКО имеет размерность самой случайной величины:

$$\sigma_x = \sqrt{D(X)}. \quad (2.11)$$

Дисперсия и СКО служат для оценки степени разброса случайной величины относительно ее среднего значения.

Пример 2.2. Найти математическое ожидание и дисперсию случайной величины, которая задается цифрой на грани при бросании игральной кости. Используя (2.9), получим:

$$M(X) = 1 \cdot 1/6 + 2 \cdot 1/6 + 3 \cdot 1/6 + 4 \cdot 1/6 + 5 \cdot 1/6 + 6 \cdot 1/6 = 7/2.$$

Согласно (2.10),

$$D(X) = (1 - 3,5)^2 \cdot 1/6 + (2 - 3,5)^2 \cdot 1/6 + (3 - 3,5)^2 \cdot 1/6 + \\ + (4 - 3,5)^2 \cdot 1/6 + (5 - 3,5)^2 \cdot 1/6 + (6 - 3,5)^2 \cdot 1/6 = 2,9167.$$

Непрерывная случайная величина имеет бесчисленное множество возможных значений, поэтому ее нельзя задать тем же законом распределения, что и дискретную случайную величину. Составить таблицу, в которой были бы перечислены все возможные значения непрерывной случайной величины, невозможно. Для количественной характеристики распределения вероятности в этом случае пользуются не вероятностью события $X = x$, а вероятностью события $X < x$, где x — некоторая текущая переменная. Вероятность этого события зависит от x и является некоторой функцией от x . Эта функция называется *функцией распределения вероятности* случайной величины X и обозначается $F(x)$:

$$F(x) = P(X < x). \quad (2.12)$$

Функцию распределения $F(x)$ иногда называют *интегральной функцией распределения* или *интегральным законом распределения*. Функция распределения вероятности является универсальной характеристикой и существует для всех случайных величин, как дискретных, так и непрерывных.

Некоторые общие свойства функции распределения можно сформулировать следующим образом:

1. Функция распределения $F(x)$ есть неубывающая функция своего аргумента, то есть при $x_2 > x_1$ $F(x_2) > F(x_1)$.
2. При $x = -\infty$ $F(-\infty) = 0$, то есть на минус бесконечности функция распределения равна нулю.
3. При $x = +\infty$ $F(+\infty) = 1$, то есть на плюс бесконечности функция распределения равна единице.

Для непрерывной случайной величины с непрерывной и дифференцируемой функцией распределения вероятности $F(x)$ можно найти *дифференциальный закон распределения* вероятностей, выражаемый как

$$p(x) = F'(x). \quad (2.13)$$

Эта функция иначе называется *плотностью распределения вероятности* или дифференциальной функцией распределения. Она всегда неотрицательна и подчинена условию нормирования в виде

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

что непосредственно следует из свойств интегральной функции распределения. При практическом определении дифференциального закона распределения той или иной случайной величины всегда должно проверяться их нормирование.

В измерительной практике часто используется равномерный закон, при котором возможные значения непрерывной случайной величины находятся в пределах некоторого конечного интервала, причем в пределах этого интервала все значения случайной величины обладают одной и той же плотностью вероятности (рис. 2.3).

Аналитически равномерное распределение случайной величины записывается в виде

$$\begin{cases} p(x) = \frac{1}{X_2 - X_1} & \text{при } X_1 < x < X_2, \\ p(x) = 0 & \text{при } x < X_1 \text{ и } x > X_2. \end{cases}$$

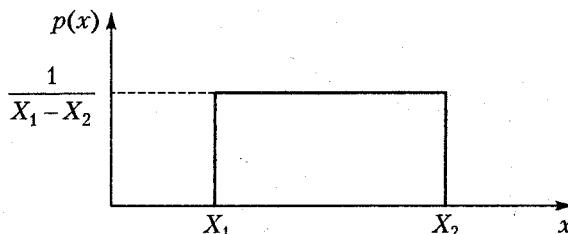


Рис. 2.3. Равномерный закон распределения плотности вероятности

Другим законом, который имеет большое значение в метрологической практике, является нормальный закон распределения случайной величины.

Результат измерений при непрерывном отсчете зависит от влияния многих возмущающих факторов (воздействий). В случае, когда независимых возмущающих факторов много, но влияние каждого из них в отдельности мало и примерно одинаково, применимы две аксиомы:

1. **Аксиома симметрии:** при очень большом числе отсчетов случайные отклонения от среднего значения, равные по величине, но различные по знаку, встречаются одинаково часто.
2. **Аксиома монотонного убывания плотности вероятностей:** чаще всего встречаются меньшие отклонения, а большие отклонения встречаются тем реже, чем они больше.

Если эти аксиомы соблюдаются, то при неограниченном увеличении числа независимых влияющих факторов закон распределения плотности вероятности можно представить как

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.14)$$

где \bar{x} — среднее значение; σ — среднее квадратическое отклонение. Такой закон носит название *нормального закона* распределения случайной величины. Общий вид дифференциальной $p(x)$ и интегральной $F(x)$ функций распределения для нормального закона приведен на рис. 2.4 и 2.5 соответственно.

Закон распределения суммы двух независимых случайных величин, каждая из которых имеет свое распределение, называется композицией. Примеры образования композиций законов распределения приведены на рис. 2.6. При суммировании двух равномерно распределенных случайных величин x_1 и x_2 образование композиции, то есть закон распределения $p(x_1 + x_2)$, можно представить как «размыв» резко ограниченных концов более широкого распределения (шириной a) на величину протяженности b менее широкого распределения (рис. 2.6, а). Поэтому композиция имеет форму трапеции с верхним основанием, равным $a - b$, и нижним основанием, равным $a + b$.

Композиция равномерного и нормального распределений (рис. 2.6, б) образуется подобным образом, но спад результирующего распределения по краям происходит по интегральной функции нормального закона. Композиция двух рав-

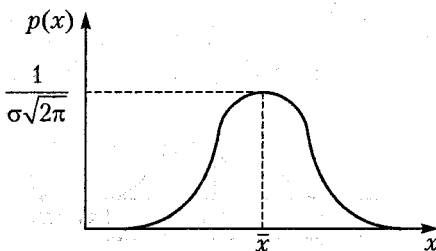


Рис. 2.4. Дифференциальная функция распределения для нормального закона

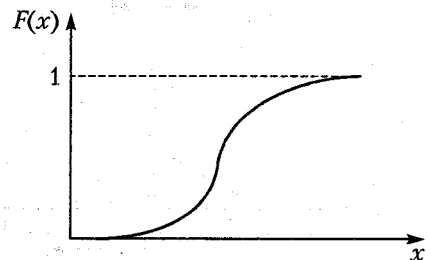


Рис. 2.5. Интегральная функция распределения для нормального закона

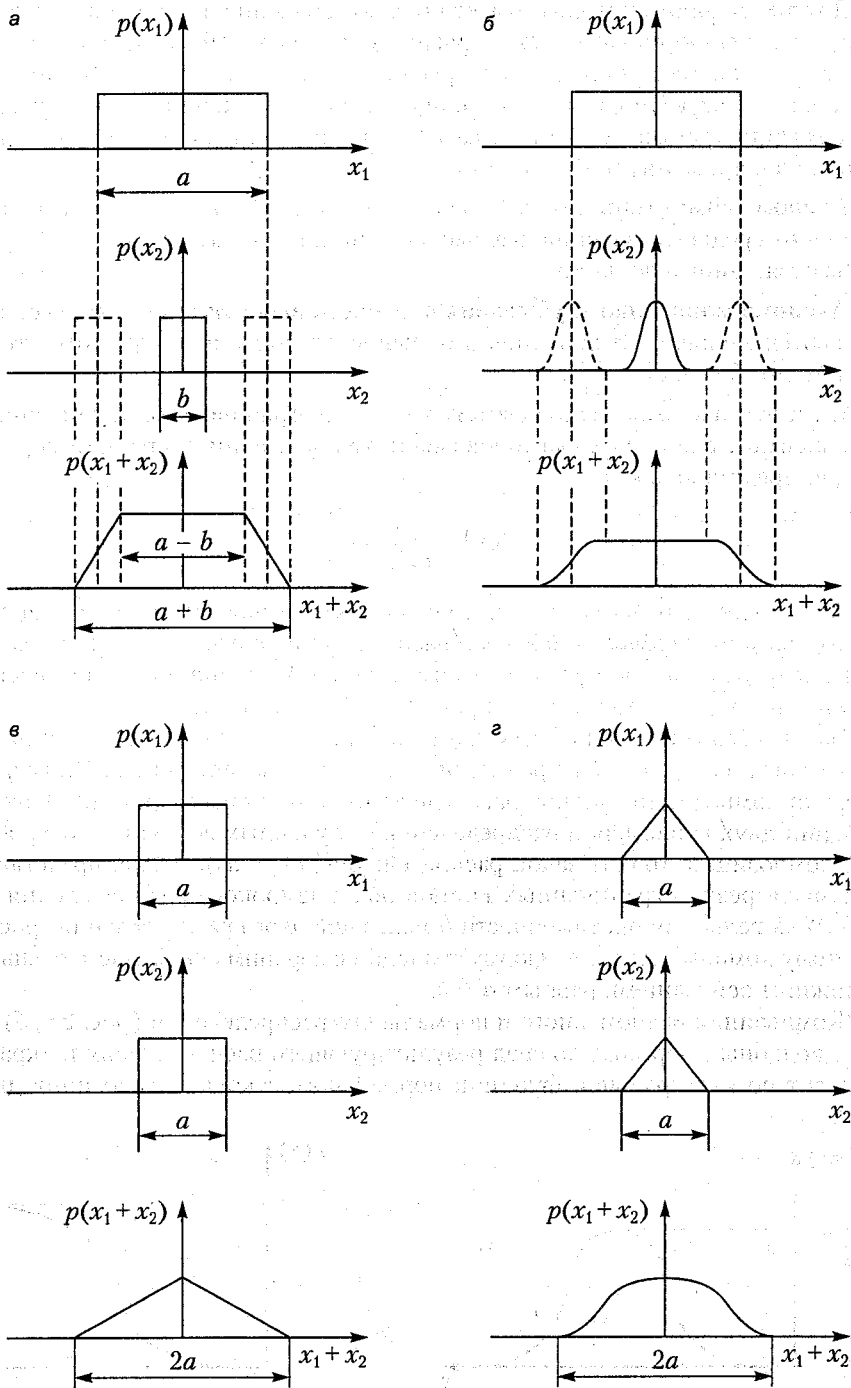


Рис. 2.6. Примеры образования композиций законов распределения

ных равномерных распределений (рис. 2.6, в) является треугольной (распределение Симпсона), так как верхнее основание трапеции обращается в нуль, а нижнее — в $2a$. Композиция двух треугольных распределений (рис. 2.6, г) описывается участками парабол и также имеет удвоенную ширину основания. Распределения, показанные на рис. 2.6, построены без соблюдения относительного масштаба кривых по вертикали. Масштаб определяется тем, что во всех случаях площадь под кривой закона распределения должна быть равна единице.

Статистическое описание случайной величины полным указанием законов распределения вероятности слишком громоздко. Для практики бывает достаточно указать только отдельные числовые характеристики закона распределения случайной величины. Поэтому для оценки того или иного свойства законов распределения случайной величины в теории вероятностей используют числовые характеристики, называемые *моментами*. Все они представляют собой некоторые средние значения, причем если усредняются значения, отсчитываемые от начала координат, моменты называются *начальными*, а если от центра закона распределения — *центральными*.

Общее правило образования начальных моментов:

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

где k — номер момента. Важнейшим начальным моментом является первый — среднее значение

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx. \quad (2.15)$$

Первый центральный момент называется математическим ожиданием и обозначается символом $M(x)$ (как и для дискретной случайной величины).

Математическое ожидание служит для определения положения случайной величины на числовой оси — ее среднего значения, определяющего положение области, в которой группируются значения случайной величины.

Рассмотрим некоторые основные свойства математического ожидания.

1. Математическое ожидание неслучайного числа равно самому числу:

$$M(a) = a,$$

где $a = \text{const}$.

2. Постоянный множитель можно выносить за знак математического ожидания:

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

3. Математическое ожидание алгебраической суммы независимых случайных величин равно алгебраической сумме их математических ожиданий:

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

4. Математическое ожидание произведения независимых случайных величин равно произведению их математических ожиданий:

$$M(xyz) = M(x)M(y)M(z).$$

5. Математическое ожидание отклонения случайной величины от ее математического ожидания равно нулю:

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

Если начало координат перенесено в центр закона распределения вероятности, то такое распределение называется *центрированным*. Общее правило образования центральных моментов записывается следующим образом:

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

Из формулы видно, что первый центральный момент равен нулю (пятое свойство математического ожидания).

Второй центральный момент называется дисперсией σ_x^2 :

$$\sigma_x^2 = \overline{(x - \bar{x})^2} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx. \quad (2.16)$$

Иногда дисперсию обозначают символом $D(x)$.

Основные свойства дисперсии.

1. Дисперсия неслучайного числа равна нулю:

$$D(a) = 0, \quad a = \text{const.}$$

2. Постоянный множитель можно выносить за знак дисперсии, возводя его при этом в квадрат:

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

3. Дисперсия алгебраической суммы независимых случайных величин равна арифметической сумме их дисперсий:

$$D(x + y - z) = D(x) + D(y) + D(z).$$

4. Дисперсия случайной величины равна разности между математическим ожиданием ее квадрата и квадратом математического ожидания:

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

Чем больше дисперсия, тем значительнее рассеяние результатов сравнения относительно среднего значения (рис. 2.7). В метрологии в качестве меры рас-

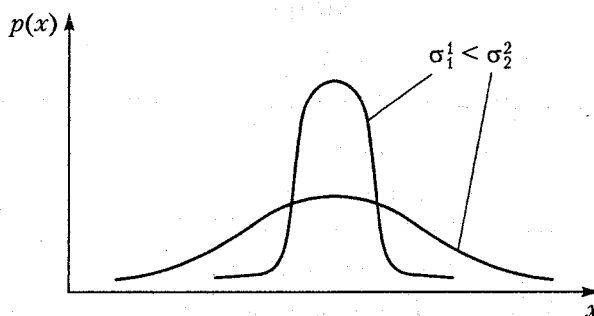


Рис. 2.7. Графики плотности распределения вероятности при различных значениях дисперсии

сеяния используют среднее квадратическое отклонение, которое по размерности совпадает с измеряемой величиной:

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

Третий центральный момент служит для оценки асимметрии распределения плотности вероятности, четвертый центральный момент используется для оценки заостренности дифференциальной функции распределения вероятности.

2.3.3. Случайные погрешности результатов измерений

Математические модели эмпирических законов распределения вероятности отдельных показаний, полученных при измерении, — дифференциальная и интегральная функции распределения вероятности, а также все их моменты любого порядка обладают важным качеством: будучи характеристиками случайной величины, сами они не являются случайными. Описание с их помощью результатов измерений было бы удобным, если бы эти характеристики можно было получить. На практике невозможно получить бесконечное множество показаний при сохранении неизменности условий, при которых выполняются измерения. Поэтому в процессе обработки результатов измерений могут быть получены только оценки этих числовых характеристик.

Оценки, получаемые по статистическим данным, являются случайными величинами, и их значения зависят от объема экспериментальных данных. Оценки должны быть состоятельными, несмещенными и эффективными.

Оценка называется *состоятельной*, если при увеличении числа наблюдений она стремится к истинному значению оцениваемой величины.

Оценка является *несмещенной*, если ее математическое ожидание равно истинному значению оцениваемой величины.

В том случае, когда можно найти несколько несмещенных оценок, лучшей из них считается та, которая имеет наименьшую дисперсию. Такая оценка называется *эффективной*.

Рассмотрим n независимых наблюдений Q_i , полученных при измерении физической величины постоянного размера. Пусть каждое из них отличается от среднего значения Q (истинного значения) на δ_i :

$$Q_1 = Q + \delta_1;$$

$$Q_2 = Q + \delta_2;$$

$$Q_3 = Q + \delta_3;$$

... ..

$$Q_n = Q + \delta_n,$$

где случайная величина δ (отклонение от среднего значения) подчиняется центрированному симметричному закону распределения вероятности. Суммируя правые и левые части уравнений и разделив полученные суммы на n , получим:

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

Теория вероятностей устанавливает, что при $n \rightarrow \infty$ алгебраическая сумма отклонений при симметричном законе распределения вероятности стремится к нулю:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i \approx 0.$$

Значение

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.17)$$

является приближением к истинному значению и называется средним арифметическим значением. Среднее арифметическое является состоятельной, несмещенной и эффективной оценкой истинного значения (среднего значения или математического ожидания). Для нормального закона распределения оценку СКО отдельных результатов измерений, входящих в серию из n независимых равноточных измерений, вычисляют по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}}. \quad (2.18)$$

Величину, определяемую согласно выражению (2.18), называют *средней квадратической погрешностью* (СКП) результатов единичных показаний в ряду измерений. На практике и в ряде нормативных документов в области метрологии широко используется термин «среднее квадратическое отклонение», при этом опускается слово «оценка». Величина S называется также стандартным отклонением. Более подробно понятие «стандартное отклонение» рассматривается в разделе 4.4. Поскольку в РМГ 29–99 принят термин «СКП», то он и будет использоваться далее.

Среднее арифметическое, как и результат единичного измерения, является случайной величиной. В серии измерений существует зависимость между СКП единичного измерения и СКП среднего арифметического $S_{\bar{Q}}$:

$$S_{\bar{Q}} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (2.19)$$

СКП среднего арифметического в \sqrt{n} раз меньше, чем СКП результата единичного измерения. При этом если результаты единичного измерения подчиняются нормальному закону распределения вероятности, то и среднее арифметическое подчиняется нормальному закону с тем же математическим ожиданием.

Для равномерного закона распределения (см. рис. 2.3) математическое ожидание

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad (2.20)$$

а среднее квадратическое отклонение —

$$\sigma = \frac{x_2 - x_1}{2\sqrt{3}}. \quad (2.21)$$

В случаях, когда закон равномерного распределения вероятности не может быть получен экспериментально, его статистический смысл теряется, а сам закон распределения используется как математическая модель для учета дефицита ин-

формации при оценке погрешности результата измерения. Величину, вычисляемую согласно выражению (2.21), называют аналогом СКП.

Для количественной оценки и установления границ случайной погрешности результата измерения используются предельная погрешность, интервальная оценка, оценки числовых характеристик закона распределения. Выбор конкретной оценки определяется необходимой полнотой сведений об источниках погрешности, назначением измерений и характером использования их результатов.

Предельная погрешность — это максимальная погрешность, которая может появиться в конкретном измерительном эксперименте. Теоретически такая оценка погрешности правомерна только для распределений, границы которых четко выражены и существует такое значение $\pm \Delta_{\max}$, которое ограничивает возможные значения случайной погрешности с двух сторон от центра распределения (например, равномерного). Такая оценка не содержит информации о характере закона распределения, часто бывает завышенной и в настоящее время применяется редко.

Более информативными являются квантильные оценки. Площадь, заключенная под всей кривой плотности распределения вероятности, по условиям нормирования равна единице. Эту площадь можно разделить вертикальными линиями на части. Абсциссы таких линий называют *квантилями* (рис. 2.8).

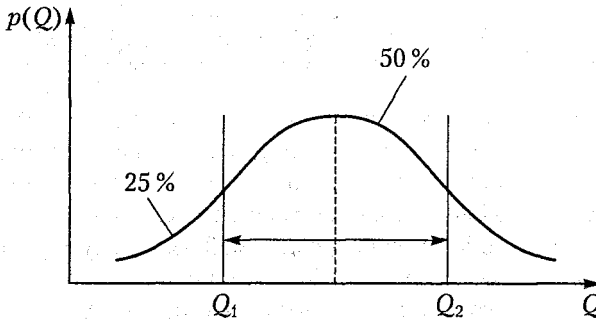


Рис. 2.8. Квантильные оценки

Q_1 есть 25 %-ная квантиль, так как площадь под кривой $p(Q)$ слева от нее составляет 25 % всей площади. Абсцисса Q_2 соответствует 75 %-ной квантили. Между Q_1 и Q_2 заключено 50 % всех возможных значений случайной величины (результатов единичных измерений). Квантильная оценка результата измерений позволяет найти вероятность, с которой значение случайной величины (результата измерения) находится в интервале от Q_1 до Q_2 . Такой интервал называется *доверительным интервалом*, а соответствующая ему вероятность — *доверительной вероятностью*.

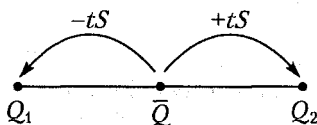


Рис. 2.9. Доверительный интервал

Принято границы доверительного интервала указывать симметрично относительно среднего арифметического значения, а половину доверительного интервала устанавливать кратной СКП (tS) и принимать за оценку случайной погрешности результата измерения (рис. 2.9). Принято также применять термин «доверительные гра-

ницы случайной погрешности». Доверительные границы случайной погрешности находят по формуле

$$\varepsilon = \pm tS, \quad (2.22)$$

где t — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и формы закона распределения.

Квантили, ограничивающие доверительный интервал, могут быть выбраны различными, поэтому при интервальном оценивании случайной погрешности необходимо указывать значение принятой доверительной вероятности, например $U = (3,0 \pm 0,2)B$ при $P = 0,95$.

В общем случае можно вычислить вероятность P того, что искомое значение измеряемой величины лежит в пределах $\bar{Q} \pm tS$ для любого положительного числа t . В табл. 2.2 приведены доверительные вероятности при различных значениях t для нормального закона распределения при числе независимых наблюдений $n > 50$ (при $n < 50$ используются коэффициенты Стьюдента). Более точные таблицы для значений t приводятся в специальной литературе по метрологии.

Таблица 2.2. Зависимость коэффициента t от доверительной вероятности P для нормального закона распределения

t	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,50	3,00	4,00
$P, \%$	38	55	68	79	87	92	95,4	98,8	99,7	99,99

В целях единообразия оценивания случайных погрешностей интервальными оценками при технических измерениях доверительная вероятность принимается равной 0,95. В случаях особо точных и/или ответственных измерений допускается применять другую доверительную вероятность.

Согласно третьему свойству дисперсии (см. 2.3), при суммировании нескольких статистически независимых случайных величин, которыми могут являться несколько случайных погрешностей, суммируют дисперсии, а не доверительные интервалы. Соответственно при необходимости оценить погрешность суммированием ее составляющих сложение числовых оценок дисперсии производят по формуле

$$S_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2}. \quad (2.23)$$

Таким образом, для того чтобы отдельные составляющие случайной погрешности можно было суммировать расчетным путем, они должны быть представлены своим СКП, а не предельными или доверительными границами. При необходимости дальнейшей обработки результатов измерений и оценки суммарного значения случайной погрешности используют информацию о числовых характеристиках законов распределения.

Формула (2.23) правомерна только для некоррелированных случайных величин. В том случае, когда суммируемые составляющие погрешности коррелированы, расчетные соотношения усложняются, так как требуется учитывать коррелированные связи. Методы выявления коррелированных связей и их учет являются

ся предметом изучения в теории вероятностей и рассматриваются в специальной литературе по метрологии.

Необходимо отметить, что форма закона распределения при суммировании случайных величин сохраняется лишь для небольшого числа законов распределения (например, нормального, закона Пуассона и некоторых других). Этим во многом объясняется значительная роль нормального закона распределения в метрологии, которую он играет до настоящего времени. В общем случае при суммировании случайных величин законы их распределения деформируются и закон распределения суммы оказывается отличным от закона распределения слагаемых (см. рис. 2.6). Соответственно усложняется проблема определения доверительного интервала по отношению к конечному результату.

2.4. Методы исключения и компенсации систематических погрешностей

2.4.1. Исправленный результат измерения и поправки, влияющие факторы

Теория погрешностей посвящена главным образом анализу случайных погрешностей и методам оценки погрешностей результатов измерений на основе теории вероятности и математической статистики. Систематические погрешности при этом считаются скорректированными благодаря использованию специальных методов их обнаружения и исключения. В соответствии с этим введены понятия неисправленного и исправленного результатов измерения.

Неисправленный результат измерения — это значение физической величины, полученное в результате измерения до введения поправок.

Исправленный результат измерения — это значение физической величины, полученное в результате измерений и уточненное путем введения в него необходимых поправок.

Согласно РМГ 29–99, *поправка* — это значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности. По сути, поправка рассматривается как известное значение систематической погрешности, взятое с обратным знаком $Q = X + C_a$, где C_a — поправка, имеющая размерность измеряемой величины, которая вводится в результат измерения с целью исключения систематической составляющей погрешности (численное значение C_a может быть как со знаком «+», так и со знаком «-»).

Влияние систематической погрешности можно исключить введением безразмерного поправочного множителя. Согласно РМГ 29–99, *поправочный множитель* — это числовой коэффициент, на который умножают неисправленный результат измерения с целью исключения влияния систематической погрешности $Q = C_m X$, где C_m — поправочный множитель. Поправки и поправочные множители могут определяться теоретически или экспериментально, могут быть представлены в виде числа или функции, заданной графически, таблично или с помощью аналитических выражений.

Пример 2.3. Зависимость длины концевой меры длины от температуры имеет вид

$$L = L_n[1 + \alpha(t - t_n)],$$

где L_n и t_n — длина линейки и температура, соответствующие нормальным условиям применения; L и t — длина линейки и температура, соответствующие реальным условиям применения; α — коэффициент линейного расширения материала, из которого изготовлена линейка.

Если принять $t - t_n = \Delta t$, то поправочный множитель

$$C_m = 1 + \alpha \Delta t.$$

Поправка составит:

$$C_a = L_n \alpha \Delta t.$$

Дополнительно к введению поправок в результат неисправленного измерения систематические погрешности по возможности должны исключаться при подготовке к измерениям и компенсироваться в процессе проведения измерений.

Систематическая погрешность представляет собой определенную функцию влияющих факторов, в результате воздействия которых в процессе измерений возникают систематические эффекты. В метрологической практике при оценке и исключении систематических погрешностей в первую очередь рассматриваются систематические эффекты, возникающие вследствие влияния объекта измерения, субъекта (эксперта или экспериментатора), средств измерения, методов и способов измерения, условий измерения.

Рассмотрим влияние перечисленных факторов подробнее.

Объект измерений. Перед измерением он должен быть достаточно хорошо изучен с целью выбора его модели. Чем полнее модель соответствует исследуемому объекту, тем более точные результаты измерений могут быть получены. Модели объектов необходимы даже при простейших измерениях. Если требуется определить размеры деревянного ящика, то сначала необходимо выполнить модель этого ящика — например, в виде прямоугольного параллелепипеда.

Модель всегда в той или иной мере упрощена по сравнению с реальным объектом, и в каждом отдельном случае специалист-метролог должен добиваться разумного компромисса между полнотой и сжатостью описания объекта. Если конечной задачей является определение объема ящика с тем, чтобы определить, сколько деталей можно в него упаковать, то бесполезно строить модель, которая отражала бы все зазубрины на его боках. Кривизна земной поверхности может не учитываться при измерении площади садового участка, но при измерении площади поверхности океана пренебрегать ею нельзя. При измерении периода обращения Земли вокруг Солнца можно пренебречь его неравномерностью, а можно сделать эту неравномерность объектом исследования.

По мере поступления измерительной информации модель исследуемого объекта может изменяться или уточняться.

Субъект (экспериментатор). Его вклад в погрешность измерения необходимо уменьшать подбором экспериментатора соответствующей квалификации и соблюдения требований эргономики при проведении измерительного эксперимента и разработке средств измерений. При этом можно выделить человеческий фактор и личностный фактор, обуславливающие появление ошибок.

Условия проведения измерительного эксперимента, особенности средств измерений и выбранного метода измерений должны соответствовать психофизическим свойствам и возможностям человека, что отражает суть человеческого фактора. Человек не может считывать показания с большого числа приборов одновременно, острота зрения и длительность ясного видения в значительной степени зависят от условий освещения, вероятность ошибочных действий возрастает при высоком уровне шумов и т. п. Если средства освещения расположены таким образом, что лицевая панель прибора бликует или оказывается затененной, резко повышается вероятность ошибочного отсчета. В данном случае появление ошибки следует отнести к человеческому фактору.

Качество измерений в значительной степени зависит от профессиональной пригодности экспериментатора, его подготовки к конкретным измерениям, внимательности, состояния здоровья и т. д., что отражает суть личного фактора. Простейшим примером проявления личного фактора является несоблюдение обязательных условий измерений вследствие желания экспериментатора искусственно ускорить завершение измерительного эксперимента.

Средство измерений. Причина возникновения систематических погрешностей может заключаться в свойствах применяемых средств измерений. Эти свойства могут вызывать погрешности различного характера и происхождения.

Равноплечие весы не могут быть идеально равноплечими. В весах для точного взвешивания всегда обнаруживается некоторое неравенство плеч, полностью устранить которое путем регулировки невозможно.

Систематическая погрешность может возникнуть в результате неправильной градуировки, наличия зазоров между подвижными частями приборов, потерь энергии в материалах сердечника измерительных трансформаторов и т. д.

Методы и способы измерения. Если подходить строго, то во многих методах измерения можно обнаружить погрешности, являющиеся следствием тех или иных допущений или упрощений, применения эмпирических формул и функциональных зависимостей. В некоторых случаях влияние таких допущений оказывается незначительным, в других — приводит к значительным погрешностям. В ряде случаев погрешность метода неустранима в принципе.

Примером может служить погрешность, возникающая при измерении напряжения вольтметром. Вследствие шунтирования входным сопротивлением вольтметра того участка цепи, на котором измеряется напряжение, оно оказывается меньшим, чем было до подключения вольтметра. Для оценки возникающей погрешности и принятия решения о необходимости ее учета необходимо иметь данные о значении сопротивления цепи между точками, к которым присоединен вольтметр, то есть необходимо производить дополнительное исследование объекта измерения. Если нужно измерить температуру раскаленной болванки, поступающей из печи на прокатный стан, то при любом расположении датчиков невозможно измерить внутреннюю температуру тела болванки.

Условия измерения. Эти погрешности являются следствием внешних возмущающих воздействий. Такими воздействиями могут быть тепловые и воздушные потоки, магнитные и электрические поля, изменения атмосферного давления, влажности, вибрации. В некоторых случаях помехи могут создаваться рентгеновскими аппаратами, в результате ионизирующих излучений и т. д.

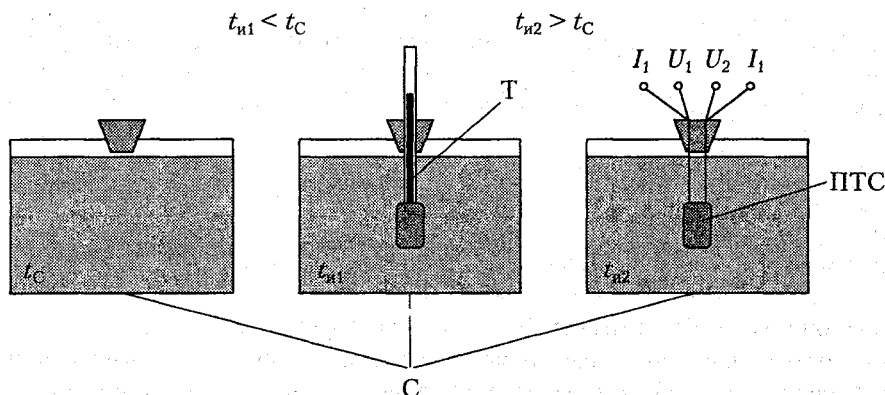


Рис. 2.10. Взаимодействие средства измерений и объекта измерений

Наибольшую опасность представляют величины, действующие непрерывно в течение процесса измерения. Они вносят систематические погрешности, которые могут остаться незамеченными вследствие их неизменности. Изменения в действии влияющего фактора, включение или выключение источника возмущающих воздействий в течение процесса измерений часто отмечаются по неожиданным изменениям показаний приборов. Это всегда приводит к необходимости выявления причин изменений и повторения измерительного эксперимента.

Определение значения измеряемой величины не является односторонним процессом. Средство измерений взаимодействует с объектом измерения. Влияя на объект, средство измерения часто отбирает у него энергию или само является источником энергии, что может исказить результат измерений. Рассмотрим сосуд С с нагретой жидкостью, температуру которой необходимо измерить при помощи стеклянного ртутного термометра (рис. 2.10). В процессе измерений термометр Т опускают в сосуд и ждут некоторое время, пока температура ртути не сравняется с температурой жидкости. При этом установившееся значение t_{n1} , определяемое по шкале термометра, оказывается меньше искомой температуры t_C . Часть энергии уходит на нагрев термометра и связанное с этим расширение ртути (остальные потери в данном случае не рассматриваются). Если в сосуд поместить платиновый термометр сопротивления (ПТС), измеренное значение t_{n2} будет больше искомого значения t_C вследствие нагрева термометра протекающим через него током нагрузки.

За редкими исключениями, взаимные воздействия объектов и средств измерений проявляются всегда. Вопрос заключается в том, какое влияние эти воздействия оказывают на результаты измерений в каждом конкретном случае. Нередко погрешностью, обусловленной указанными воздействиями, можно пренебречь.

2.4.2. Исключение систематических погрешностей при планировании и выполнении измерений

Поправки в результат измерения вносятся после выполнения эксперимента. Другой способ уменьшить погрешность измерения — устранение источников погрешностей до начала измерений, на этапе их планирования.

Под устранением источника погрешностей следует понимать как непосредственное его удаление (например, удаление источника тепла), так и защиту измерительной аппаратуры и объекта измерений от влияния этого источника.

Источником возмущающих воздействий может служить техническая или метрологическая неисправность отдельного средства измерений. В этом случае погрешность может быть уменьшена путем ремонта, регулировки, настройки прибора и его последующей поверки (калибровки).

Внешние влияющие факторы можно разделить на несколько групп:

- климатические (температура окружающей среды, относительная влажность воздуха, атмосферное давление);
- электрические и магнитные (колебания силы электрического тока, напряжения в электрической цепи, частоты переменного электрического тока, постоянные и переменные магнитные поля и т. д.);
- внешние нагрузки (вибрации, ударные нагрузки, внешние касания деталей приборов);
- ионизирующие излучения, газовый состав атмосферы и т. д.

С целью уменьшения погрешности измерений к условиям их проведения предъявляются жесткие требования. Для конкретных областей измерений устанавливают единые условия, называемые *нормальными* (табл. 2.3). Значение физической величины, соответствующее нормальным условиям, называют номинальным значением влияющей физической величины. При выполнении измерений поддерживать определенные номинальные значения влияющих величин невозможно, поэтому в нормативных документах для соответствующих величин устанавливаются допустимые отклонения от номинального значения в зависимости от требований к допускаемой погрешности измерений.

Таблица 2.3. Некоторые номинальные значения влияющих физических величин

Влияющая величина	Номинальное значение влияющей величины
Температура окружающей среды	20 °С (293 К)
Давление окружающего воздуха	101,3 кПа
Относительная влажность воздуха	65 %
Плотность воздуха	1,2 кг/м ³
Магнитная индукция (напряженность магнитного поля) и напряженность электростатического поля	Соответствует характеристикам поля Земли в данном географическом районе

В качестве мероприятия, предупреждающего появление температурной погрешности, широко применяют *термостатирование*, то есть обеспечение определенной температуры окружающей среды с допускаемыми колебаниями. Термостатируют большие помещения (лаборатории), небольшие помещения (камеры), отдельные средства измерений или их части (меры сопротивления, встроенные стабилизаторы частоты). При больших рабочих объемах осуществляется воздуш-

ное термостатирование, при малых объемах — не только воздушное, но и жидкостное, окружая прибор, меру или измеряемый объект водой, маслом или другой жидкостью, которые смягчают колебания температуры и облегчают поддержание ее на постоянном уровне.

Устранение влияния магнитных полей. Напряженность магнитного поля Земли невелика, поэтому опасность заметного его воздействия возникает только для средств измерений, отличающихся повышенной чувствительностью. Средством защиты от влияния магнитного поля Земли и от магнитных полей, образованных постоянными и переменными токами, является экранирование. Экранирование средств измерений, как правило, предусматривается при их конструировании.

Устранение возмущающих вибраций и сотрясений. Эти влияния устраняют амортизацией прибора и его чувствительных блоков и деталей. Для амортизации колебаний в зависимости от их частоты и чувствительности прибора к этим возмущениям используют различного рода поглотители — губчатую резину, эластичные подвесы; обеспечивают развязку по фундаменту еще на стадии строительства лабораторных корпусов, используют стабилизирующие платформы и т. п.

Устранение других видов вредных влияний. Влияние таких факторов, как изменение атмосферного давления, простыми средствами неустранимо. В тех случаях, когда соблюдение определенных требований является обязательным, применяют барокамеры с регулируемым давлением. Обычно в этих камерах можно одновременно регулировать влажность и температуру.

В ряде случаев добиться уменьшения систематических погрешностей до проведения измерительного эксперимента можно выбором более совершенных средств измерений.

Устранение влияния ряда возмущающих факторов в процессе выполнения измерений является эффективным способом исключения систематических погрешностей. Характерной чертой рассматриваемых далее способов исключения систематических погрешностей является необходимость проведения повторных измерений, поэтому они применяются в основном при измерениях стабильных параметров.

Метод замещения. Этот метод является одним из наиболее распространенных при решении задач уменьшения влияния возмущающих факторов, имеющих систематический характер, и представляет собой разновидность метода сравнения. Сравнение производится путем замены измеряемой величины известной величиной, воспроизводимой мерой, таким образом, чтобы воздействием известной величины привести средство измерения в то состояние, которое оно имело при воздействии измеряемой величины.

Пример 2.4. Необходимо определить массу груза, используя пружинные весы, у которых имеется постоянная систематическая погрешность, например, вследствие изменения упругости пружины или смещения шкалы (рис. 2.11). Измерения проводятся в два этапа. Вначале на чашу весов помещают груз M_X , массу которого необходимо определить, и отмечают положение указателя. Затем груз замещают набором гирь общей массой M_N таким образом, чтобы указатель оказался в прежнем положении. Очевидно, что при одинаковом отклонении указателя $M_X = M_N$ и постоянная систематическая погрешность не окажет влияния на результат измерения.

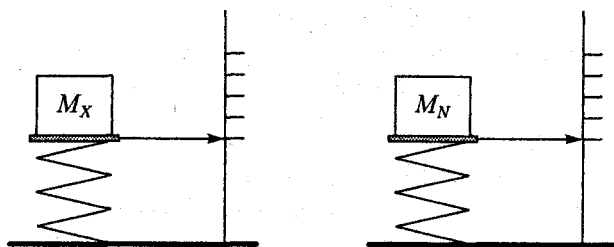


Рис. 2.11. Метод замещения

Метод замещения широко используется при измерениях параметров электрических цепей — электрического сопротивления, емкости, индуктивности. Объект, меру электрического сопротивления, действительное значение которой необходимо определить, включают в измерительную цепь (часто применяется мостовая цепь или потенциометр с использованием нулевого метода). После уравнивания вместо измеряемого объекта включают меру переменного значения — магазин сопротивления и, подбирая сопротивление магазина, добиваются восстановления равновесия цепи. В этом случае способ замещения позволяет исключить остаточную неравнозначность элементов мостовых цепей, влияние утечек и других паразитных явлений.

Метод противопоставления (перестановки). Он заключается в том, что измерения проводят два раза, причем так, чтобы причина, вызывающая погрешность при первом измерении, оказала противоположное действие на результат второго измерения. В качестве примера рассмотрим взвешивание на равноплечих весах (рис. 2.12).

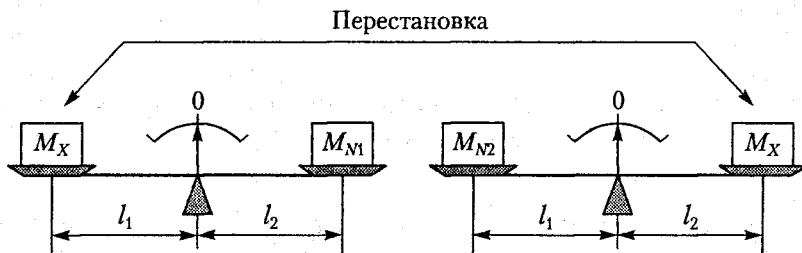


Рис. 2.12. Метод противопоставления (перестановки)

Условие равновесия весов $M_X l_1 = M_N l_2$, где M_X — неизвестная масса груза, M_N — масса набора гирь.

Если длины плеч l_1 и l_2 одинаковы, то $M_X = M_N$. Если $l_1 \neq l_2$ (например, из-за технологического разброса длин плеч при их изготовлении), то при взвешивании каждый раз возникает систематическая погрешность

$$\Delta_c = M_N \left(\frac{l_2}{l_1} - 1 \right).$$

Воздействие влияющего фактора учитывается коэффициентом l_1/l_2 .

Для исключения этой погрешности взвешивание проводится в два этапа.

Первый этап — уравновешивание груза M_X гирями массой M_{N1} :

$$M_X l_1 = M_{N1} l_2.$$

Второй этап — повторное уравновешивание весов после перемещения груза M_X на ту чашу весов, на которой были гири. Равновесие будет достигнуто при использовании гирь массой M_{N2} :

$$M_{N2} l_1 = M_X l_2.$$

Из первого и второго условий равновесия следует:

$$M_X = \sqrt{M_{N1} M_{N2}}.$$

Как видно из полученного выражения, длины плеч не входят в окончательный результат взвешивания.

Метод компенсации погрешности по знаку. Этот метод также предусматривает проведение измерения в два этапа, выполняемых так, чтобы постоянная систематическая погрешность входила в показания средства измерения на каждом этапе с разными знаками. За результат измерения принимают среднее арифметическое двух измерений, при этом систематические погрешности взаимно компенсируются.

В алгебраической форме это можно выразить следующим образом:

$$Q_1 = Q + \Theta; \quad Q_2 = Q - \Theta;$$

$$Q = 0,5(Q_1 + Q_2),$$

где Q_1 и Q_2 — результаты двух измерений; Θ — систематическая погрешность, природа которой известна, но неизвестно значение; Q — значение измеряемой величины, свободное от данной погрешности.

Второй вариант применения данного метода подразумевает, что систематическая погрешность входит в показания средства измерений с одинаковым знаком, но сам эксперимент ставится таким образом, что меняет знак искомого значения Q , оставаясь неизменным по абсолютной величине:

$$Q_1 = Q + \Theta; \quad Q_2 = -Q + \Theta; \quad Q = 0,5(Q_1 - Q_2).$$

При использовании метода компенсации погрешности по знаку исключается влияние люфтов в механических узлах средств измерений, влияние постоянных магнитных полей, паразитных термоЭДС и т. п.

Пример 2.5. Проводится измерение при помощи одинарного моста с использованием метода неполного уравновешивания. Из-за наличия паразитной термоЭДС возникает систематическая погрешность, для исключения которой измерения проводятся при двух направлениях тока питания (рис. 2.13).

При одном направлении тока стрелка нулевого указателя (НУ) отклоняется в одну сторону (отсчет U_1), а при другом — в противоположную (отсчет U_2). Шкала НУ имеет пределы $\pm U_k$. Действие термоЭДС остается однонаправленным и входит в каждый отсчет с одинаковым знаком U_r . Среднее значение дает искомым отсчет U :

$$U = 0,5(U_1 - U_2) = 0,5[(U + U_r) - (-U + U_r)].$$

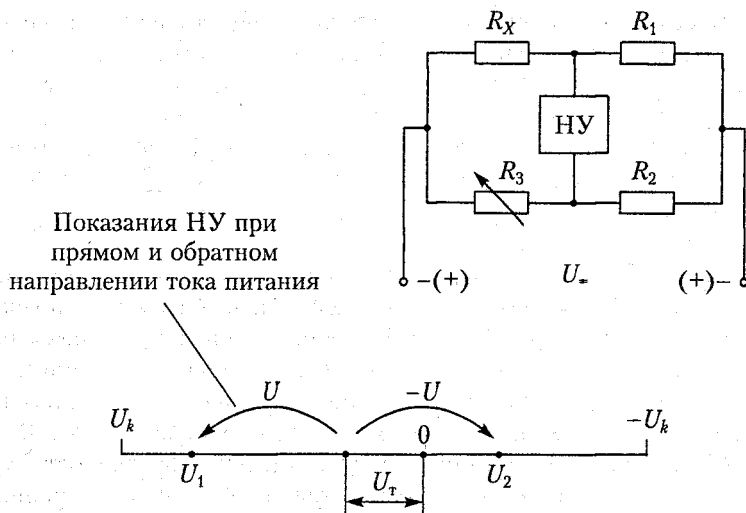


Рис. 2.13. Метод компенсации погрешности по знаку

Исключение погрешности, изменяющейся по линейному закону. Простейшим, но частным случаем погрешности, изменяющейся по определенному закону, является погрешность, прогрессирующая по определенному закону, например пропорционально времени. Такие погрешности могут быть исключены следующим образом. Если известно, что при измерении величины постоянного размера Q_0 систематическая погрешность изменяется линейно во времени, $\Delta_c = At$ ($A = \text{const}$), то при измерении будет получено значение

$$Q_t = Q_0 + At.$$

Для исключения погрешности достаточно выполнить два наблюдения Q_1 и Q_2 при фиксированных значениях времени t_1 и t_2 (рис. 2.14). Тогда искомое значение измеряемой величины может быть вычислено согласно выражению

$$Q_0 = \frac{Q_1 t_2 - Q_2 t_1}{t_2 - t_1}.$$

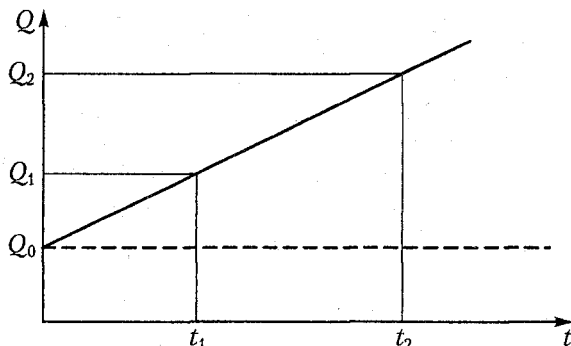


Рис. 2.14. Погрешность, изменяющаяся по линейному закону

Систематические составляющие погрешности, обусловленные несовершенством методов измерения, ограниченной точностью расчетных формул, положенных в основу измерений, влиянием средств измерений на объект, свойства которого исследуются, относятся к методическим погрешностям. Единых рекомендаций по их обнаружению, оцениванию и исключению нет. Задача в каждом конкретном случае решается индивидуально, на основе анализа применяемых методов выполнения измерений. Результаты такого анализа часто зависят от квалификации и опыта экспериментатора.

Полностью исключить систематические погрешности нельзя, поэтому всегда необходимо оценить погрешность, остающуюся после введения поправок на все известные возмущающие воздействия. Подобные оценки проводятся на основе анализа априорной информации, при этом в подавляющем большинстве случаев оказывается возможным установить границы оставшейся погрешности, но не удается получить информацию о законе распределения вероятности. В этом случае принимается гипотеза о равномерном распределении вероятности в установленном интервале. Половину интервала составляет Θ — неисключенная систематическая погрешность (НСП). Необходимо отметить, что в данном случае закон распределения не может быть получен экспериментально и статистического смысла не имеет.

ГЛАВА 3 Средства и методы измерений

3.1. Классификация средств измерений

Технические средства, специально предназначенные для измерений, называют *средствами измерительной техники*. К средствам измерительной техники относят средства измерений и их совокупности, измерительные принадлежности и измерительные устройства.

Средствами измерений называют технические средства, которые используют при измерениях и имеют нормированные метрологические характеристики. К *метрологическим характеристикам* относят такие характеристики, которые влияют на результат измерений и на его погрешность. Средство измерений является обобщенным понятием, объединяющим самые разнообразные конструктивно законченные устройства, которые реализуют одну из двух функций:

- воспроизводят величину заданного (известного) размера: например, гири — заданную массу, магазин сопротивлений — ряд дискретных значений сопротивления;
- вырабатывают сигнал (показание), несущий информацию о значении измеряемой величины. Показания средства измерений либо непосредственно воспринимаются органами чувств человека (например, показания стрелочного или цифрового прибора), либо являются недоступными для восприятия человеком и используются для преобразования другими техническими средствами.

По конструктивному исполнению, форме предоставления измерительной информации, функциональному назначению средства измерений подразделяют на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы.

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и/или хранения физической величины одного или нескольких размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Различают следующие разновидности мер:

- *однозначная мера* — мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (например, гиря 1 кг);

- *многозначная мера* — мера, воспроизводящая 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 по отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины).

Измерительный преобразователь — это средство измерений, предназначенное для преобразования сигналов измерительной информации в форму, удобную для дальнейшего преобразования, передачи, обработки, хранения. Как правило, измерительная информация на выходе измерительного преобразователя недоступна для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительный преобразователь предназначен для выполнения измерительного преобразования — операции, при которой устанавливается взаимно однозначное соответствие между размерами преобразуемой и преобразованной физических величин, которые в общем случае являются неоднородными. Если входная и выходная величины измерительного преобразователя являются однородными, то он называется *масштабным* преобразователем, предназначенным для изменения размера величины или измерительного сигнала в заданное число раз.

По местоположению в измерительной цепи преобразователи делят на первичные и промежуточные.

Первичный измерительный преобразователь — преобразователь, на вход которого непосредственно воздействуют измеряемая физическая величина, то есть первый преобразователь в измерительной цепи средства измерения. Конструктивно обособленные первичные преобразователи часто называют *датчиками*. Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего от него сигналы измерительной информации. *Промежуточные* измерительные преобразователи располагаются в измерительной цепи после первичного преобразователя. Измерительные преобразователи очень разнообразны по конструктивному решению и принципам действия. К измерительным преобразователям относятся термомпары, измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные усилители, электромеханические измерительные механизмы, аналого-цифровые преобразователи и т. д.

Измерительный прибор — это средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне ее измерения и выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительный прибор представляет собой совокупность преобразовательных элементов, образующих измерительную цепь, и отсчетного устройства — элемента средства измерений, преобразующего измерительный сигнал в форму, доступную восприятию органами чувств человека.

По форме индикации измеряемой величины различают измерительные приборы:

- *показывающие*, которые допускают только отсчитывание показаний при измерении величины, например стрелочный или цифровой вольтметр;
- *регистрирующие*, предусматривающие регистрацию показаний на каком-либо носителе информации. Регистрация может проводиться в аналоговой или

цифровой форме; различают самопишущие и печатающие измерительные приборы.

По форме преобразования используемых измерительных сигналов измерительные приборы подразделяют на аналоговые и цифровые.

Аналоговые приборы — это приборы, показания или выходной сигнал которых является непрерывной функцией изменения измеряемой величины.

Цифровые приборы — это приборы, принцип действия которых основан на квантовании измеряемой или пропорциональной ей величины. Наличие операции квантования приводит к появлению у цифровых приборов специфических свойств, обуславливающих существенные отличия методов выбора, анализа, описания и нормирования метрологических характеристик от методов аналоговых приборов.

Измерительная установка — совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте.

Измерительная система — совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, размещенных в разных точках контролируемого объекта и соединенных между собой каналами связи, предназначенных для измерений одной или нескольких физических величин. И в установках, и в системах выходной сигнал измерительной информации может иметь форму, удобную как для непосредственного восприятия, так и для автоматической обработки, передачи и использования в автоматизированных системах управления. Измерительные системы разделяют на измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие. Особо выделяют измерительно-вычислительные комплексы — функционально объединенную совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенных для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Классификация средств измерений по роли в процессе измерения и выполняемым функциям, элементы которой были рассмотрены ранее, представлена на рис. 3.1.

К измерительной технике относятся также средства сравнения — технические средства или специально создаваемая среда, посредством которых возможно сравнивать друг с другом меры однородных величин или показания измерительных приборов. Средство сравнения, предназначенное для сличения мер однородных величин, называют *компаратором*. Примерами таких устройств могут служить рычажные весы и компаратор для сличения нормальных элементов.

По роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, средства измерений делят на:

- средства измерений, предназначенные для воспроизведения, хранения и передачи информации о размере единиц рабочим средствам измерений (эталоны);
- средства измерений, предназначенные для получения измерительной информации в процессе измерения и не связанные с передачей информации о размере единицы (рабочие средства измерений).



Рис. 3.1. Классификация средств измерений по роли в процессе измерения и выполняемым функциям

По уровню автоматизации средства измерений подразделяют на три группы:

- неавтоматические средства измерений;
- автоматизированные средства измерений, выполняющие в автоматическом режиме часть операций, связанных с выполнением измерительной процедуры;
- автоматические средства измерений, выполняющие в автоматическом режиме все операции, связанные с выполнением измерительной процедуры и обработкой результатов.

По отношению к измеряемой физической величине средства измерений делят на основные и вспомогательные:

- основные — это средства измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с поставленной измерительной задачей;
- вспомогательные — это средства измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерения необходимо учесть для получения результатов измерения требуемой точности.

Особое место в измерительной технике занимают *индикаторы* — технические устройства, предназначенные для обнаружения (индикации) физических величин. Электрическая лампочка — индикатор электрического напряжения в сети, лакмусовая бумага — индикатор активности ионов водорода в растворах, вольтметр или амперметр в диагонали одинарного уравновешиваемого моста — индикатор наличия разности потенциалов между вершинами мостовой цепи. С помощью индикаторов устанавливается только наличие какой-либо физической величины или превышение уровня ее порогового значения, поэтому они не отне-

сены к средствам измерений. Важнейшей технической характеристикой индикаторов является порог чувствительности (иногда его называют порогом реагирования). Чем меньше порог реагирования, тем более слабое проявление величины регистрируется индикатором. В ряде случаев нулевые индикаторы с грубым порогом реагирования не позволяют достичь высокой точности измерений. При выполнении измерения с использованием одинарного моста постоянного тока (см. рис. 2.13) методом полного уравнивания отсчетным (информативным) является плечо R_3 . Собственно отсчет снимают в тот момент, когда отсутствует ток в цепи нулевого указателя (индикатора). При использовании грубого нулевого указателя можно провести лишь грубое уравнивание моста при помощи плеча R_3 , независимо от его собственных метрологических характеристик.

3.2. Метрологические характеристики средств измерений, классы точности

Важнейшими свойствами средств измерений являются те, от которых зависит качество (точность) получаемой с их помощью измерительной информации. С этой целью для каждого средства измерений вводятся и нормируются определенные метрологические характеристики. Согласно РМГ 29–99, метрологические характеристики — это характеристики свойств средств измерений, влияющие на результат измерений и на его погрешность.

Характеристики, устанавливаемые в нормативной документации, называются *нормированными*, характеристики, определяемые экспериментально — *действительными*.

Метрологические характеристики (МХ) средств измерений позволяют:

- определять результаты измерений и рассчитывать оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерения в реальных условиях применения средств измерений (*инструментальной* называется составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений);
- рассчитывать МХ каналов измерительных систем, состоящих из ряда средств измерений с известными МХ;
- производить оптимальный выбор средств измерений, обеспечивающих требуемое качество измерений при известных условиях их применения;
- сравнивать средства измерений различных типов с учетом условий применения.

Основным условием возможности решения перечисленных задач является наличие однозначной связи между нормированными МХ и инструментальными погрешностями. Эта связь устанавливается посредством математической модели инструментальной составляющей погрешности, в которой нормируемые МХ используются в качестве аргументов. Номенклатура МХ и способы их выражения должны быть оптимальными. Как показал опыт эксплуатации различных средств измерений, целесообразно нормировать комплекс МХ. Такой комплекс не может быть очень большим, и в то же время каждая нормированная МХ должна отра-

жать конкретное свойство средства измерений и при необходимости может быть проконтролирована.

Номенклатура МХ и полнота, с которой они должны описывать те или иные свойства средств измерений, зависят от назначения средств измерений, условий эксплуатации, режима работы и многих других факторов. В полном перечне установленных МХ можно выделить следующие группы:

- градуировочные характеристики, определяющие соотношение между сигналами на входе и выходе средства измерений в статическом режиме. К ним относятся, например, номинальная статическая характеристика преобразования (градуировочная характеристика) измерительного прибора и измерительного преобразователя, номинальное значение меры, пределы измерения, цена деления шкалы, вид и параметры цифрового кода в цифровом приборе;
- показатели точности средства измерения, позволяющие оценить инструментальную составляющую погрешности результата измерения;
- динамические характеристики, отражающие инерционные свойства средств измерений и необходимые для оценивания динамических погрешностей результатов измерений;
- функции влияния, отражающие зависимость МХ средств измерений от возмущающих факторов и воздействий, а также неинформативных параметров. Неинформативным называется параметр входного сигнала, не связанный непосредственно с измеряемой величиной, но оказывающий влияние на результат измерения (например, частота переменного электрического тока при измерении его амплитуды).

Пример 3.1. При определении градуировочной характеристики в результате воздействия различных влияющих факторов многократно снятые характеристики прибора или серии однотипных приборов занимают на графике некоторую полосу. Поэтому в теории измерений используется понятие полосы неопределенности, или полосы погрешностей данного типа или данного экземпляра измерительного прибора, измерительного преобразователя, измерительного канала информационно-измерительной системы. Некоторая детерминированная средняя линия этой полосы принимается за номинальную характеристику приборов данного типа, указывается в паспорте и используется для определения результата измерения. Погрешность данного средства измерений есть разность между показанием прибора (измеренное значение) и действительным значением входной величины или разность между реальной и номинальной его характеристиками, то есть функция измеряемой величины. Разности между реальной и номинальной характеристиками (рис. 3.2), найденные при заданном значении x в виде $\Delta y = y_p - y_n$ или при заданном значении y в виде $\Delta x = x_p - x_n$, есть абсолютные погрешности, так как они выражаются в единицах величин x или y . Относительная погрешность $\delta = \Delta x/x$ выражается в относительных единицах или процентах. Приведенная погрешность (как отмечалось в разделе 2.1) определяется как отношение абсолютной погрешности, выраженной в единицах входной или выходной величин, к протяженности диапазона измерения, соответственно, входной или выходной величины прибора или преобразователя и выражается в относительных единицах или процентах: $\gamma = \Delta x/x_N$, $\gamma = \Delta y/y_N$.

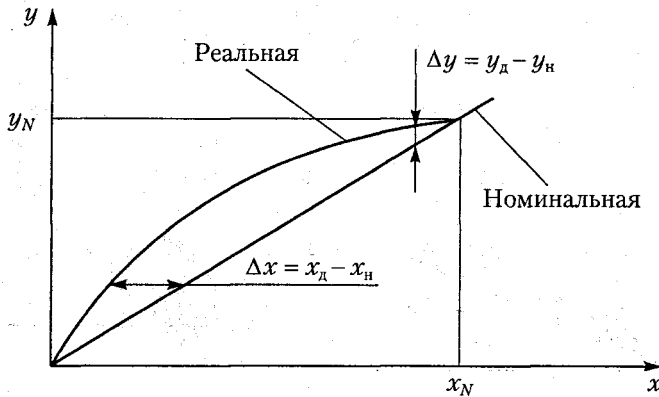


Рис. 3.2. Номинальная и реальная градуировочные характеристики

Учет всех нормируемых МХ средств измерений при оценивании погрешности результата измерений является сложной и трудоемкой процедурой, оправданной при измерениях повышенной точности. При измерениях на производстве и в обиходе такая точность не всегда нужна. В то же время определенная информация о возможной инструментальной составляющей погрешности измерений необходима. Такая информация дается указанием класса точности средства измерений.

Под *классом точности* понимают обобщенную характеристику точности средств измерений данного типа, определяемую пределами допускаемой основной погрешности. Классы точности присваивают средствам измерений при их разработке на основании исследований и испытаний представительной партии средств измерений данного типа. При этом пределы допускаемых погрешностей нормируют и выражают в форме абсолютных, приведенных или относительных погрешностей в зависимости от характера изменения погрешности в пределах диапазона измерения.

Основное различие в способах нормирования обусловлено разным соотношением аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности тех или иных средств измерений. При чисто *мультипликативной* полосе погрешностей средства измерений (рис. 3.3, а) абсолютная погрешность Δx возрастает прямо пропорционально текущему значению x измеряемой величины. Поэтому относительная погрешность такого прибора или преобразователя оказывается постоянной величиной при любом значении x и ее удобно использовать для нормирования погрешностей средства измерений и указания его класса точности. Таким образом, например, нормируются погрешности масштабных преобразователей (делителей напряжения, шунтов и т. п.), при этом указываются границы рабочего диапазона, в которых такая оценка остается приблизительно справедливой.

При чисто *аддитивной* полосе погрешностей (рис. 3.3, б) остается неизменной для любых значений x граница абсолютной погрешности нуля, $\Delta x = \Delta_0 = \text{const}$. Но нормировать абсолютное значение не всегда удобно, поэтому на практике нормируют приведенное значение $\gamma_n = \Delta_0 / X_N$. Если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы, нормирующее значение принимают равным верхнему

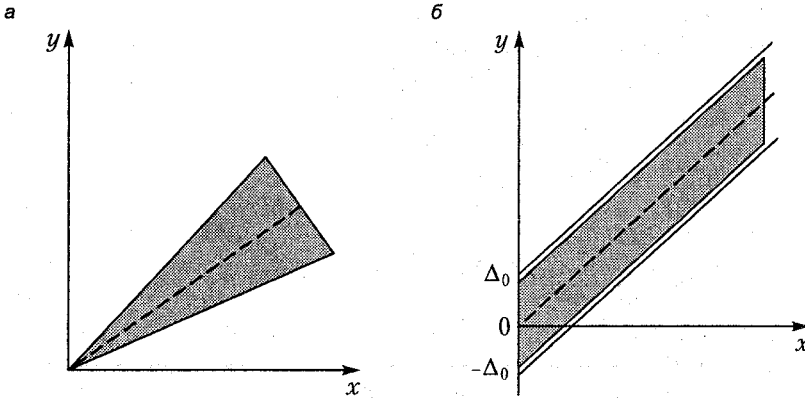


Рис. 3.3. Полосы погрешностей: а — мультипликативная; б — аддитивная

пределу диапазона измерений, $X_N = X_k$. Если нулевая отметка находится посередине шкалы, то X_N равно протяженности диапазона измерений. Например, для амперметра со шкалой от $-0,5$ до $+1,5$ А значение X_N равно $2,0$ А.

Значение γ_n , выраженное в процентах, используется для обозначения класса точности таких средств измерений с аддитивной полосой погрешностей. Однако полагать, что вольтметр класса точности $0,1$ обеспечивает на всем диапазоне измерений получение результатов с относительной погрешностью не более $\pm 0,1\%$, является ошибкой. В действительности текущее значение относительной погрешности $\gamma = \Delta_0/x$ растет обратно пропорционально x и изменяется по гиперболе (рис. 3.4). Относительная погрешность равна классу точности, указанному в виде приведенной погрешности γ_n , лишь на последней отметке шкалы ($x = X_k$), да и то если $X_N = X_k$. При $x = 0,1X_k$ она в 10 раз больше γ_n , а при дальнейшем уменьшении стремится к бесконечности. При уменьшении измеряемой величины x до значения Δ_0 относительная погрешность результата измерений достигает $\gamma = \Delta_0/x = \Delta_0/\Delta_0 = 1 = 100\%$.

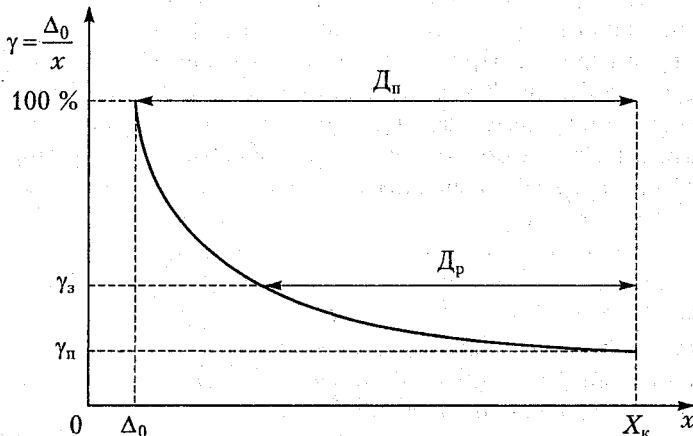


Рис. 3.4. Относительная погрешность при аддитивной полосе погрешностей

Полный диапазон $D_{\text{ц}}$ значений измеряемой величины для любого преобразователя ограничивается снизу порогом чувствительности, а сверху — пределом измерений. Поскольку в области малых значений x относительная погрешность измерений велика, то рабочий диапазон $D_{\text{р}}$ ограничивают снизу таким значением, при котором относительная погрешность не превосходит некоторого заранее заданного значения $\gamma_{\text{р}}$, равного, например, 4, 10, 20 %. Таким образом, рабочий диапазон может назначаться произвольно и составлять только некоторую часть полного диапазона средства измерений. Следует помнить, что для приборов с нормированной приведенной погрешностью предел абсолютной погрешности измерений остается постоянным на всем рабочем диапазоне $D_{\text{р}}$, даже тогда, когда предел относительной погрешности достигает очень больших значений.

Если предел допускаемой погрешности средства измерений выражается в форме приведенной или относительной погрешности, то его класс точности всегда указывается в процентах. Если прибор имеет чисто мультипликативную полосу погрешностей, обозначаемое на шкале прибора значение класса точности обводится кружком, например \odot (установлен предел допускаемой относительной погрешности ± 2 %).

Если полоса погрешностей принята аддитивной, то класс точности указывается без каких-либо дополнительных обозначений, например просто 1,5 (установлен предел допускаемой приведенной погрешности $\pm 1,5$ %).

При одновременном присутствии аддитивной и мультипликативной составляющих при назначении класса точности используются более сложные зависимости. Например, обозначение класса точности $\surd_{2,5}$ дается в виде дроби 0,02/0,01.

Это означает, что измеряемая величина не может отличаться от значения X , показанного прибором, больше чем на $\left[c + d \left(\left| \frac{X_{\text{к}}}{X} \right| - 1 \right) \right]$ %, где c и d — соответственно числитель и знаменатель в обозначении класса точности, а $X_{\text{к}}$ — предел измерений.

Еще одно обозначение класса точности применяется для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой, для которых установлен предел допускаемой приведенной погрешности. Нормирующее значение для таких приборов устанавливают равным длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае предел абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины, а на шкалу прибора наносится обозначение класса точности в виде цифры, под которой находится знак \surd . Например, обозначение класса точности $\surd_{2,5}$ означает, что для данного прибора установлен предел допускаемой приведенной погрешности, составляющий 2,5 % от длины шкалы, или действительное значение измеряемой величины должно находиться в пределах $\pm 2,5$ % от длины шкалы, отсчитанных от установившегося положения стрелки.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что класс точности является обобщенной характеристикой средств измерений данного типа. Значение его позволяет не определить погрешность конкретного измерения, а лишь указать пределы, в которых находится погрешность при измерении физической величины.

3.3. Методы измерений

При любом измерении происходит сравнение размера измеряемой величины с известной мерой. По способу применения меры различают методы непосредственной оценки и методы сравнения с мерой.

В *методах непосредственной оценки (методах отклонения* для электромеханических приборов) измеряемая величина предварительно преобразуется в промежуточную величину, которая затем сравнивается с мерой этой величины. Например, в электромеханических приборах сравнение измеряемой величины с мерой приводит к отклонению механизма сравнения, что используется для индикации значения измеренной величины. Измеряемая величина преобразуется во вращающий момент, который сравнивается с противодействующим моментом. В результате подвижная часть измерительного механизма поворачивается на определенный угол, соответствующий размеру измеряемой величины. Значение измеренной величины определяется по шкале, предварительно отградуированной с помощью образцовой меры этой величины.

С точки зрения получения результата измерения методы непосредственной оценки делятся на прямые и косвенные. *Прямые методы* характеризуются тем, что искомое значение физической величины определяют непосредственно в результате измерения, примером может служить измерение электрического сопротивления с помощью омметра. При *косвенных методах* искомое значение находят по известной зависимости между этой величиной и величинами, непосредственно измеряемыми. Так, электрическое сопротивление может быть рассчитано также по закону Ома, связывающему эту физическую величину с напряжением и током, значения которых могут быть измерены прямыми методами.

Методы отклонения имеют два существенных недостатка.

1. При возрастании отклонения увеличивается сила, действующая в механизме сравнения. При этом размер элементов механизма выбирается для условий максимального отклонения. В свою очередь, это приводит к увеличению погрешности измерения, особенно вблизи нижнего предела, и к нелинейности статической характеристики.
2. Энергия, необходимая для измерения, относительно велика и отбирается от исследуемого процесса, искажая размер измеряемой величины, то есть наблюдается воздействие средства измерений на измеряемую величину.

Для измерения электрических величин с высокой точностью и высокой чувствительностью в большой группе средств измерений реализуется *метод сравнения с мерой*, при котором сравниваются размер измеряемой величины и размер, воспроизводимый мерой. В подавляющем большинстве случаев отличительной чертой методов сравнения является непосредственное участие в процессе измерения меры величины известного размера, однородной с измеряемой. Измерение при этом заключается в установлении равенства или определенного соотношения между размерами измеряемой величины и меры. Однако в некоторых случаях может быть использована и мера, неоднородная с измеряемой величиной. Например, при измерении индуктивности с помощью моста переменного тока в качестве меры можно использовать емкость конденсатора. В этих случаях значение измеряемой величины определяется на основании известной математической

зависимости между измеряемой величиной и мерой, которая реализована в средстве измерений.

Все известные методы сравнения по характеру самой операции сравнения можно разделить на методы *одновременного* и *разновременного* сравнения.

При методах разновременного сравнения измерение проводится в два этапа, а результат определяется по двум измерениям: с участием измеряемой величины на первом этапе и меры — на втором. К разновременному сравнению относится *метод замещения*, при котором на вход прибора поочередно подключаются измеряемая величина и величина известного размера, воспроизводимого мерой, и по двум показаниям прибора определяется значение неизвестной величины.

К методам одновременного сравнения относятся методы совпадения, дифференциальный и нулевой (компенсационный).

При *методе совпадения* сравнивают размеры измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

При *дифференциальном методе* разность размеров измеряемой величины и величины известной, воспроизводимой мерой, измеряется с помощью измерительного прибора. Размер неизвестной величины определяется как сумма размера известной величины и измеренной разности.

При *нулевом методе* разность между размерами измеряемой и известной величин в процессе измерения сводится к нулю, что фиксируется высокочувствительным прибором — нуль-индикатором.

Высокая точность измерений методами сравнения достигается благодаря высокой точности мер, воспроизводящих размеры известной величины, и высокой чувствительности измерительных приборов.

В процессе измерения измерительная информация передается с помощью сигналов. В зависимости от характера связи между измеряемой величиной и сигналами измерительной информации различают аналоговые и цифровые методы измерений. При *аналоговом методе* любому значению измеряемой величины (в пределах диапазона измерений) соответствует определенное значение сигнала измерительной информации. Примерами применения этого метода могут служить электромеханические приборы (отсчетное устройство в виде шкалы со стрелкой) или регистрирующие самописцы с непрерывной формой записи.

Цифровой метод характеризуется тем, что результат измерения (числовое значение) формируется в измерительном устройстве. При этом вырабатываются дискретные сигналы измерительной информации, которые обрабатываются числовым способом. В качестве примеров применения этого метода приведем цифровые приборы (отсчетное устройство в виде цифрового табло), а также цифропечатающие устройства.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Так, точность отсчета обычно существенно выше при цифровом методе измерения. (При отсчете аналогового показания его точность зачастую зависит от способности оператора к интерполяции и ограничивается двумя-тремя десятичными разрядами.) С другой стороны, аналоговый вывод измеряемого значения имеет большую наглядность: например, наблюдать за стрелочным прибором существенно проще, чем за цифровыми показаниями.

Цифровая обработка измеряемого значения позволяет обеспечить значительно более высокую точность, чем на аналоговой технике. Однако при цифровом методе обработка сигнала происходит последовательно и дискретно во времени, тогда как аналоговая обработка осуществляется непрерывно и одновременно. Наконец, цифровой метод имеет специфическое преимущество при передаче измерительной информации на расстояние: подсчет импульсов или различение двух состояний сигнала (включено — выключено) возможны при достаточно высоком уровне шумов. В противоположность этому качество передачи аналогового сигнала в значительной степени зависит от шума и дрейфа электронных элементов и от помех, наводимых в линиях передачи.

В заключение приведем еще одну классификацию методов измерений с точки зрения непрерывности работы во времени элементов измерительного устройства. При *непрерывном методе* измерения все элементы измерительного устройства работают непрерывно во времени. *Дискретный метод* применяется в том случае, когда измерительная система содержит хотя бы один элемент, работающий прерывисто. Очевидно, что при дискретном методе происходит потеря определенной части измерительной информации.

ГЛАВА 4 **Обработка результатов измерений**

4.1. Статистическая обработка многократных показаний

Если эксперимент состоит в многократном измерении одной и той же величины постоянного размера, то результатом измерения является группа из n независимых показаний (измерений), составляющих массив экспериментальных данных. Главной особенностью измерительного эксперимента, проводимого с использованием статистической обработки полученных данных, является получение и использование большого объема апостериорной измерительной информации.

При статистической обработке многократных показаний решаются три основные задачи:

- оценивание области неопределенности исходных экспериментальных данных;
- нахождение более точного усредненного результата измерения;
- оценивание погрешности этого усредненного результата, то есть более узкой области неопределенности.

При практическом выполнении статистической обработки многократных показаний необходимо знание методов определения по экспериментальным данным числовых характеристик распределений случайной величины, рассмотренных в главе 2. Основным смыслом усреднения многократных показаний заключается в том, что найденная усредненная оценка координаты их центра имеет меньшую случайную погрешность, чем отдельные показания, по которым она находится. По формулам (2.17)–(2.19) вычисляются среднее арифметическое значение полученных показаний, СКП результатов единичных показаний, СКП среднего арифметического. По формуле (2.22) определяется половина доверительного интервала. При этом принципиальным является допущение, что показания подчиняются нормальному закону распределения вероятности. Справедливость этого допущения необходимо проверять.

Правдоподобно или нет допущение о том, что полученные показания подчиняются нормальному закону распределения вероятности, можно предварительно

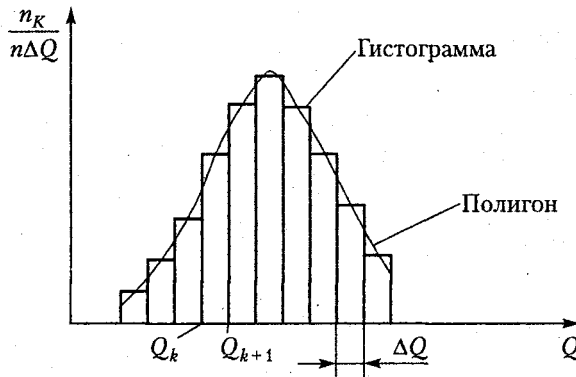


Рис. 4.1. Гистограмма

оценить по виду гистограммы, построенной на основании полученных экспериментальных данных (рис. 4.1).

Для отображения n полученных показаний СИ в виде гистограммы область численных значений между наименьшим и наибольшим показаниями $L = Q_{\max} - Q_{\min}$ делят на интервалы одинаковой ширины ΔQ и определяют число показаний n_K , попавших в каждый из полученных интервалов. Полученные результаты изображают графически, откладывая на оси абсцисс полученные максимальное и минимальное показания с обозначением границ интервалов между ними, а по оси ординат — величину $n_K/(n\Delta Q)$. Построив над каждым из интервалов прямоугольники, основанием которых является ширина интервалов, а высотой — $n_K/n\Delta Q$, получим гистограмму, дающую представление о плотности распределения вероятности полученных показаний в данном эксперименте. Относительную частоту попаданий n_K/n можно условно приравнять к вероятности попадания в конкретный интервал, а высоту прямоугольника считать равной эмпирической плотности вероятности $p_K = n_K/(n\Delta Q)$. Тогда площадь каждого прямоугольника равна вероятности попадания в интервал, а площадь всех прямоугольников будет равна единице, что соответствует условию нормировки (m — число интервалов):

$$\sum_{K=1}^m p_K \Delta Q = 1.$$

Полигон представляет собой ломаную кривую, соединяющую середины верхних оснований столбцов гистограммы. Полученная таким образом кусочно-линейная аппроксимация более наглядно, чем гистограмма, отражает форму искомой кривой распределения.

Проверить гипотезу о том, что распределение полученных в результате измерения показаний не противоречит теоретическому распределению, можно по ряду критериев. В качестве примера рассмотрим составной критерий, применяемый при числе независимых показаний $15 < n < 50$.

На первом этапе вычисляется

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

и проверяется выполнение условия $d_{\min} < d < d_{\max}$, где d_{\min} и d_{\max} зависят от вероятности P^* , числа показаний n и находятся по таблицам (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Значения d_{\min} и d_{\max} в зависимости от P^* и n

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

Если условие первого этапа соблюдается, то переходят ко второму этапу составного критерия. При $n < 20$ считается допустимым отклонение одного из независимых показаний Q_i от среднего арифметического более чем на $2,5S$, при $20 < n < 50$ — не более двух отклонений, превышающих $2,5S$, что соответствует доверительной вероятности $P^{**} \approx 0,98$. При соблюдении этого условия второго этапа гипотеза о соответствии нормальному закону распределения принимается с вероятностью $P \approx P^* + P^{**} - 1$.

При числе независимых показаний $n > 50$ применяются другие критерии, например критерий Пирсона. Если число показаний менее 15, то нельзя применить ни один критерий.

При многократном измерении одной и той же величины постоянного размера возможно появление отдельных показаний, которые заметно отличаются от остальных и могут являться промахом (грубой погрешностью) и должны быть исключены из полученных данных. Вопрос о том, содержит ли результат измерения грубую погрешность, решается путем применения определенных статистических критериев. Одним из таких критериев является «правило трех сигм». Согласно этому критерию, считается, что если при многократном измерении одной и той же величины постоянного размера сомнительное показание отличается от среднего арифметического значения более чем на $3S$ (то есть $|Q_i - \bar{Q}| > 3S$), где S — СКП измерений, то с вероятностью 0,997 оно является ошибочным и может быть исключено из полученного массива данных. Критерий надежен при $n > 20 \dots 50$.

При нормальном законе распределения вероятности результата измерения и сравнительно небольшом количестве экспериментальных данных ($n < 50$) среднее арифметическое подчиняется закону распределения Стьюдента со средним значением \bar{Q} . Особенностью этого распределения является то, что доверитель-

ный интервал с уменьшением числа показаний расширяется по сравнению с нормальным законом распределения при той же доверительной вероятности. Для оценки границ доверительного интервала используется коэффициент t_q (вместо коэффициента t), который зависит не только от выбранной доверительной вероятности, но и от числа показаний. Коэффициенты Стьюдента выбираются по таблицам, приведенным в справочниках по метрологии. Так, при числе показаний $n = 14$ и доверительной вероятности $P = 0,95$ коэффициент $t_q = 2,16$.

Полученные результаты многократных измерений должны быть исправлены путем введения поправок на все известные систематические эффекты, после чего определяются границы НСП. Суммарное НСП образуется из НСП метода, НСП поправок, НСП за счет несовершенства применяемых СИ и т. д. Все составляющие суммарной НСП рассматриваются как случайные величины, и при отсутствии данных о виде распределения отдельных составляющих принимается гипотеза о равномерном распределении. Границы НСП Θ вычисляются по формуле

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \quad (4.1)$$

где Θ_i^2 — граница i -й неисключенной составляющей систематической погрешности; k — коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при $P = 0,95$ $k = 1,1$); m — количество учитываемых составляющих.

После оценки границ НСП необходимо проанализировать соотношения между НСП и случайной погрешностью. Если $\Theta < 0,8S_Q$, где S_Q — СКП среднего арифметического, то НСП можно пренебречь и принять границы погрешности равными границам случайной погрешности. Если $\Theta > 8S_Q$, то можно пренебречь случайной погрешностью. Если оба неравенства не выполняются, СКП результата измерений вычисляют как сумму НСП и случайной составляющей погрешности:

$$S_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3} + S_Q^2}. \quad (4.2)$$

В целом, обработка результатов измерений с многократными показаниями производится в следующей последовательности:

1. Вводятся поправки для исключения всех известных систематических эффектов.
2. Вычисляется среднее арифметическое исправленных показаний, а также оценка СКП.
3. При необходимости применяются критерии для проверки гипотезы о том, что показания принадлежат нормальному распределению.
4. Проверяется наличие грубых погрешностей и промахов. Показания, содержащие грубые погрешности, исключают из массива данных и заново повторяются вычисления, указанные в п. 2.
5. При вычислении доверительного интервала (доверительных границ случайной погрешности) при недостаточном объеме экспериментальных данных применяется распределение Стьюдента.

6. Оцениваются границы НСП.
7. Вычисляется СКП результата измерений S_{Σ} .

При отсутствии данных о видах функции распределения составляющих погрешности результата измерений или при необходимости дальнейшей обработки экспериментальных данных результат измерения представляют в виде значений \bar{Q} , S_{Σ} , n , Θ .

4.2. Однократные измерения

Подавляющее большинство измерений являются однократными. В обычных условиях их точность вполне приемлема. Однократные измерения являются самыми массовыми и проводятся в тех случаях, когда многократные измерения невозможны (например, если при измерении происходит разрушение объекта измерения) или при получении измерительной информации требуется обеспечить высокую производительность и низкую стоимость.

Метрологический анализ однократных измерений позволяет выделить главные их особенности:

- ❑ Из множества возможных отсчетов (показаний) средства измерений получается и используется только одно.
- ❑ Представление о законе распределения результатов измерений формируется исключительно на основе априорной (известной до измерений) информации.
- ❑ Объект измерений, методика выполнения измерений должны быть предварительно изучены, возможные погрешности заранее оценены и уменьшены до необходимых пределов.

Порядок действий при однократном измерении (один из возможных вариантов) приведен на рис. 4.2

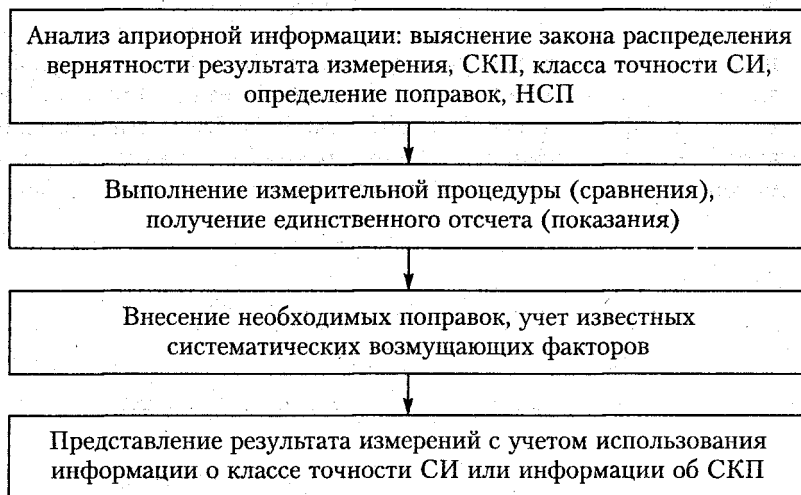


Рис. 4.2. Последовательность выполнения однократного измерения

Перед началом измерения анализируется априорная информация. В ходе анализа уясняется физическая сущность изучаемого объекта, (явления, процесса); уточняется его модель; определяются влияющие факторы, уточняются меры, направленные на уменьшение их влияния (термостатирование, экранирование, компенсация магнитных полей и т. п.); определяются значения поправок; принимается решение в пользу определенной методики измерения, выбирается СИ, изучаются его МХ. Изучается опыт выполнения подобных измерений в прошлом. Итогом выполненной на первом этапе работы должна стать твердая уверенность в том, что точности однократного измерения будет достаточно для решения поставленной измерительной задачи.

На втором этапе получают единственное показание СИ. Далее учитываются особенности выполнения измерения и в полученное показание вносится суммарная поправка. После исключения из отсчета всех известных систематических погрешностей можно полагать, что погрешность исправленного результата состоит из НСП и случайных составляющих погрешности. НСП переводят в категорию случайных и оценивают каждую составляющую собственными границами. При этом рекомендуется распределение вероятностей принимать равномерным, если заданы границы, и нормальным, если задано СКП.

Если НСП оценена границами, то доверительные границы суммарной НСП определяют по формуле (4.1).

В качестве априорной информации, учитывающей рассеяние показаний СИ, может использоваться информация о классе точности или об СКП. В обоих случаях значение измеряемой величины без учета поправок не должно отличаться от полученного показания СИ более чем на полуразмах при равномерном законе распределения вероятности или больше чем на половину доверительного интервала, если показания СИ подчиняются нормальному закону распределения вероятности.

Получив по отдельности оценки НСП и случайной погрешности результата однократного измерения, их сопоставляют. Если необходимо учитывать обе составляющие, суммирование выполняется по формуле (4.2).

Как и при измерениях с многократными наблюдениями, однократный отсчет показаний может содержать грубую погрешность. Во избежание грубой погрешности однократное измерение рекомендуется повторить 2–3 раза, приняв за результат среднее арифметическое. Статистической обработке эти показания СИ не подвергаются. Результат однократного измерения записывается в форме $Q \pm \Delta$.

Рассмотрим примеры использования информации о классе точности СИ.

Пример 4.1. Указатель отсчетного устройства вольтметра класса точности 0,5, шкала которого приведена на рис. 4.3, показывает 120 В. Представить результат однократного измерения (шкала равномерная).

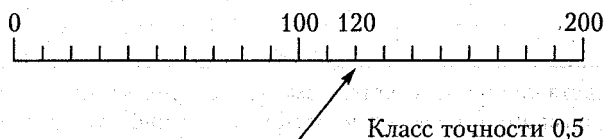


Рис. 4.3. Последовательность выполнения однократного измерения

Для указанного прибора нормирована приведенная погрешность. Предел измерений $U_K = 200$ В. Следовательно, учитывая, что класс точности выражается в процентах, находим:

$$\Delta = \frac{\text{класс точности} \cdot 200}{100} = \frac{0,5 \cdot 200}{100} = 1 \text{ В.}$$

Искомое напряжение $U = (120 \pm 1)$ В.

Пример 4.2. Указатель отсчетного устройства омметра класса точности ② с равномерной шкалой (рис. 4.4) показывает 100 Ом. Чему равно измеряемое сопротивление?

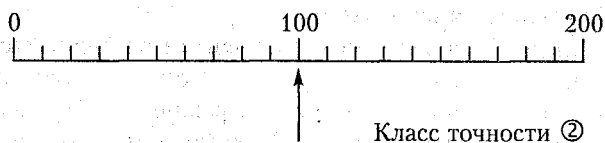


Рис. 4.4. Шкала омметра класса точности ②

При таком обозначении класса точности измеряемая величина не должна отличаться от значения, которое показывает указатель, более чем на 2 %:

$$\Delta = \frac{\text{класс точности} \cdot 100}{100} = \frac{2 \cdot 100}{100} = 2 \text{ Ом;}$$

$$R = (100 \pm 2) \text{ Ом.}$$

Пример 4.3. Указатель отсчетного устройства цифрового ампервольтметра класса точности 0,02/0,01 показывает 25 А. Чему равна измеряемая сила тока?

Для прибора с классом точности 0,02/0,01 при определении погрешности измерений используется формула $\left[c + d \left(\left| \frac{X_K}{X} \right| - 1 \right) \right]$, где c и d — соответственно числитель и знаменатель в обозначении класса точности; X_K — предел измерений; X — показание прибора. Тогда (учитывая, что относительная погрешность, определяемая через класс точности, выражается в процентах)

$$\Delta = \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{50 \text{ А}}{25 \text{ А}} - 1 \right) \right] \frac{25 \text{ А}}{100} = 0,0075 \text{ А;}$$

$$I = (25,0000 \pm 0,0075) \text{ А.}$$

Пример 4.4. Указатель отсчетного устройства омметра класса точности 2,5 с существенно неравномерной шкалой длиной 100 мм показывает 100 Ом. Чему равно измеряемое сопротивление?

При таком обозначении класса точности измеряемая величина не должна отличаться от значения, которое показывает указатель, более чем на 2,5 % от длины шкалы, в данном случае — более чем на 2,5 мм в обе стороны от указателя:

$$R = 100 \text{ Ом} \pm (2,5 \text{ мм шкалы, выраженные в единицах измеряемой величины}).$$

4.3. Косвенные, совокупные и совместные измерения

При косвенных измерениях значение величины находят расчетным путем на основе результатов измерения других величин, связанных с искомой величиной известной зависимостью

$$Q = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (4.3)$$

где Q — измеряемая величина, значение которой определяется вычислением на основании результатов измерения других величин; x_1, x_2, \dots, x_m — величины, значения которых определяются измерением.

Погрешность определения величины Q зависит от погрешностей, с которыми были определены значения величин x_1, x_2, \dots, x_m . Это положение справедливо как для случайных, так и для систематических погрешностей. При математических действиях над результатами измерений необходимо учитывать, что они являются случайными значениями измеряемых величин, поэтому обращение с результатами измерений как с неслучайными величинами недопустимо. Доля отдельных погрешностей Δx_i в результирующей погрешности ΔQ может быть различной в зависимости от вида функции (4.3) и соотношения между собой независимых переменных x_i .

Пусть $Q = x_1 + x_2$, причем $x_1 \gg x_2$, например $x_1 \approx 100x_2$. В этом случае погрешность 1 %, допущенная при измерении x_2 , внесет в результат Q относительную погрешность всего 0,01 %. Такая же погрешность 1 %, допущенная при измерении x_1 , практически полностью войдет в погрешность ΔQ . Если $Q = x_1 \sqrt[3]{x_2}$, то независимо от соотношения между собой x_1 и x_2 погрешность измерения Δx_1 полностью входит в погрешность Q , а погрешность Δx_2 — только 1/5 своей частью, и т. п.

Поскольку возможные функции $Q = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ и соотношения x_i могут быть самыми разнообразными, то для определения погрешности ΔQ используют общий прием, заключающийся в определении частных производных:

$$\frac{\partial Q}{\partial x_i} = \frac{\partial [f(x_1 \dots x_m)]}{\partial x_i}$$

Полученные таким образом значения $\partial Q / \partial x_i$ при данном сочетании $x_1 \dots x_m$ можно рассматривать как веса, с которыми в суммарную абсолютную погрешность ΔQ входят составляющие в виде абсолютных погрешностей измерения каждого из x_i . Отсюда составляющая абсолютной погрешности $\Delta_i Q$, возникающая от абсолютной погрешности Δx_i , будет $\Delta_i Q = (\partial Q / \partial x_i) \Delta x_i$. Аналогично этому, если известно СКП S_i для отдельных x_i , то СКП соответствующих составляющих результирующей абсолютной погрешности ΔQ будут $S_{i0} = (\partial Q / \partial x_i) S_i$.

В общем случае выражение для погрешности функции нескольких переменных, если погрешности x_i независимы и случайны, будет таким:

$$\Delta Q = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial Q}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

Особенностью метода частных производных для расчета результирующей погрешности результата косвенных измерений является то, что он правомерен только для абсолютных погрешностей. Относительные их значения нужно находить соответствующим пересчетом. Для простейших функций $Q = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ метод частных производных приводится к ряду простых соотношений, которые могут быть сформулированы в виде легко запоминающихся правил.

Так, для функции вида $Q = x_1 + x_2 + \dots + x_m$ все частные производные равны единице, и поэтому $\Delta Q = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Delta x_i)^2}$, то есть под корнем квадратным складываются абсолютные погрешности. Для функции вида $Q = x_1 x_2 \dots x_m$ не абсолютная, а относительная погрешность искомой величины довольно просто выражается через относительные погрешности аргументов. Если уравнение этой функции прологарифмировать, то получим:

$$\ln Q = \ln x_1 + \ln x_2 + \dots + \ln x_m$$

и после дифференцирования

$$dQ/Q = dx_1/x_1 + dx_2/x_2 + \dots + dx_m/x_m$$

Заменяя дифференциалы малыми конечными приращениями (чем погрешности, по существу, и являются) получим:

$$\delta Q = \delta x_1 + \delta x_2 + \dots + \delta x_i + \dots + \delta x_m,$$

где $\delta Q = \Delta Q/Q$, $\delta x_i = \Delta x_i/x_i$. С учетом сложения под корнем квадратным

$$\delta Q = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\delta x_i)^2}.$$

Рассмотренные простейшие правила определения погрешности результата косвенного измерения распространяются не только на сумму и произведение результатов измерений, но и на их разность и отношение. Если погрешности рассматриваются как случайные и не являются взаимно коррелированными, то получаемые при дифференцировании знаки производных не должны учитываться при суммировании составляющих. То же самое должно производиться и при расчете относительной погрешности не произведения, а частного.

Пример 4.5. Для функции $Q = x_1 + x_2 - x_3 - x_4$ частные производные $\partial Q/\partial x_1 = +1$, $\partial Q/\partial x_2 = +1$, $\partial Q/\partial x_3 = -1$, $\partial Q/\partial x_4 = -1$. Для результирующей СКП

$$S_Q = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}.$$

Для функции $Q = x_1 x_2 / x_3 x_4$ после логарифмирования

$$\ln Q = \ln x_1 + \ln x_2 - \ln x_3 - \ln x_4.$$

Для результирующей относительной погрешности

$$\delta Q = \sqrt{(\delta x_1)^2 + (\delta x_2)^2 + (\delta x_3)^2 + (\delta x_4)^2}.$$

Если функция имеет вид $Q = x_1 x_2^5$, то $\ln Q = \ln x_1 + 5 \ln x_2$, и для относительной погрешности

$$\delta Q = \sqrt{(\delta x_1)^2 + 5^2 (\delta x_2)^2}.$$

К совместным измерениям относятся проводимые одновременно измерения двух или нескольких неодновременных величин для нахождения зависимостей между ними. При проведении совместных измерений значения искоемых величин получают расчетным путем, решая систему уравнений, связывающих их с другими величинами, определяемыми посредством прямых или косвенных измерений. При этом измеряются несколько комбинаций значений указанных величин. Одним из наиболее общих способов отыскания оценок истинных значений величин, определяемых при совместных измерениях, является метод наименьших квадратов. Рассмотрим пример совместных измерений для определения линейной зависимости $y = A + Bx$.

Для определения зависимости $y = f(x)$ между переменными x и y необходимо, последовательно устанавливая и измеряя значения x , одновременно измерять величину y , получая координаты исследуемой зависимости (x, y) : Поскольку результаты измерения величин x и y содержат погрешности, то полученные координаты не будут принадлежать истинной зависимости. Исключив возможные систематические погрешности, можно уточнить координаты, но и уточненные координаты отклоняются от истинной зависимости из-за наличия случайных погрешностей и НСП. При выполнении совместных измерений возникает задача аппроксимации зависимости $y = f(x)$ по экспериментальным данным так, чтобы она наилучшим образом описывала истинную зависимость. При применении метода наименьших квадратов оценки параметров зависимости определяют из условия, что сумма квадратов отклонений расчетных значений аппроксимирующей функции от экспериментальных значений должна быть минимальной.

При обосновании метода наименьших квадратов в математической статистике предполагается, что результаты измерений (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, m$, удовлетворяют следующим условиям:

1. Значения аргументов x_i известны точно.
2. Систематические погрешности исключены, и результаты измерений y_i содержат только случайные погрешности, которые независимы и имеют одинаковые СКП.
3. Результат измерения подчиняется нормальному закону распределения вероятности.

Если две переменные y и x в зависимости $y = A + Bx$ известны с абсолютной точностью, то график зависимости представляет собой наклонную прямую линию, которая пересекает ось ординат в точке A (рис. 4.5, а).

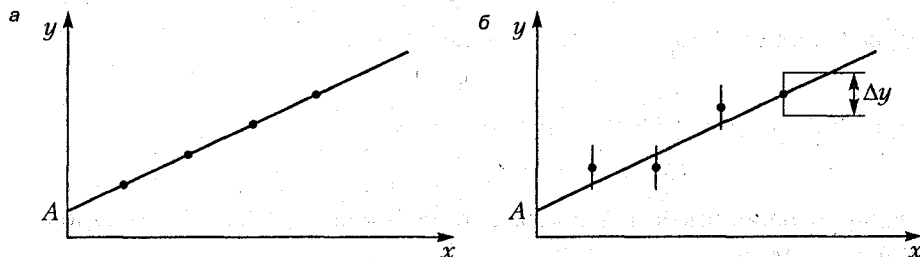


Рис. 4.5. Графики линейной зависимости

В действительности каждая экспериментальная точка попадает в поле прямоугольника со сторонами, соответствующими границам погрешности измерения (x_i, y_i) .

Если можно принять допущение, что значения аргументов x_i известны точно (вследствие малости погрешности измерений), экспериментальные точки будут иметь отклонения от идеальной прямой только в пределах погрешности измерения Δy_i (рис. 4.5, б).

В теории метода наименьших квадратов показано, что наилучшие оценки для неизвестных постоянных A и B — те, для которых минимально выражение

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{[y_i - (A + Bx_i)]^2}{S_y^2}, \quad (4.4)$$

где S_y — СКП измерения y .

Продифференцируем выражение (4.4) по A и B и приравняем эти производные к нулю, в результате получим систему уравнений для определения A и B . Опуская математические преобразования, приведем выражения для расчета оценок постоянных:

$$A = \frac{\left(\sum_{i=1}^m x_i^2\right)\left(\sum_{i=1}^m y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i\right)\left(\sum_{i=1}^m x_i y_i\right)}{G}; \quad (4.5)$$

$$B = \frac{m\left(\sum_{i=1}^m x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i\right)\left(\sum_{i=1}^m y_i\right)}{G}, \quad (4.6)$$

где

$$G = m\left(\sum_{i=1}^m x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i\right)^2. \quad (4.7)$$

Выражения (4.5) и (4.6) дают оценки постоянных A и B для прямой линии $y = A + Bx$, основанные на m точках, полученных в результате совместных измерений.

Получившаяся линия называется линией аппроксимации методом наименьших квадратов полученных m точек, или линией регрессии y от x .

Постоянные A и B вычислены с некоторой погрешностью, которая определяется на основании погрешностей измерения y_i .

Согласно третьему условию, рассмотренному ранее при обосновании метода наименьших квадратов, результаты измерения y_i подчиняются нормальному закону распределения вероятности с одинаковым СКП, которое может быть известно до начала измерения либо вычислено по результатам измерения:

$$S_y^2 = \frac{1}{m-2} \sum_{i=1}^m [y_i - (A + Bx_i)]^2.$$

Оценки для A и B — точно определенные функции измеренных значений y_i . Следовательно, погрешности A и B определяют простым расчетом погрешностей в косвенных измерениях, исходя из погрешностей y_i .

Тогда

$$S_A^2 = \frac{S_y^2 \sum_{i=1}^m x_i^2}{G}; \quad S_B^2 = \frac{m S_y^2}{G},$$

где G определяется согласно (4.7).

Задача аппроксимации результатов совместных измерений линейной зависимостью является частным случаем широкого класса задач по аппроксимации кривыми, многие из которых могут быть решены подобным образом. На основе метода наименьших квадратов решаются задачи аппроксимации зависимости, выражаемых:

- полиномами вида $y = A + Bx + Cx^2 + \dots + Hx^m$ (где A, B, C, \dots, H — постоянные);
- экспоненциальными функциями $y = Ae^{Bx}$.

Конкретные методы аппроксимации этих и других зависимостей рассматриваются в специальной литературе.

При выполнении совокупных измерений одновременно производятся измерения нескольких одноименных величин, при которых искомую величину определяют решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. Примером совокупных измерений является определение массы отдельных гирь набора (калибровка по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь). Допустим, что необходимо определить массу гирь с номинальными значениями 1, 2, 2*, 5, 10 и 20 кг (звездочкой отмечена гиря, имеющая то же самое номинальное значение). Определение массы гири производится по одной эталонной гире, например по гире массой 1 кг. Для этого выполняют серию измерений, каждый раз меняя комбинацию гирь (цифровые индексы обозначают массу отдельных гирь, индекс «1эт» обозначает массу эталонной гири):

$$m_1 = m_{1\text{эт}} + a;$$

$$m_1 + m_{1\text{гр}} = m_2 + b;$$

$$m_{2*} = m_2 + c;$$

$$m_1 + m_2 + m_{2*} = m_5 + d \text{ и т. д.,}$$

где a, b, c, d — массы гирек, которые приходится прибавлять к массе гири, указанной в правой части уравнения, или отнимать от нее. Решив эту систему уравнений, можно определить массу каждой гири. Оценка погрешности при определении массы каждой из гирь производится с использованием методов, применяемых при косвенных измерениях.

4.4. Оценка неопределенности в измерениях

Разделение погрешности измерений на случайную и систематическую и построенные на таком разделении методы ее описания к началу 80-х гг. прошлого века стали подвергаться определенной критике. Эти представления перестали удовлетворять требованиям, предъявляемым к решаемым в метрологии задачам.

Модели погрешностей, значения доверительных вероятностей и формирование доверительных интервалов в разных странах мира отличались друг от друга, что приводило к определенным трудностям при сопоставлении результатов измерений. Для устранения этих сложностей к началу 90-х гг. под эгидой семи международных организаций: Международного бюро мер и весов (МБМВ), Международной электротехнической комиссии (МЭК), Международной организации по стандартизации (ИСО), Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ), Международного союза по чистой и прикладной химии, Международного союза по чистой и прикладной физике и Международной федерации клинической химии был разработан документ, содержащий новую концепцию описания результатов измерений. Документ получил название «Руководство по выражению неопределенности измерения» («Guide to the expression of uncertainty in measurement»).

В последнее время усилился процесс интеграции России в международное сообщество, который требует гармонизации отечественных стандартов, в том числе в области метрологии и сертификации продукции, для устранения барьеров в торговом, промышленном и научном обмене и сотрудничестве. Поэтому, хотя действующие в России стандарты практически не используют понятия «неопределенность измерения» и ориентированы на традиционный и устоявшийся подход, основанный на терминах «погрешность» и «характеристики погрешности», предлагаемые в Руководстве подходы внедряются в отечественную метрологическую практику.

Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации принял РМГ 43–2001 «ГСИ. Применение Руководства по выражению неопределенности измерений», и была создана рабочая группа для координации работ по внедрению оценки неопределенности в метрологическую практику государств СНГ.

Целями Руководства являлись: обеспечение полной информации о том, как составлять отчеты о неопределенностях измерений; предоставление основы для международного сличения результатов измерений; предоставление универсального метода для выражения и оценивания неопределенности результата измерения, применимого ко всем видам измерений и всем типам данных, используемых при измерениях. Принципы этого Руководства предназначены для использования в широком спектре измерений, включая те, которые требуются:

- для поддержания контроля качества и обеспечения качества в процессе производства;
- для согласованности и усиления законов и регулирующих актов;
- для проведения фундаментальных и прикладных исследований и разработок в науке и технике;
- для проведения поверочных и калибровочных работ, выполнения измерений при проведении испытаний в масштабах всей национальной системы измерений, а также обеспечения единства измерений;
- для разработки, поддержания и сличения международных и национальных эталонов единиц физических величин, включая стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов.

При представлении результатов оценивания неопределенности измерения Руководство требует привести достаточное количество информации для обеспечения возможности повторения всего процесса оценивания, а именно:

- алгоритм получения результата измерения;
- алгоритм расчета всех поправок и их неопределенностей;
- оценки неопределенностей всех используемых данных и способы их получения;
- алгоритмы вычисления суммарной неопределенности и расширенной неопределенности.

Сходными в обоих подходах являются последовательности действий при оценивании характеристик погрешности и вычислении неопределенности измерения:

- анализ уравнения измерения;
- выявление всех источников погрешности (неопределенности) результата измерения и их количественное оценивание;
- введение поправок на систематические эффекты (погрешности), которые можно исключить.

Понятие «неопределенность измерения» вводят для описания качества результата измерения. В Руководстве неопределенность понимается в двух смыслах: в широком — как сомнение относительно достоверности результата измерения, и в узком — как количественная мера этого сомнения. Приведем определения, данные в рассматриваемом документе:

Неопределенность (измерения) — параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует рассеяние (разброс) значений, которые могут быть достаточно обоснованно приписаны измеряемой величине.

Для количественного выражения неопределенности измерения используется стандартная неопределенность.

Стандартная неопределенность (u) — неопределенность результата измерения, выраженная как стандартное отклонение.

Оценка неопределенности по типу А (u_A) — метод оценивания неопределенности путем статистического анализа рядов наблюдений.

Оценка неопределенности по типу В (u_B) — метод оценивания неопределенности иным способом, чем статистический анализ рядов наблюдений.

Поскольку в большинстве случаев измеряемая величина Q_n не является просто измеряемой, а зависит от других измеряемых величин Q_1, Q_2, \dots, Q_N через функциональную зависимость

$$Q_n = f(Q_1, Q_2, \dots, Q_N),$$

введено понятие суммарной стандартной неопределенности. Если величины Q_1, Q_2, \dots, Q_N независимы, суммарная стандартная неопределенность u_c представляет собой положительный квадратный корень из значения u_c^2 , полученного из формулы

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial Q_n}{\partial Q_i} \right)^2 u_i^2,$$

где каждая u_i^2 представляет собой стандартную неопределенность, оцененную по типу А или В.

Расширенная неопределенность (U) — величина, определяющая интервал, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли быть приписаны измеряемой величине.

Коэффициент охвата (k) — числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности:

$$U = k u_c,$$

тогда результат измерения выражается как $Q = q \pm U$. Такой интервал также может быть представлен как $q - U \leq Q \leq q + U$.

Значение коэффициента охвата выбирается на основании принятой доверительной вероятности, с которой формируется интервал $Q = q \pm U$. Обычно k принимается в диапазоне от 2 до 3.

Для оценки неопределенности по типу А используется формула, аналогичная (2.19):

$$u_A = s(Q) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n(n-1)}},$$

где Q_i — независимые повторные наблюдения; \bar{Q} — среднее арифметическое; n — число наблюдений. Оценку неопределенности по типу А иногда называют стандартным отклонением, или просто стандартной неопределенностью типа А.

При оценке неопределенности по типу В наиболее распространенный способ формализации неполного знания о значении величины базируется на постулировании равномерного закона распределения вероятности в пределах оцененных границ

$$u_B = \frac{b_2 - b_1}{2\sqrt{3}}, \text{ если } |b_1| = |b_2|, \quad u_B = \frac{b}{\sqrt{3}},$$

где b_1, b_2 — границы участка, на котором плотность распределения величины подчиняется равномерному закону.

Таким образом, методы оценивания характеристик погрешности и неопределенностей имеют общую базу в виде аппарата теории вероятностей и математической статистики. В Руководстве нет особых указаний относительно классификации неопределенностей в зависимости от их источников. Классификации подлежат лишь способы оценки неопределенностей (статистическая обработка серии наблюдений или другие, отличные от статистической обработки, способы). Оценка неопределенности проводится после введения поправок на все значимые систематические эффекты, то есть предполагается наличие исправленного результата измерений.

Концепция оценки неопределенности результата измерений не распространяется на вопросы, связанные с нормированием метрологических характеристик средств измерений.

Не предполагается, что Руководство заменит действующие национальные стандарты. Тем не менее при будущей разработке новых редакций нормативных

документов РФ рекомендации Руководства должны быть учтены. Изменения будут вводиться постепенно и в течение продолжительного времени. Возможно параллельное существование и использование действующих нормативных документов РФ и Руководства. Области, в которых использование Руководства обязательно, в настоящий момент являются измерения, проводимые в процессе международных сличений исходных национальных эталонов, и оказание калибровочных услуг зарубежным организациям.

4.5. Информационная теория измерений

Информационная теория измерений и измерительных устройств является относительно новым разделом современной метрологии. Развитие вероятностной теории информации применительно к процессам получения измерительной информации не противоречит классическим представлениям и методам оценки качества измерений, которые создавались еще Лапласом и Гауссом, а является их развитием.

Результат измерения дает количественную характеристику интересующей экспериментатора физической величины с некоторой неизбежной остаточной неопределенностью. Вместо исходной неопределенности, обусловленной природой измеряемой величины, получается заведомо меньшая неопределенность, зависящая от несовершенства измерительного эксперимента. Разность этих двух неопределенностей соответствует количеству измерительной информации.

Присущее материи объективное свойство отражения проявляется в образовании и получении определенных сведений о состоянии объектов материального мира. Эти сведения охватываются обобщенным понятием информации. В процессе отражения измерительная информация образуется при взаимодействии по крайней мере двух материальных систем: физического объекта, свойство которого оценивается количественно, и средства измерений. При взаимодействии этих систем между ними происходит обмен энергией с неизбежными потерями и искажениями, термодинамическая замкнутость системы неизбежно нарушается. От характера и условий этого взаимодействия зависят результат измерения и его вероятностные свойства.

Реальная измерительная информация получается в определенной конкретной форме сообщений: в виде чисел, в виде взаимного расположения указателей и шкал, диаграмм, кодированных сигналов и т. п.

Получив вещественное выражение, измерительная информация затем воспринимается, хранится или перерабатывается созданными природой или человеком материальными системами со степенью организации, достаточно высокой для выполнения этих функций.

Из исторического опыта установления интервала неопределенности результатов измерений следует, что этот интервал не имеет однозначного соотношения с оценкой СКО. Для коррекции этой неоднозначности при разных законах распределения принимают различные значения доверительной вероятности. При равномерном законе распределения погрешности интервал неопределенности принимают равным всей ширине распределения, полагая доверительную вероят-

ность $P_d = 1$. При нормальном законе распределения переходят к доверительной вероятности $P_d = 0,95$. Применение информационного подхода к описанию измерений позволяет находить интервал неопределенности строго математически для каждого закона распределения.

Поскольку факт получения информации всегда связан с уменьшением разнообразия или неопределенности, необходимо установить количественную меру неопределенности и информации.

Рассмотрим дискретный источник информации, то есть источник, который в каждый момент времени случайным образом может принять одно из конечного множества возможных состояний x_1, x_2, \dots, x_n с вероятностями $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)$, причем $\sum_{i=1}^N p(u_i) = 1$ или $\sum_{i=1}^N p_i = 1$.

Меру неопределенности выбора состояния источника можно рассматривать как меру количества информации, получаемой при полном устранении неопределенности относительно состояния источника.

Мера должна удовлетворять ряду естественных условий. Первым из них является необходимость монотонного возрастания с увеличением возможности выбора, то есть числа возможных состояний N . Второе условие — условие аддитивности, состоящее в следующем. Если два независимых источника с числом равновероятных состояний N и M рассматривать как один источник, одновременно реализующий пары состояний n_i и m_j , то естественно предположить, что неопределенность объединенного источника должна равняться сумме неопределенностей исходных источников. Общее число состояний объединенного источника NM , следовательно, искомая функция должна удовлетворять условию

$$f(NM) = f(N) + f(M). \quad (4.8)$$

Соотношение (4.8) выполняется, если в качестве меры неопределенности источника с равновероятными состояниями принять логарифм числа состояний:

$$H(U) = \log N. \quad (4.9)$$

Указанная мера была предложена американским ученым Р. Хартли в 1928 г. Она не получила широкого применения, поскольку была рассчитана на слишком грубую модель источника информации. При неравновероятных состояниях свобода выбора источника ограничивается, что приводит к уменьшению неопределенности. Если источник информации имеет два возможных состояния с вероятностями 0,99 и 0,01, то неопределенность выбора у него значительно меньше, чем у источника с двумя равновероятными состояниями. Американский ученый К. Шеннон предложил меру неопределенности, которую называют *энтропией дискретного источника информации (системы)*:

$$H(U) = -\sum_{i=1}^N p_i \log p_i. \quad (4.10)$$

Следовательно, энтропия дискретной случайной величины не зависит от того, какие именно значения принимает эта величина, и равна сумме произведений вероятностей на логарифмы этих вероятностей, взятых с обратным знаком, то есть важны количество значений и их вероятности.

Для источника информации с непрерывным множеством состояний неопределенность характеризуется значением энтропии

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log p(x) dx, \quad (4.11)$$

где $p(x)$ — плотность распределения вероятности случайной величины X . Энтропия обращается в нуль, когда одно из состояний источника (системы) достоверно (вероятность равна единице), а другие — невозможны (вероятности равны нулю).

На основании выражения (4.11) энтропия, например, равномерного распределения, когда $p(x) = 1/d = \text{const}$ в полосе шириной d , где $d = X_2 - X_1$, и равна нулю вне этой полосы, составляет:

$$H(X) = - \int_{X_1}^{X_2} \frac{1}{d} \ln \frac{1}{d} dx = \ln d.$$

Для случайной дискретной величины, которая имеет n равновероятных значений (вероятность каждого из них будет равна $p_i = 1/n$)

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x) \log p(x) = -n \frac{1}{n} \log \frac{1}{n} = \log n.$$

Единицы измерения энтропии зависят от выбора основания логарифма. При использовании десятичных логарифмов энтропия определяется в так называемых десятичных единицах (дит). В случае двоичных логарифмов энтропия выражается в двоичных единицах (бит). При математических вычислениях удобно использовать натуральные логарифмы, в этом случае в качестве единицы служит нат:

$$1 \text{ дит} = 2,3 \text{ нат} = 3,3 \text{ бит}; \quad 1 \text{ бит} = 0,69 \text{ нат} = 0,3 \text{ дит}.$$

Дезинформационное действие случайной погрешности, шума или помех при передаче сигнала определяется энтропией шума как случайной величины. Если шум в вероятностном смысле не зависит от передаваемого сигнала, то независимо от статистики сигнала шуму можно приписать определенную величину энтропии, которая и характеризует его дезинформационное действие. Количество передаваемой по каналу информации при наличии помех I равно энтропии передаваемого сигнала за вычетом энтропии шума, то есть равно убыли энтропии:

$$I = H(x) - H(\Delta), \quad (4.12)$$

где $H(x)$ — энтропия передаваемого сообщения, а в случае измерения — *исходная*, или *априорная*, энтропия измеряемой величины X , определяемая лишь ее законом распределения; $H(\Delta)$ — энтропия шума, а в случае измерения — энтропия случайной погрешности измерения, или *условная энтропия*.

Рассмотренные положения могут быть использованы при рассмотрении процесса измерений. Пусть в результате однократного измерения данного значения случайной измеряемой величины Q получено показание $Q_{||}$. Зная, что применяемое СИ обладает случайной погрешностью, мы не можем утверждать, что действительное значение измеряемой величины в точности равно $Q_{||}$. Можно лишь

утверждать, что оно лежит в полосе $Q_{II} \pm \Delta$. Таким образом, незнание точного значения измеряемой величины сохраняется и после получения показания Q_{II} , но теперь оно характеризуется не полной или исходной энтропией $H(Q)$, а лишь энтропией разброса действительного значения вокруг полученного отсчета Q_{II} , обозначаемой как $H(Q/Q_{II})$ и называемой условной энтропией.

В теории информации тот факт, что СИ имеет диапазон измерений от Q_1 до Q_2 , означает, что при его использовании могут быть получены показания Q_{II} только в пределах от Q_1 до Q_2 . Вероятность получения показаний, меньших Q_1 и больших Q_2 , равна нулю. Вероятность получения показаний в пределах от Q_1 до Q_2 равна единице. Если предположить, что плотность распределения вероятности значений измеряемой величины вдоль шкалы СИ одинакова, то с точки зрения теории информации, наше знание о значении измеряемой величины до измерения может быть представлено графиком распределения плотности вероятности $p(Q)$ вдоль шкалы значений, показанным на рис. 4.6.

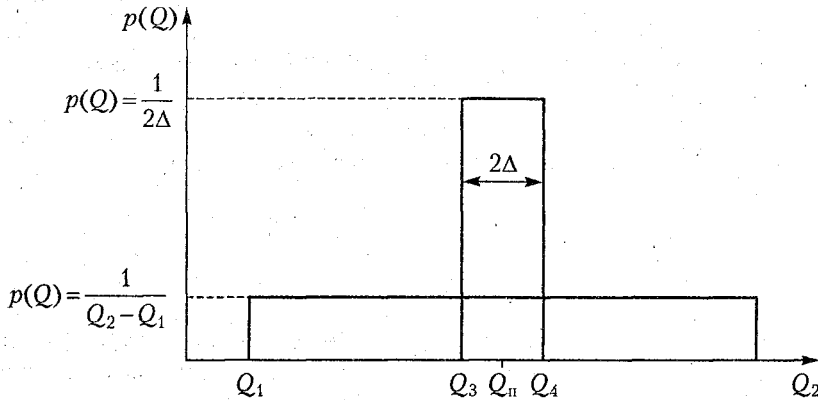


Рис. 4.6. График плотности распределения вероятности до и после измерения

Так как полная вероятность получить отсчет в пределах от Q_1 до Q_2 равна единице, то под кривой $p(Q)$ должна быть заключена площадь, равная единице (условие нормирования). При равномерном распределении плотности вероятности это приводит к выражению

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

После выполнения измерения значение измеряемой величины находится в пределах от Q_3 до Q_4 , $Q_4 - Q_3 = 2\Delta$. С точки зрения теории информации результат измерения состоит лишь в том, что до измерения область неопределенности простиралась от Q_1 до Q_2 и характеризовалась плотностью вероятности $p(Q) = 1/(Q_2 - Q_1)$, а после измерения она сократилась до величины 2Δ и характеризуется намного большей плотностью вероятности $p(Q) = 1/(2\Delta)$.

Получение информации об интересующей нас величине заключается, таким образом, в уменьшении неопределенности ее значения. Формальный прием для математической записи этого логического заключения состоит в определении

количества информации I как уменьшения энтропии от значения $H(Q)$, характеризующего неопределенность измеряемой величины перед измерением, до значения $H(Q/Q_n)$, которое остается после получения показания средства измерения Q_n , то есть, согласно выражению (4.12),

$$I = H(Q) - H(Q/Q_n).$$

В приведенном примере с равномерным законом распределения плотности вероятности исходная, или безусловная, энтропия как до, так и после измерения составляет:

$$\begin{aligned} H(Q) &= - \int_{-\infty}^{+\infty} p(Q) \log p(Q) dQ = \\ &= - \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{1}{Q_2 - Q_1} \log \frac{1}{Q_2 - Q_1} dQ = \log(Q_2 - Q_1). \end{aligned}$$

Оставшаяся после получения отсчета Q_n условная энтропия составляет

$$H(Q/Q_n) = - \int_{Q_3}^{Q_4} \frac{1}{2\Delta} \log \frac{1}{2\Delta} dQ = \log 2\Delta = \log(Q_4 - Q_3).$$

Полученное количество информации, равное разности исходной (безусловной) и оставшейся (условной) энтропии, определяется как

$$\begin{aligned} I &= H(Q) - H(Q/Q_n) = \log(Q_2 - Q_1) - \log 2\Delta = \\ &= \log \frac{Q_2 - Q_1}{2\Delta} = - \log \frac{2\Delta}{Q_2 - Q_1}. \end{aligned}$$

В замене операции деления Δ на $Q_2 - Q_1$, используемой в метрологии при определении относительной погрешности измерения, операцией вычитания исходной и оставшейся неопределенностей, характеризующих соответствующими значениями энтропии, и заключается основной прием анализа теории информации.

Если под измерением понимать лишь сравнение измеряемой величины с некоторым значением, принятым за единицу, то измерения по шкалам порядка, в которых еще нет постоянной единицы измерения, придется рассматривать как нечто «недостойное» называться измерением. В классической метрологии, оперирующей понятием погрешности измерения, так и поступили, назвав измерения по шкалам порядка *грубой оценкой*, или просто *оценкой*. В последнее время вместо термина «оценка» иногда применяется термин «мягкие измерения».

Однако в действительности эта оценка может быть не такой уж и грубой. Так, например, если нам в результате опыта стало известно, что измеряемая температура была такова, что серебряный образец уже расплавился, а золотой еще оставался твердым, следовательно, значение температуры находилось в интервале от 960,5 до 1063 °С. Используя СИ класса точности ⑤ и получив показание, равное 1010 °С, получим интервал неопределенности $2 \cdot (1010 \cdot 0,05) = 101$ °С, равный интервалу между реперными точками. Таким образом, информация, полученная в результате измерения по шкале порядка, ничем не хуже той, которая может быть получена при использовании других измерительных устройств соответствующего класса точности.

Основным недостатком шкал порядка является полное отсутствие уверенности в том, что интервалы между выбранными реперами являются равновеликими. Именно таково, например, положение со шкалой Бофорта, до середины прошлого века использовавшейся для определения силы ветра.

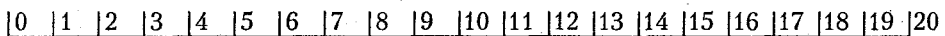
Получение любой информации, в том числе и измерительной, теория информации трактует как устранение некоторой части неопределенности, а количество информации в ней определяется как разность неопределенностей ситуаций до и после получения данного сообщения.

В случае измерения по шкале порядка весь диапазон возможных значений измеряемой величины разбивается реперными точками на ряд интервалов. Неопределенность до измерения характеризуется тем, что мы не знаем, в каком из интервалов лежит значение измеряемой величины, то есть область неопределенности до измерения простирается на все интервалы шкалы порядка (от «штиля» до «урагана» по шкале Бофорта или от «мягче талька» до «тверже алмаза» по минералогической шкале и т. д.). В результате измерения появляется указание на то, что измеряемая величина лежит в конкретном интервале, то есть область неопределенности сужается от полной длины натуральной шкалы до длины указанного интервала.

Таким образом, с точки зрения теории информации в процессе измерения конкретный интервал выбирается из целого ряда возможных интервалов. Если предположить, что вероятности попадания измеряемой величины в любой из интервалов равны между собой, то неопределенность исходной ситуации характеризуется безусловной энтропией, равной логарифму числа n интервалов, то есть $H(Q) = \log n$, а получаемая в результате измерения информация, соответствующая устранению этой неопределенности, равна $I = \log n$. Поэтому количество информации, получаемой в результате измерения по минералогической шкале твердости (при условии равной вероятности попадания в любой из интервалов), равно $I = \log 11 = 3,5$ бит = 1,04 дит. При измерении по шкале Бофорта количество информации равно $I = \log 13 = 3,7$ бит = 1,12 дит.

На основании изложенных исходных положений можно сделать следующий вывод: **в самом общем случае измерение представляет собой сравнение измеряемой величины с тем или иным образом построенной шкалой возможных значений этой величины, а в результате измерения осуществляется выбор одного интервала из всего множества интервалов этой шкалы.** Основная особенность измерения состоит в том, что точное значение измеряемой величины никогда не может быть определено, а может быть указан только более или менее узкий интервал возможных значений измеряемой величины.

Число различных ступеней m измеряемой величины зависит от класса точности средства измерений. Поясним сказанное на примере шкалы гипотетического измерительного прибора, изображенного на рис. 4.7.



Класс точности 5

Рис. 4.7. Шкала гипотетического измерительного прибора

Если стрелка остановилась на делении 9, то значение измеряемой величины может находиться в пределах от 8 до 10. Число m различных значений в данном случае составляет:

$$m = \frac{1}{2|\text{класс точности}|} = 10.$$

Таким образом, измерение сводится к выбору интервала. При этом (в данном случае) используется ситуационная модель, предполагающая, что в пределах полученного интервала существует равномерное распределение плотности вероятности.

Количество полученной информации $I = \log 10$.

ГЛАВА 5 Обеспечение единства измерений

5.1. Поверочные схемы

Единство измерений не может быть обеспечено без специальных мер, осуществляемых в рамках всего государства. В Российской Федерации существует система метрологического обеспечения имеющихся в стране средств измерений, то есть сеть государственных и негосударственных метрологических служб, деятельность которых направлена на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений. Эту сеть долгие годы возглавлял Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт России).

Достижение единства измерений и единообразия средств измерений обеспечивается прежде всего их первичной поверкой или калибровкой при выпуске из производства, а в период эксплуатации — периодической поверкой или калибровкой, в процессе которых определяется соответствие метрологических характеристик установленным в документации нормам. Для поверки или калибровки измерительной техники используются более точные средства измерений, которые передают размер единицы физической величины рабочим средствам измерений. Эти более точные средства измерений называют эталонами единиц величин.

Эталон единицы величины — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины (или кратных либо дольных значений единицы величины) с целью передачи ее размера другим средствам измерений данной величины.

Эталон единицы величины также периодически получает размер единицы (периодическая поверка) от более точного средства измерений — эталона более высокого разряда. А тот, в свою очередь, от еще более точного, и так до тех пор, пока «цепочка» передачи единицы не придет к средству измерений, имеющему высшую точность воспроизведения единицы в стране, — государственному эталону единицы величины.

Государственный эталон единицы величины — это эталон единицы величины, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории Российской Федерации.

Согласно закону РФ «Об обеспечении единства измерений», государственные эталоны единиц величин являются исключительной федеральной собственностью, подлежат утверждению Госстандартом России и находятся в его ведении.

Государственные эталоны единиц величин используются в качестве исходных для воспроизведения и хранения единиц величин с целью передачи их размеров всем средствам измерений данных величин на территории Российской Федерации. Поскольку число рабочих средств измерений по каждому из видов измерений может достигать сотен тысяч и даже миллионов экземпляров (вольтметры, амперметры, манометры, термометры и т. д.), государственный эталон не в состоянии обеспечить передачу размера воспроизводимой единицы даже небольшой части рабочих средств измерений. Единица физической величины передается от государственного эталона другим средствам измерений с помощью «многоэтажной» системы эталонов, называемой *поверочной схемой*.

Поверочная схема для средств измерений — нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений (с указанием методов и погрешности при передаче).

В общем виде поверочную схему можно представить в виде пирамиды, в основании которой находится вся совокупность рабочих средств измерений одной и той же физической величины, вершину занимает исходный эталон, а на промежуточных этажах расположены рабочие эталоны различных разрядов в соответствии с их точностью. Такая схема позволяет проследить последовательность передачи размера единицы и представить количественную сопоставимость эталонов различных разрядов и рабочих средств измерений.

Различают государственные и локальные поверочные схемы.

Государственная поверочная схема — поверочная схема, распространяющаяся на все средства измерений данной физической величины, имеющиеся в стране.

Локальная поверочная схема — поверочная схема, распространяющаяся на средства измерений данной физической величины, применяемые в регионе, отрасли, в ведомстве или на отдельном предприятии (в организации).

В период существования СССР поверочные схемы были обязательны для исполнения на всех уровнях распространения. Государственные поверочные схемы утверждались государственными стандартами (ГОСТами) и действовали на территории всей страны. Ведомственные поверочные схемы устанавливались отраслевыми стандартами (ОСТАми) и действовали в отрасли. На предприятиях действовали локальные поверочные схемы, вводимые стандартом предприятия (СТП). При этом поверочная схема более низкого ранга не должна была противоречить поверочной схеме, действующей в более широкой области.

Достоинством такой системы было рациональное использование парка образцовых приборов (образцовые приборы сейчас называют эталонами), использовавшихся для поверки других средств измерений. Недостаток жесткой системы соблюдения предписаний поверочной схемы — это необходимость иметь во всех центрах поверки большое количество образцовых средств измерений, так как нельзя было поверять рабочие средства измерений низкой точности с помощью образцовых средств измерений высокого разряда, предназначенных для поверки более точных приборов.

В настоящее время поверочные схемы носят рекомендательный характер, и часто локальные поверочные схемы на предприятиях вообще отсутствуют (при небольшом объеме проверок и калибровок).

Обобщенный вид государственной поверочной схемы приведен на рис. 5.1.



Рис. 5.1. Обобщенный вид государственной поверочной схемы

На чертеже конкретной поверочной схемы указывают:

- наименование физической величины, для передачи размера которой она предназначена;
- наименование средств измерений и методов поверки;
- номинальные значения или диапазоны значений физической величины, измеряемой или хранимой средствами измерений;
- допускаемые значения погрешностей средств измерений и методов поверки.

Названия эталонов и рабочих средств измерений, а также их основные метрологические характеристики заключают в прямоугольники (прямоугольник государственного эталона — двухконтурный). Нижнее поле отводится для рабочих средств измерений.

На каждой ступени поверочной схемы регламентируется порядок (метод) передачи размера единицы. Наименование методов поверки на схеме указывается в горизонтальных овалах, расположенных между прямоугольниками (на рис. 5.1 не показаны). В них же указывается допускаемая погрешность метода поверки.

Важным показателем достоверности передачи размера единицы физической величины является соотношение погрешностей средств измерений, используемых на вышестоящей и нижестоящей ступенях поверочной схемы. Вообще говоря, это соотношение должно быть довольно высоким, например 1 : 10. Но в большинстве случаев достичь такого соотношения погрешностей между поверяемым прибором и эталоном на всех ступенях поверочной схемы не удастся. Такое соотношение обычно реально достижимо при поверке (или калибровке) рабочих средств измерений низкой и средней точности. А чем более точные средства измерений подвергаются поверке, тем меньшим может оказаться это соотношение. Поэтому считается достаточным, если удастся получить соотношения погрешностей 1 : 5; 1 : 4; 1 : 3. Такое положение говорит о недостатке высокоточных эталонов для обеспечения растущих потребностей науки и промышленности в точных измерениях.

В отдельных случаях не удастся обеспечить и минимально допустимое соотношение 1 : 3. Достоверность передачи размера единицы физической величины в этом случае соответственно уменьшается.

На верхней ступени государственных поверочных схем единиц физических величин находятся государственные эталоны, которые могут быть двух видов: государственный первичный эталон и государственный специальный эталон.

Государственный первичный эталон — эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства, например государственные эталоны метра, килограмма, секунды, ампера, кельвина, канделы, вольта. Обычно первичными называют эталоны основных единиц системы СИ, а также некоторых производных единиц, имеющие высокую точность воспроизведения размера единицы. Так, наряду с государственным первичным эталоном ампера в качестве первичных утверждены эталоны вольта и ома.

Государственные специальные эталоны, возглавляющие государственные поверочные схемы, создаются для воспроизведения единицы в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы от первичных эталонов с требуемой точностью технически неосуществима (высокие и сверхвысокие частоты, энергии, давления, температуры, особые состояния вещества, крайние участки диапазона измерений и т. д.). Примерами таких эталонов являются государственные специальные эталоны единицы переменного напряжения в диапазонах частот, соответственно, 20 Гц — 30 МГц и 30 МГц — 3 ГГц, которые, в отличие от эталона вольта, воспроизводят единицу переменного напряжения в своем диапазоне частот, причем разными способами. Каждый из этих эталонов возглавляет отдельную государственную поверочную схему.

Следующее звено поверочной схемы занимают вторичные эталоны.

Вторичный эталон — эталон, получающий размер единицы непосредственно от государственного эталона данной единицы.

Вторичные эталоны создаются и утверждаются для обеспечения сохранности и меньшего износа государственного эталона в тех случаях, когда это необходимо для организации передачи размера единицы рабочим эталонам поверочной схемы. По метрологическому назначению вторичные эталоны бывают следующих видов:

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

Например, при международных сличениях государственного эталона с национальными эталонами зарубежных стран, представляющими собой сложный комплекс средств измерений и вспомогательного оборудования, или для периодической поверки громоздкого по размеру рабочего эталона, находящегося на большом расстоянии от государственного, используют компактный транспортируемый эталон сравнения, часто являющийся измерительным преобразователем, аналогичным имеющемуся в государственном эталоне или выполняющим такую же функцию.

- *Эталон-копия* — эталон, применяемый для передачи размера единицы следующим звеньям поверочной схемы — рабочим эталонам.

Эталон-копия создается в случае большого объема поверок для предохранения исходного эталона от преждевременного износа. Он не всегда может быть физической копией государственного и даже не всегда использует тот же принцип действия.

- *Эталон-свидетель* — эталон, применяемый для контроля сохранности государственного эталона и для замены его в случае порчи или утраты.

Эталон-свидетель применяется лишь тогда, когда государственный эталон является невозстановимым. В настоящее время лишь эталон килограмма имеет эталон-свидетель. Его основное назначение — обеспечивать возможность контроля неизменности основного эталона.

Вторичные эталоны, так же как и государственный эталон, для передачи размера единицы рабочим средствам измерений не применяют. Для этой цели используют рабочие эталоны.

Рабочий эталон — эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений.

Термин «рабочий эталон» заменил собой термин «образцовое средство измерений» (ОСИ). При необходимости рабочие эталоны подразделяются на разряды (0-й, 1-й, 2-й, ..., *n*-й), причем рабочие эталоны 0-го разряда, и только они, по старой терминологии (использовалась до 1993 г.) именовались просто рабочими эталонами и относились к категории вторичных эталонов.

При разделении рабочих эталонов на разряды передачу размера единицы осуществляют через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов, как это показано на рис. 5.1.

Локальные поверочные схемы, в отличие от государственных поверочных схем, разрабатываются метрологическими службами предприятий и организаций. Они, как правило, имеют всего 2–3 ступени передачи и возглавляются исходным для данного предприятия эталоном, который периодически поверяется в органах Государственной метрологической службы. Локальная поверочная схема может регламентировать передачу размера сразу нескольких единиц величин (например, тока, напряжения, мощности и т. д.), если при этом используется одно и то же исходное средство измерений (например, измерительная установка типа У358).

5.2. Закон РФ «Об обеспечении единства измерений». Государственный метрологический контроль и надзор

Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» принят в апреле 1993 г. Настоящий закон устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений в Российской Федерации, регулирует отношения государственных органов управления с юридическими и физическими лицами по вопросам изготовления, эксплуатации, ремонта, продажи и импорта средств измерений и направлен на защиту прав граждан и экономики РФ от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

Законом на законодательном уровне регламентирована деятельность как государственных органов, так и юридических и физических лиц в области обеспечения единства измерений. За нарушение положений закона предусмотрена уголовная, административная либо гражданско-правовая ответственность. До введения в действие закона вся деятельность в этой области определялась государственными стандартами (ГОСТами), которые принимаются Комитетом Российской Федерации по стандартизации, метрологии, и сертификации (Госстандарт России).

Этим законом установлены также некоторые новые для нашей страны понятия и определения, изменившие сложившуюся терминологию и внесшие в литературу по метрологии разночтения, касающиеся отдельных определений. Так, ушел из обращения термин «образцовые средства измерений», вместо которого введено единое понятие *эталон единицы величины*, изменилось содержание термина *калибровка средства измерений*. В развитие основных положений закона Госстандартом России принят ряд документов под общим названием Правила:

- ПР50.1... — Правила по стандартизации;
- ПР50.2... — Правила по метрологии;
- ПР50.3... — Правила по сертификации;
- ПР50.4... — Правила по аккредитации.

Среди основных нововведений закона прежде всего следует отметить понятие «государственный метрологический контроль и надзор» (ГМКиН). ГМКиН — это деятельность, осуществляемая органом Государственной метрологической службы в целях проверки соблюдения установленных метрологических правил и норм. Другими словами, ГМКиН — это контроль и надзор со стороны государства за состоянием единства измерений в стране в сферах его действия.

Под терминами «контроль» и «надзор» понимают следующие понятия.

Контроль — проверка соответствия контролируемого объекта установленным требованиям.

Надзор — наблюдение специально уполномоченных органов за выполнением соответствующих правил, норм, требований.

Сферы распространения ГМКиН приведены в ст. 13 закона. Они включают:

- здравоохранение, ветеринарию, охрану окружающей среды, обеспечение безопасности труда;

- торговые операции и взаимные расчеты между покупателем и продавцом, в том числе операции с применением игровых автоматов и устройств;
- государственные учетные операции;
- обеспечение обороны государства;
- геодезические и гидрометеорологические работы;
- банковские, налоговые, таможенные и почтовые операции;
- производство продукции, поставляемой по контрактам для государственных нужд в соответствии с законодательством РФ;
- испытания и контроль качества продукции в целях определения соответствия обязательным требованиям государственных стандартов РФ;
- обязательную сертификацию продукции и услуг;
- измерения, проводимые по поручению органов суда, прокуратуры, арбитражного суда, государственных органов управления РФ;
- регистрацию национальных и международных спортивных рекордов.

При этом нормативными актами субъектов Российской Федерации ГМКиН могут быть распространены и на другие сферы деятельности.

В сферах распространения ГМКиН применяют виды контроля и надзора, приведенные в ст. 12 закона.

Государственный метрологический контроль включает:

- утверждение типа средств измерений;
- поверку средств измерений, в том числе эталонов;
- лицензирование деятельности по изготовлению и ремонту средств измерений.

Государственный метрологический надзор осуществляется за:

- выпуском, состоянием и применением средств измерений;
- аттестованными методиками выполнения измерений;
- эталонами единиц величин;
- соблюдением метрологических правил и норм;
- количеством товара, отчуждаемым при совершении торговых операций;
- количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их расфасовке и продаже.

Государственный метрологический контроль и надзор осуществляют должностные лица Госстандарта России — государственные инспекторы по обеспечению единства измерений, которые имеют право беспрепятственно посещать объекты, где эксплуатируются, производятся, ремонтируются, продаются, содержатся или хранятся средства измерений, и проверять правильность применения метрологических правил и норм, установленных для сфер распространения ГМКиН.

В сферах распространения ГМКиН обязательны для выполнения следующие правила:

- средства измерений должны быть утвержденного типа;
- средства измерений должны быть поверены и иметь действующие свидетельства о поверке или поверительные клейма;

- методики выполнений измерений должны быть аттестованы в порядке, установленном Госстандартом России;
- деятельность по изготовлению и ремонту средств измерений может осуществляться лишь при наличии лицензии, выдаваемой в порядке, установленном Госстандартом России.

При выявлении нарушений государственный инспектор имеет право запрещать применение и изымать из эксплуатации средства измерений, запрещать выпуск из производства или ремонта, а также давать обязательные предписания и устанавливать сроки устранения нарушений метрологических правил и норм.

В соответствии с законом РФ «Об обеспечении единства измерений» в сферах распространения ГМКиН средства измерений подвергаются обязательным испытаниям с последующим утверждением типа средств измерений.

Решение об утверждении типа принимается Госстандартом России и удостоверяется сертификатом об утверждении типа средств измерений. Утвержденный тип средств измерений вносится в Государственный реестр средств измерений, который ведет Госстандарт России.

Порядок проведения испытаний и утверждения типа устанавливают правила по метрологии ПР50.2.009–94, согласно которым система испытаний и утверждения типа средств измерений включает:

- испытания средств измерений для целей утверждения типа;
- принятие решения об утверждении типа, его государственную регистрацию и выдачу сертификата об утверждении типа;
- испытание средств измерений на соответствие утвержденному типу;
- признание утверждения типа или результатов испытаний типа средств измерений, проведенных компетентными организациями зарубежных стран;
- информационное обслуживание потребителей измерительной техники, контрольных надзорных органов и органов государственного управления.

Испытания средств измерений для целей утверждения типа проводят государственные центры испытаний средств измерений (ГЦИ), в качестве которых Госстандартом России аккредитуются, как правило, государственные научные метрологические центры (ГНМЦ) в соответствии со своей областью специализации. Решением Госстандарта в качестве ГЦИ могут быть аккредитованы и другие специализированные организации, имеющие соответствующее оборудование и квалифицированный персонал.

Основной задачей испытаний является установление метрологических характеристик, влияющих на эксплуатацию прибора, и их соответствие технической документации на заявленное средство измерений. Испытания проводятся на нескольких образцах средства измерений по программе испытаний, утвержденной ГЦИ.

При положительных результатах испытаний Госстандарт принимает решение об утверждении типа испытанного средства измерений, на основании которого средство измерений вносится в Государственный реестр средств измерений. Организации, представившей прибор на испытания, выдается сертификат об утверждении типа, а на средство измерений или в технической документации на него

наносится знак утверждения типа в виде пятиугольника, внутри которого расположен символ Госстандарта России (рис. 5.2). Такой знак является основанием для возможности поверки средства измерений и его дальнейшего использования в сферах распространения ГМКиН.

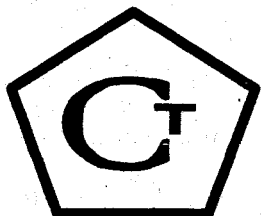


Рис. 5.2. Знак утверждения типа

Испытания на соответствие утвержденному типу проводят в следующих случаях:

- при наличии информации об ухудшении качества средств измерений;
- при внесении в их конструкцию изменений, влияющих на нормируемые метрологические характеристики;
- по истечении срока действия сертификата об утверждении типа;
- при постановке на производство средства измерений другим производителем.

Испытания на соответствие утвержденному типу проводят по той же программе, утвержденной ГЦИ, по которой проводились испытания для целей утверждения типа этого средства измерений, но проводят их органы Государственной метрологической службы по месту расположения изготовителей или пользователей (территориальные органы Госстандарта России).

Признание результатов испытаний для целей утверждения типа, проведенных зарубежной метрологической службой, допускается лишь в рамках заключенных Госстандартом России международных соглашений с органами национальных метрологических служб зарубежных стран. В таком случае Государственный центр испытаний средств измерений проверяет материалы испытаний и делает заключение о целесообразности или нецелесообразности признания результатов испытаний. При этом ГЦИ вносит предложения по признанию испытаний и первичной поверке и установлению межповерочного интервала.

Вся информация об утвержденных типах средств измерений, а также об исключении утвержденных типов из Государственного реестра и о запрещении или ограничении сферы их применения публикуется в периодических изданиях Госстандарта России и специальных информационных сборниках.

В соответствии с законом РФ «Об обеспечении единства измерений» введены следующие понятия:

- поверка средства измерений* — совокупность операций, выполняемых органами Государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным требованиям;
- калибровка средств измерений* — совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и/или пригодности к применению средства измерений, не подлежащего государственному метрологическому контролю и надзору.

Эти два близких по смыслу определения имеют существенные различия в областях применения поверенных и калиброванных средств измерений. В обоих случаях, как при поверке, так и при калибровке, определяются метрологические

характеристики средств измерений, причем часто по одной и той же методике, называемой методикой поверки, но на этом их сходство заканчивается. Различия между этими понятиями имеют более принципиальный характер.

Во-первых, в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора могут применяться только поверенные средства измерений, а калиброванные — не могут.

Во-вторых, поверке могут подвергаться только средства измерений утвержденного типа, то есть внесенные в Государственный реестр средств измерений, а калибровке — любые, в том числе нестандартизованные и изготовленные в одном экземпляре.

В-третьих, при поверке проверяется соответствие средства измерений своему типу, внесенному в Государственный реестр, тогда как при калибровке определяются действительные метрологические характеристики, которые прибор имеет на момент калибровки.

Если при поверке прибора обнаружено его несоответствие хотя бы одному пункту утвержденного типа, средство измерений должно быть забраковано. При калибровке этому средству измерений будут приписаны новые значения метрологических характеристик.

Положительные результаты поверки удостоверяются поверительным клеймом или свидетельством о поверке. Если средство измерений по результатам поверки признано непригодным к применению, оттиск поверительного клейма и свидетельство о поверке аннулируются и выписывается извещение о непригодности или делаются соответствующие записи в технической документации.

Результаты калибровки удостоверяются калибровочным знаком (клеймом), наносимым на средство измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

Поверка средств измерений регламентируется Правилами по метрологии ПР50.2.006–94 «Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения», в которых следует выделить следующие основные положения:

- Средства измерений, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору, подвергаются поверке органами Государственной метрологической службы или метрологическими службами юридических лиц, аккредитованными на право поверки Госстандартом России.
- Поверка средств измерения осуществляется физическим лицом — поверителем, аттестованным в установленном порядке в качестве поверителя.
- Поверка производится в соответствии с нормативными документами, утвержденными по результатам испытаний для целей утверждения типа средства измерений и называемыми методикой поверки.

Различают пять видов поверки: первичную, периодическую, внеочередную, инспекционную и экспертную.

Первичной поверке подлежат средства измерений утвержденных типов при выпуске из производства или ремонта, при ввозе из-за границы. Первичной поверке могут не подвергаться средства измерений, ввезенные из-за границы, если Госстандартом России заключены соглашение или договор о признании результатов поверки, произведенной в зарубежных странах.

Первичной поверке подлежит каждый экземпляр средств измерений. Допускается выборочная поверка.

Периодической поверке подлежат средства измерений, находящиеся в эксплуатации или на хранении, через определенные межповерочные интервалы, установленные при утверждении типа. Межповерочный интервал может быть изменен органом Государственной метрологической службы на основании результатов предыдущих периодических поверок.

Периодическую поверку должен проходить каждый экземпляр средств измерений. Результаты поверки действительны в течение межповерочного интервала.

Внеочередную поверку средства измерений производят при эксплуатации или хранении в следующих случаях:

- при повреждении знака поверительного клейма, а также в случае утраты свидетельства о поверке;
- при вводе в эксплуатацию после длительного хранения (более одного межповерочного интервала);
- при проведении повторной юстировки или настройки, известном или предполагаемом ударном воздействии на средство измерений или неудовлетворительной работе прибора;
- при продаже потребителю средства измерений, не реализованного по истечении половины его межповерочного интервала;
- при использовании средства измерений в качестве комплектующего по истечении срока, равного половине межповерочного интервала.

Инспекционную поверку производят для выявления пригодности к применению средства измерений при осуществлении государственного метрологического надзора. Инспекционную поверку допускается проводить не в полном объеме, предусмотренном методикой поверки.

Экспертную поверку производят при возникновении спорных вопросов по метрологическим характеристикам, исправности средств измерений и пригодности их к применению при наличии письменного заявления юридических и физических лиц или по письменному требованию (заявлению) суда, прокуратуры, милиции, государственного арбитража. В заявлении должны быть указаны предмет, цель экспертной поверки и причина, вызвавшая ее необходимость.

В соответствии с законом РФ «Об обеспечении единства измерений» те средства измерений, которые не подлежат обязательной поверке, могут калиброваться при выпуске из производства или ремонта, при ввозе из-за границы, при эксплуатации, продаже или прокате. Другими словами, средства измерений, область применения которых находится вне сфер государственного метрологического контроля и надзора и которые поэтому можно не поверять, могут быть подвергнуты другой форме подтверждения их метрологических характеристик — калибровке.

Таким образом, согласно закону, калибровка средств измерений является процедурой добровольной и осуществляемой по желанию владельца прибора с целью, например, получения достоверных результатов измерений, влияющих, в ко-

нечном счете, на результаты труда. ГМКиН на такие средства измерений не распространяется. Тем не менее предприятия и организации, заинтересованные в конкурентоспособности своих продукции или услуг, издают приказы и распоряжения по предприятию, в которых устанавливается обязательная калибровка средств измерений, используемых в технологических процессах, для исследований, для контроля параметров и внешних условий и т. п. Для этого на предприятии может быть создана собственная система калибровки или метрологическая служба предприятия аккредитуется на право калибровки в одной из существующих у нас в стране или за рубежом систем калибровки.

Наиболее известной в нашей стране является Российская система калибровки (РСК), созданная и возглавляемая Госстандартом России. Основные положения по организации, структуре, функциям РСК, права и обязанности входящих в нее юридических лиц независимо от форм собственности изложены в Правилах по метрологии ПР50.2.017–95 «Положение о российской системе калибровки». Правила распространяются на метрологические службы юридических лиц, аккредитованных в РСК, на аккредитующие органы и на другие организации, входящие в РСК. Российская система калибровки имеет свой знак в виде пятиугольника (рис. 5.3), который наносится на бланки, штампы РСК, а также на другие документы РСК. Калибровка средств измерений производится метрологическими службами с использованием эталонов, соподчиненных государственному эталону единиц величин. Эталоны, используемые для калибровки, подлежат государственному метрологическому контролю и надзору, так как используются в сферах его распространения.



Рис. 5.3. Знак российской системы калибровки

5.3. Метрологические службы предприятий, аккредитация на право проведения поверочных и калибровочных работ

В соответствии с законом РФ «Об обеспечении единства измерений» предприятия, организации, учреждения, являющиеся юридическими лицами, в необходимых случаях создают метрологические службы для выполнения работ по обеспечению единства измерений и для осуществления метрологического контроля и надзора (МКиН).

В данном случае под МКиН понимается деятельность, осуществляемая метрологической службой юридического лица в целях проверки соблюдения установленных метрологических правил и норм на предприятии, в организации или учреждении.

Если юридическое лицо занимается деятельностью в областях, упомянутых в ст. 13 закона РФ «Об обеспечении единства измерений» (там, где действует ГМКиН), создание метрологических служб является обязательным. В некоторых случаях, например при малочисленном штате сотрудников, функции метрологи-

ческой службы приказом по предприятию возлагаются на другое структурное подразделение: на службу эксплуатации и ремонта, испытательную лабораторию или службу технического контроля и т. д.

Метрологическая служба может не создаваться, если на предприятии не выполняются работы, относящиеся к видам деятельности, предусмотренным ст. 13 закона РФ «Об обеспечении единства измерений», но при этом ответственность за состояние метрологического обеспечения на предприятии несет его руководитель.

Права и обязанности метрологической службы юридического лица определяются документом под названием «Положение о метрологической службе», которое утверждается руководителем юридического лица.

МКиН осуществляется метрологической службой предприятия путем:

- поверки или калибровки средств измерений;
- надзора за состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами единиц величин, применяемыми для поверки или калибровки средств измерений, соблюдением нормативных документов по обеспечению единства измерений;
- выдачи обязательных предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или устранение нарушений метрологических правил и норм;
- проверки своевременности представления средств измерений на испытания в целях утверждения типа средств измерений, а также на поверку или калибровку.

При небольшом парке измерительных приборов, требующих обязательной поверки, метрологическая служба предприятия обеспечивает доставку средств измерений в органы Государственной метрологической службы или в другие аккредитованные на право поверки организации. Если же таких приборов много, по решению Госстандарта России метрологическая служба юридического лица независимо от форм собственности может быть аккредитована на право поверки средств измерений.

Требования к метрологическим службам и порядок их аккредитации на право поверки установлены в Правилах по метрологии ПР50.2.014–94 «ГСИ. Аккредитация метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений».

Процедура аккредитации состоит в том, что метрологическая служба подает заявку в Госстандарт России, к которой прилагаются «Паспорт метрологической службы», «Руководство по качеству», технико-экономическое обоснование целесообразности аккредитации метрологической службы на право поверки и заключение органа Государственной метрологической службы по месту расположения предприятия.

При поступлении заявки Госстандарт России проводит экспертизу документов и на ее основании поручает государственному научному метрологическому центру или органу Государственной метрологической службы формирование комиссии для проведения аккредитации.

В процессе аккредитации комиссия проверяет наличие у метрологической службы эталонных приборов и методик выполнения измерений, оборудованных

помещений и условий для поверки, квалификацию персонала. В процессе проверки могут быть проведены контрольные измерения значений единиц величин, воспроизводимых мерами.

При положительных результатах проверки комиссией составляется акт, который с проектом Аттестата аккредитации направляется в Госстандарт России для принятия решения об аккредитации. Аккредитованная метрологическая служба вносится в Реестр метрологических служб, аккредитованных на право поверки, и получает Аттестат аккредитации с приложением в виде документа под названием «Область аккредитации», в котором указываются наименования и типы средств измерений, подлежащих поверке данной метрологической службой, а также их основные метрологические характеристики.

Следует отметить, что на практике получить право поверки не так уж просто. Для этого надо иметь очень серьезное и убедительное технико-экономическое обоснование. Другое дело — калибровка средств измерений.

Согласно закону РФ «Об обеспечении единства измерений», калибровка средств измерений не является обязательной процедурой, и предприятие или организация сами имеют право решать — проводить калибровку или нет. Калибровка носит добровольный характер, но если юридическое лицо все-таки калибрует свои средства измерений, то эталоны для калибровки автоматически попадают в зависимость от государственных эталонов единиц величин (ст. 23), то есть должны быть поверены.

Метрологическая служба юридического лица может аккредитоваться на право проведения калибровочных работ в любой из имеющихся у нас в стране или за рубежом систем калибровки и выполнять калибровку средств измерений от имени этой системы калибровки. Это может потребоваться в том случае, если покупатель или заказчик продукции предприятия требует подтверждения того, что характеристики продукции измерялись приборами, калиброванными в аккредитованной метрологической службе. Это может потребоваться также при сертификации или подтверждении соответствия продукции предприятия, а также в рекламных целях.

Наиболее авторитетной в нашей стране и признаваемой за рубежом является созданная и возглавляемая Госстандартом России Российская система калибровки, аккредитация в рамках которой также происходит добровольно.

Аккредитация на право проведения калибровочных работ в РСК осуществляется в соответствии с ПР50:2.018-95 «ГСИ. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право проведения калибровочных работ» по такой же схеме, что и аккредитация на право поверки. Разница лишь в том, что аккредитацию проводит на основании заявки орган по аккредитации (ГНМЦ или орган Государственной метрологической службы). К заявке на аккредитацию прилагаются документы «Область аккредитации» и «Руководство по качеству». На основании положительных результатов аккредитации аккредитуемый орган выдает метрологической службе Аттестат об аккредитации на право проведения калибровочных работ и утвержденную «Область аккредитации». Аккредитованная метрологическая служба заносится в Реестр аккредитованных метрологических служб юридических лиц на право проведения калибровочных работ РСК.

5.4. Государственная метрологическая служба, другие государственные службы по метрологии и стандартизации РФ

В соответствии с законом РФ «Об обеспечении единства измерений» государственное управление деятельностью по обеспечению единства измерений в Российской Федерации осуществляет Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт России).

К компетенции Госстандарта России относятся:

- межрегиональная и межотраслевая координация деятельности по обеспечению единства измерений в стране;
- представление Правительству РФ предложений по единицам величин, допускаемым к применению;
- установление правил создания, утверждения, хранения и применения эталонов единиц величин;
- определение общих метрологических требований к средствам, методам и результатам измерений;
- осуществление государственного метрологического контроля и надзора (ГМКиН);
- осуществление контроля соблюдения условий международных договоров РФ о признании результатов испытаний и поверки средств измерений;
- руководство деятельностью Государственной метрологической службы и иных государственных служб обеспечения единства измерений;
- участие в деятельности международных организаций по вопросам обеспечения единства измерений.

В дополнение к перечисленным функциям Госстандарт России утверждает нормативные документы по обеспечению единства измерений, устанавливающие метрологические правила и нормы, имеющие обязательную силу на территории всей страны.

В ведении Госстандарта России находится Государственная метрологическая служба, которая включает в себя:

- государственные научные метрологические центры;
- органы Государственной метрологической службы на территории субъектов РФ.

Госстандарт России руководит Государственной службой времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), Государственной службой стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО) и Государственной службой стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ (ГСССД) и координирует их деятельность.

Государственные научные метрологические центры (ГНМЦ), которые одновременно являются научно-исследовательскими институтами Госстандарта России, несут ответственность за создание, совершенствование, хранение и приме-

нение государственных эталонов единиц величин, а также за разработку нормативных документов по обеспечению единства измерений. К функциям ГНМЦ относятся также создание и внедрение вторичных и рабочих эталонов; передача размера единиц величин от государственного вторичным эталонам и далее рабочим эталонам, хранящимся в органах Государственной метрологической службы; выполнение международных работ; руководство фундаментальными исследованиями в области метрологии; проведение испытаний средств измерений в областях и видах измерений, закрепленных за конкретным центром или институтом Госстандарта.

Старейшим метрологическим центром России является Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им Д. И. Менделеева (ВНИИМ), находящийся в Санкт-Петербурге и ведущий свою историю с момента создания в 1842 г. на территории Петропавловской крепости Депо образцовых мер и весов. В нем хранились основные меры и разрабатывались их копии для передачи в другие города, проводились сличения российских мер с иностранными. В 1893 г. на базе Депо образцовых мер и весов была утверждена Главная палата мер и весов, бессменным управляющим которой до последних дней жизни был Д. И. Менделеев. Она стала одним из первых в мире метрологическим научно-исследовательским центром.

В настоящее время во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева находится около половины из 118 государственных эталонов Российской Федерации. В институте ведутся работы в области обеспечения единства измерений длины, массы, угловых измерений, измерений электрических и магнитных величин, параметров ионизирующих излучений, измерений давления, температуры, физико-химических измерений, а также работы по квантовой метрологии и по уточнению фундаментальных физических констант. ВНИИМ является базой Метрологической академии, учрежденной в 1992 г.

В 1955 г. под Москвой в пос. Менделеево был образован второй метрологический центр страны — ныне это Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Институт был создан как центр обеспечения единства измерений времени и частоты. Поскольку в настоящее время единицы времени и частоты имеют наивысшую точность воспроизведения среди всех единиц физических величин, то работы ВНИИФТРИ имеют огромное значение для фундаментальной метрологии. Кроме того, институт разрабатывает эталоны и средства точных измерений в ряде других областей науки и техники: радиоэлектронике, акустике, атомной физике, физике низких температур и высоких давлений.

Третьим метрологическим центром России является Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС), г. Москва. ВНИИМС — головная организация в области прикладной и законодательной метрологии. На него возложены координация и научно-методическое руководство метрологической службой страны. Здесь распределяются обязанности между предприятиями Госстандарта России, проводится экспертиза нормативных документов, утверждаемых Госстандартом России, ведется Государственный реестр средств измерений. Наряду с координацией и выполнением распределяющих функций ВНИИМС ведет работы в областях обеспечения единства измере-

ний геометрических величин, давления, электрических величин, характеристик электромагнитной совместимости и др.

В России функционируют также два научно-исследовательских института, специализирующихся в основном в области измерений времени и частоты. Это Восточно-Сибирский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВС НИИФТРИ), г. Иркутск, и Научно-исследовательский институт физико-технических измерений (ВНИИФТИ), г. Хабаровск. Основная специализация этих институтов определяется масштабами нашей страны и необходимостью иметь региональные эталоны времени и частоты.

Для обеспечения единства измерений оптических величин в нашей стране создан ВНИИ оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), г. Москва. Метрология оптических величин приобрела особую актуальность и получила толчок для развития в связи с появлением в 60-х гг. прошлого века лазеров и с их широким внедрением в технику и практику метрологии. ВНИИОФИ занимается обеспечением единства измерений оптических величин, оптико-акустическими измерениями, измерениями в медицине, метрологией лазерного излучения.

Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ), г. Екатеринбург, является метрологическим центром по оснащению потребителей стандартными образцами. Здесь ведутся реестры стандартных образцов, создаваемых на территории РФ. Кроме того, в институте проводятся научно-исследовательские работы и хранятся эталоны в области электрических, магнитных и радиотехнических измерений.

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ), г. Новосибирск, хранит государственные эталоны и проводит работы в области измерений некоторых радиотехнических, электрических и магнитных величин.

ВНИИ расходомерии, г. Казань, хранит эталоны и проводит работы в области метрологического обеспечения расходомерии, значение которой постоянно возрастает в связи с переходом к рыночным отношениям и необходимостью производить взаимные расчеты между покупателем и продавцом.

Итак, государственные научные метрологические центры проводят научно-исследовательские работы по метрологии в соответствии со своей областью специализации и несут ответственность за создание, совершенствование, хранение и применение эталонов единиц величин, а также за разработку нормативных документов по обеспечению единства измерений. В отличие от них органы Государственной метрологической службы осуществляют государственный метрологический контроль и надзор (ГМКиН) на территориях субъектов Российской Федерации. Органы Государственной метрологической службы или территориальные органы Госстандарта России имеются в каждом субъекте РФ. В их функции входят контроль и надзор за правильностью применения средств измерений и метрологических правил и норм на предприятиях и в организациях любых форм собственности, расположенных на вверенной им территории.

Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по обеспечению единства измерений времени, частоты и определения параметров вращения Земли. ГСВЧ обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу размера единиц времени и частоты, шкал атомного, всемирного

времени, координированного времени, измеряет координаты полюсов Земли. Поскольку сейчас время определяется по продолжительности стабильных процессов в атомах, то ГСВЧ следит за соответствием временных интервалов, определенных с помощью атомных стандартов частоты, и интервалов, определенных как часть суток или как часть года при движении Земли вокруг собственной оси, вокруг Солнца и относительно «неподвижных» звезд.

В ведении ГСВЧ находятся такие известные процедуры, как передача сигналов точного времени и переход с «летнего» времени на «зимнее» и обратно.

Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО) осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по разработке и внедрению стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов в стране в целях обеспечения единства измерений на основе их применения. Эти образцы используются при измерениях химического состава, физических, физико-химических, эксплуатационных и других свойств веществ и материалов.

Стандартные образцы широко используются для градуировки, поверки и калибровки средств измерений, проверки правильности методов измерений, а также для контроля качества продукции методом непосредственного сличения. Они применяются для контроля качества сырья по химическому составу, механическим, теплофизическим, оптическим, электрическим, магнитным, радиоактивным и другим свойствам. Различают *стандартные образцы состава* и *стандартные образцы свойств*. Возможна одновременная аттестация стандартных образцов по свойствам и составу. Применяют стандартные образцы химически чистых веществ, сплавов, нефтепродуктов, медицинских препаратов, образцов почв, газов, газовых смесей. Аттестация стандартных образцов производится в авторитетных аналитических центрах. При аттестации в зависимости от назначения стандартному образцу присваивается класс точности или устанавливаются допускаемые погрешности. Каждый образец, положительно аттестованный в качестве стандартного образца состава или свойств веществ и материалов, регистрируется в Государственном реестре стандартных образцов, который ведется в УНИИМ и является составной частью Государственного реестра средств измерений.

Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД) осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по разработке и внедрению стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов в науке и технике в целях обеспечения единства измерений на основе их применения. ГСССД обеспечивает определение, сбор, анализ и публикацию данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

В современной науке и технике используется огромное количество разнообразных веществ и материалов, которые обладают различными свойствами, часто зависящими от внешних условий (давления, температуры, частоты, влажности и т. п.). ГСССД обеспечивает оперативное и исчерпывающее информирование работников науки и производства о свойствах и характеристиках веществ и материалов. Это могут быть сведения об уточненных значениях фундаментальных физических констант, физико-химических и спектральных свойствах веществ, атомных и молекулярных константах, свойствах новых стандартных образцов.

Стандартные справочные данные могут составляться по заказам промышленности — например, сведения о свойствах новых конструкционных материалов.

Новые данные публикуются в специальной литературе и периодически обновляются с появлением уточненных данных по константам, утвержденным международными организациями по метрологии и стандартизации.

5.5. Международные организации в области метрологии

Потребность в международном сотрудничестве в области обеспечения единства измерений возникла давно, вероятно, его начало относится к временам становления регулярной международной торговли. Первым практическим шагом в обеспечении международного единообразия мер было установление в конце XVIII в. во Франции метрической системы мер, которая, по мысли ее создателей, должна была служить на все времена и всем народам. Однако лишь почти через 100 лет метрическая система получила признание в качестве международной.

20 мая 1875 г. в Париже на специально созданной дипломатической конференции состоялось подписание Метрической конвенции, целью которой было обеспечение единства измерений длины и массы и дальнейшее совершенствование метрической системы мер. Конвенцию подписали полномочные представители правительств 17 государств, в том числе и России. К началу XXI в. к Метрической конвенции присоединились практически все крупные страны мира.

В соответствии с Метрической конвенцией в 1875 г. были созданы Международная организация по мерам и весам и действующее под ее эгидой научное учреждение — Международное бюро мер и весов (МБМВ), для которого в предместье Парижа, в Севре, правительство Франции предоставило павильон Бретейль.

МБМВ было первым международным научно-исследовательским учреждением, существующим при поддержке стран, подписавших Конвенцию, и ведущим исследования по совместно вырабатываемым программам в области метрологии. МБМВ хранит международные прототипы килограмма и метра, а также международные эталоны некоторых единиц величин в области электрических, световых, ионизирующих излучений и других видов измерений, а также проводит международные сличения с национальными эталонами стран Метрической конвенции.

Высшим международным органом по вопросам установления единиц, их определений и методов воспроизведения была определена Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ), которая выбирает Международный комитет мер и весов (МКМВ), руководящий работой всей организации в промежутках между Генеральными конференциями и созывается ежегодно. В состав МКМВ входят Консультативные комитеты по видам измерений, членами которых являются крупнейшие метрологические учреждения стран — членов Метрической конвенции и которые играют первостепенную роль в выборе и проведении сличений национальных эталонов.

На Генеральных конференциях, созываемых каждые четыре года, принимаются основополагающие решения в области метрологии. Так, на Генеральной

конференции в 1960 г. была утверждена Международная система единиц (СИ); в 1983 г. принято новое определение единицы длины — метра, выражающееся через скорость света; в 1990 г. введена современная Международная температурная шкала МТШ-90 (взамен Международной практической температурной шкалы МПТШ-68) и т. д. На конференциях принимаются решения, которые определяют направления наиболее важных для метрологии научных программ на последующие годы.

На рис. 5.4 приведена структурная схема Международной организации мер и весов.



Рис. 5.4. Структурная схема Международной организации мер и весов

В 1956 г. была создана Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), объединяющая 96 государств. Основной целью организации является гармонизация национальных метрологических требований стран, входящих в МОЗМ, направленная на устранение технических барьеров при реализации внешнеторговых, промышленных и научно-технических связей, оказание методической и технической помощи развивающимся странам, разработка системы

взаимного признания сертификатов МОЗМ на средства измерений. Высший орган МОЗМ — Международная конференция законодательной метрологии, созывается один раз в 4 года для рассмотрения отчетов о работе организации, проведения выборов президента и его заместителей, утверждения Международных рекомендаций (МР) и документов (МД), рассмотрения общих вопросов, связанных с долгосрочной политикой МОЗМ. В период между конференциями работой МОЗМ руководит Международный комитет законодательной метрологии. Исполнительным органом МОЗМ является Международное бюро законодательной метрологии.

Рабочими органами МОЗМ являются технические комитеты и подкомитеты, которые разрабатывают МР и МД по общим вопросам законодательной метрологии, требованиям и техническим характеристикам, методам испытаний и поверки средств измерений; подлежащим законодательному контролю (охрана окружающей среды, здравоохранение и т. д.). При этом МД МОЗМ служат руководствами для национальных метрологических служб по общим вопросам законодательной метрологии, включая основные законы, единицы величин, метрологический надзор. Технические комитеты и подкомитеты состоят из экспертов государств — членов МОЗМ и сотрудничающих международных и региональных органов.

В 1958 г. была создана Международная конференция по измерительной технике и приборостроению (ИМЕКО), в задачу которой входит проведение международных семинаров и конгрессов по проблемам развития измерительной техники и технологии приборостроения.

Создавались и действуют региональные международные метрологические организации. Так, западноевропейские государства образовали Европейскую организацию по метрологии (ЕВРОМЕТ), страны Центральной и Восточной Европы — КООМЕТ, в последнюю входят Беларусь, Болгария, Германия, Казахстан, Польша, Россия, Румыния, Словакия, Украина, Республика Куба. В рамках КООМЕТ принимаются соглашения о взаимном признании результатов испытаний, проведенных в странах-участницах. Действуют региональные организации по метрологии в Скандинавии, в Латинской Америке, Азиатско-Тихоокеанском регионе, в Африке и т. д.

В развитых странах мира действуют законы, регламентирующие метрологическую деятельность, вопросы обеспечения единства измерений, контроль и надзор за выполнением обязательных требований стандартов. В них определены государственные структуры и службы, ответственные за выполнение этих законов, а также установлены государственные метрологические институты и лаборатории — хранители исходных эталонов. В Великобритании это Национальная физическая лаборатория (NPL), в Германии — Физико-технический институт (PTB), в США — Национальный институт стандартов и технологий (NIST), который до середины 80-х гг. прошлого века был известен как Национальное бюро стандартов (NBS).

Все международные метрологические организации работают в тесном сотрудничестве с международными организациями по стандартизации, в том числе МЭК и ИСО, структура и функции которых рассмотрены в главе 17.

Часть II

Электроизмерительная техника

ГЛАВА 6 Меры электрических величин

Электроизмерительная техника представляет собой совокупность средств и методов электрических измерений для получения достоверной количественной информации о характеристиках веществ, материалов, изделий, технологических процессов и физических явлений. Средствами электрических измерений называются технические средства, используемые при электрических измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики.

6.1. Меры ЭДС на основе нормальных элементов

Термин *нормальный элемент* (НЭ) происходит от немецкого *Normal* — эталон, стандарт. Полное его наименование — кадмиевый насыщенный (или ненасыщенный) нормальный элемент Вестона — сегодня практически не употребляется.

Впервые кадмиевый нормальный элемент с кадмием в качестве отрицательного электрода и раствором серноокислого кадмия в качестве электролита приготовил и применил Эдвард Вестон в 1892 г. В 1908 г. международная конференция по электрическим единицам и эталонам рекомендовала его в качестве эталона международного вольта. Вскоре применение нормального элемента Вестона приобретает международный характер и официально признается правительственными актами различных государств. В таком виде с небольшими изменениями НЭ дошли до наших дней.

Длительное время, вплоть до 1980-х гг., нормальные элементы применялись в качестве исходных эталонов и являлись основой измерений постоянного напряжения и других электрических величин. С внедрением в метрологическую практику эталонов вольта на основе квантового эффекта Джозефсона в ряде стран мира, в том числе и в нашей стране, НЭ утратили роль первичного эталона, но благодаря своим достоинствам продолжают выполнять функции вторичных и рабочих эталонов, а также высокоточных рабочих средств измерений.

Нормальные элементы являются обратимыми гальваническими элементами, состоящими из ряда разнородных соприкасающихся веществ, которые на грани-

цах однородности вызывают обмен и образование ионов. Обмен ионами вызывает в гальваническом элементе появление электродвижущей силы (ЭДС). Гальванический элемент называют обратимым, если направление происходящих в нем процессов может быть изменено приложением бесконечно малой силы.

Устройство нормального элемента показано на рис. 6.1. НЭ состоит из запаянного стеклянного сосуда Н-образной формы, в нижние части ветвей которого впаяны платиновые проволочки. Положительным электродом является ртуть (1), поверх которой расположен слой пасты (2), состоящей из смеси сернокислой закиси ртути Hg_2SO_4 с кристаллами сернокислого кадмия CdSO_4 . Отрицательным электродом (3) является амальгама кадмия. В качестве электролита (4) использован насыщенный раствор сернокислого кадмия $\text{CdSO}_4 + 8/3\text{H}_2\text{O}$. Для поддержания насыщения раствора в обоих электродах поверх них помещены кристаллы сернокислого кадмия (5). В состав НЭ могут также входить добавки, улучшающие некоторые его свойства.

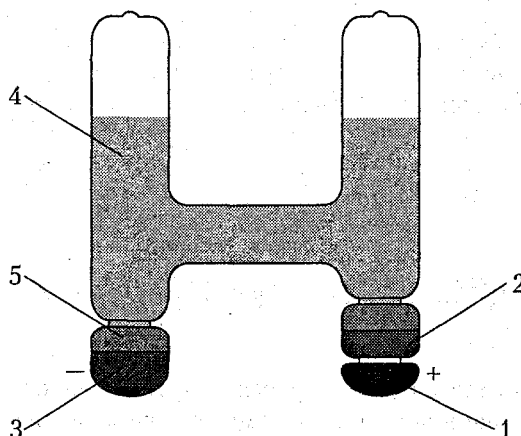


Рис. 6.1. Устройство нормального элемента

Кристаллы сернокислого кадмия обладают свойством слегка спаиваться между собой и образовывать корку, предохраняющую ртуть, пасту и амальгаму кадмия от перемещения при случайных наклонах и встряхиваниях сосуда.

Сосуд нормального элемента заключается в футляр с хорошо изолированными зажимами, к которым внутри футляра подсоединяются проводники от электродов.

НЭ такого устройства при тщательном изготовлении с применением химически чистых веществ имеет ЭДС около 1,0186 В, остающуюся с высокой точностью почти неизменной в течение десятков лет.

Если электролит в виде раствора сернокислого кадмия находится в ненасыщенном состоянии, то такой нормальный элемент называется ненасыщенным. Ненасыщенные НЭ обладают несколько худшими характеристиками стабильности значения ЭДС и меньшими сроками службы по сравнению с насыщенными.

На нормальные элементы распространяется межгосударственный стандарт ГОСТ 1954–82 «Меры электродвижущей силы. Элементы нормальные. Общие

технические условия», согласно которому изготавливают меры ЭДС на основе нормальных элементов классов точности от 0,02 до 0,0002.

Нормальные элементы обладают высокой долговременной стабильностью значения ЭДС, характеризующейся отклонением не более 2 мкВ/год у НЭ класса точности 0,0002, а у лучших экземпляров — менее 1 мкВ/год, что определяет их применение в качестве вторичных и рабочих эталонов высоких разрядов. В верхних звеньях поверочной схемы для единицы ЭДС и постоянного напряжения — вольта — в качестве мер ЭДС на основе насыщенных НЭ используют групповые меры, состоящие из 4–10 нормальных элементов, помещенных в один термостат. Среднее значение ЭДС такой меры имеет еще более стабильное значение, чем у одиночного НЭ.

Наряду с достоинством НЭ имеют ряд существенных недостатков, ограничивающих их более широкое применение. К их числу относятся:

- высокое значение температурного коэффициента ЭДС, составляющего от 40 до 55 мкВ/°С в диапазоне температур от 20 до 30 °С у насыщенных НЭ и 5 мкВ/°С — у ненасыщенных. По этой причине НЭ высоких классов точности помещают в термостат с хорошо известным и стабильным значением температуры;
- высокое значение внутреннего сопротивления, находящееся в диапазоне от 300 до 1000 Ом и определяющее малые значения допустимых для меры ЭДС токов нагрузки (не более $2,10^{-8}$ – $2,10^{-10}$ А в зависимости от класса точности). По этой причине изоляция меры ЭДС должна иметь значение сопротивления не хуже $1,10^9$ – $1,10^{11}$ Ом, и поэтому меру ЭДС на практике используют только при дифференциальном или компенсационном методе измерений. И именно по этой причине меры на основе нормальных элементов называют мерами ЭДС (то есть работающими практически при отсутствии тока нагрузки);
- НЭ «не любят» тряски, их нельзя переворачивать или наклонять. Поэтому их используют в стационарных условиях без частых перемещений, а после транспортировки, например, в поверку, их до начала эксплуатации следует выдерживать в стационарных условиях длительный промежуток времени (до 10 суток);
- НЭ содержат ртуть, поэтому их производство относится к категории вредных, и это накладывает ряд ограничений на их использование — так, например, в самолет с перевозимыми НЭ сопровождающего не пропустят.

Несмотря на столь внушительный перечень недостатков, меры ЭДС на основе нормальных элементов находят применение при самых ответственных измерениях в качестве опорного источника электродвижущей силы в компараторах, измерительных мостах, для передачи размера единицы ЭДС элементам других поверочных схем (переменного напряжения, переменного тока и т. д.).

6.2. Меры напряжения на основе кремниевых стабилитронов

Твердотельные элементы — кремниевые стабилитроны — применяют в качестве источников опорного напряжения (ИОН) относительно недавно (по сравне-

нию с мерами ЭДС на основе нормальных элементов). Их широкое применение стало возможным по причине бурного развития полупроводниковой техники в 50–60-е гг. прошлого века.

Первоначально полупроводниковые стабилитроны, пришедшие на смену газонаполненным стабилитронам тлеющего разряда, использовали в стабилизаторах напряжения питания, в системах регулирования, устройствах защиты от перегрузок, в ограничителях и т. д. С появлением прецизионных стабилитронов малой мощности, имеющих в некотором диапазоне токов нагрузки более стабильное и воспроизводимое значение напряжения, стало возможно применять их для решения задач метрологии.

В наше время уже трудно представить себе измерительную технику без опорных элементов в виде полупроводниковых стабилитронов. ИОН является неотъемлемой частью цифровых приборов, компараторов, компенсаторов, калибраторов напряжения и тока. Изготавливают источники опорного напряжения — меры напряжения — и как самостоятельное средство измерений.

Мерой напряжения источники на стабилитронах называют потому, что, в отличие от мер ЭДС на основе нормальных элементов, стабилитроны в режиме стабилизации находятся в некотором диапазоне рабочих токов от I_{\min} до I_{\max} , соответственно мера на стабилитроне допускает некоторое значение тока нагрузки (в диапазоне миллиамперов).

Полупроводниковые стабилитроны представляют собой особую группу полупроводниковых диодов, рабочая точка которых (в отличие от обычных диодов) в нормальном режиме лежит на участке вольт-амперной характеристики, соответствующем состоянию пробоя p - n -перехода (рис. 6.2). В этом режиме напряжение на стабилитроне сохраняется примерно постоянным при изменении протекающего тока. Это напряжение называют напряжением пробоя, или напряжением стабилизации.

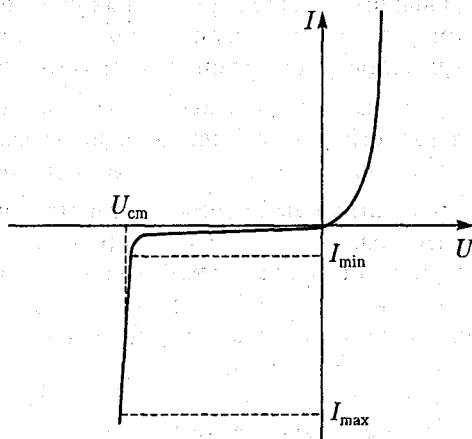


Рис. 6.2. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона

Механизм пробоя можно представить себе следующим образом. Если к p - n -переходу приложить обратное напряжение, то под действием электрического поля

произойдет расширение области, обедненной свободными носителями заряда — электронами и дырками. Имеющиеся в этой области свободные носители заряда перемещаются под действием электрического поля и образуют обратный ток перехода. Пока обратное смещение невелико, этот ток остается практически постоянным при изменении напряжения. При возрастании обратного напряжения до некоторого значения наблюдается резкое увеличение обратного тока. При этом свободные носители заряда, образующие обратный ток перехода, ускоряются электрическим полем настолько, что приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральных атомов полупроводника. В результате появляются новые носители заряда (электроны и дырки), которые также ускоряются и при столкновении с атомами вызывают их ионизацию, и т. д.

Увеличение количества носителей заряда происходит также под действием сильного электрического поля, воздействующего на кристаллическую решетку полупроводника. Под влиянием такого поля разрываются связи, удерживающие валентные электроны в атоме, и образуются новые электронно-дырочные пары, приводящие к возрастанию тока через переход.

Таким образом развивается процесс лавинообразного увеличения обратного тока полупроводника, то есть *пробой p - n -перехода*. Несмотря на лавинный характер, процесс остается управляемым: незначительное изменение напряжения на переходе вызывает существенное изменение тока через переход. В связи с тем что необходимая для этого напряженность электрического поля постоянна для данного материала, напряжение пробоя (или стабилизации) возрастает с увеличением ширины p - n -перехода:

$$U_{cr} = E_{np}d,$$

где U_{cr} — напряжение пробоя p - n -перехода, или напряжение стабилизации; E_{np} — напряженность электрического поля, при которой происходит лавинообразное умножение носителей заряда; d — ширина перехода.

Таким образом, изменяя ширину перехода, можно получить нужное напряжение пробоя. Выпускаются стабилитроны с напряжением стабилизации от единиц до сотен вольт, но в метрологической практике используют, как правило, стабилитроны с рабочим напряжением 6–10 В. Исключения могут встречаться в некоторых видах измерений. Так, например, при измерениях высоких постоянных и импульсных напряжений в качестве ИОН могут быть применены стабилитроны с большим значением напряжения.

Рассмотренный механизм пробоя наблюдается как у кремниевых, так и у германиевых p - n -переходов. Однако в процессе пробоя германиевых переходов выделяется значительное количество тепла, приводящее к появлению дополнительных пар носителей заряда. Эти носители маскируют картину лавинного пробоя и ухудшают вольт-амперную характеристику полупроводникового прибора. В кремниевых же p - n -переходах явление тепловой генерации свободных носителей заряда проявляется заметно слабее. Поэтому в качестве материала для полупроводниковых стабилитронов используется кремний.

Тем не менее изменение температуры окружающей среды и повышение температуры кремниевого стабилитрона под действием протекающего через него рабочего тока влияет на значение напряжения стабилизации. Нестабильность напря-

жения стабилизации при изменении температуры перехода уменьшают путем термостабилизации (помещают стабилитрон в термостат) или температурной компенсации (включают в цепь основного стабилитрона дополнительные элементы).

По принципу действия все меры напряжения — источники опорного напряжения — можно разделить на *параметрические* и *компенсационные*. В параметрических ИОН выходное напряжение меры снимается непосредственно с регулирующего элемента — кремниевых стабилитрона. В компенсационных ИОН выходное напряжение обычно отличается от напряжения кремниевых стабилитрона (используется масштабное преобразование), но сравнивается с ним для получения требуемого значения. Компенсационные ИОН позволяют получить значения выходного напряжения меры, отличающиеся от напряжения стабилизации стабилитрона при больших значениях допустимых рабочих токов, однако параметрические ИОН более просты и надежны в эксплуатации. Часто меры напряжения имеют схемы как параметрического ИОН, так и компенсационного и, соответственно, разные значения выходных напряжений меры.

Принцип действия параметрического стабилизатора можно пояснить на простейшей электрической схеме (рис. 6.3). Он представляет собой делитель напряжения, состоящий из балластного резистора R и кремниевых стабилитрона D , параллельно которому включается сопротивление нагрузки $R_{н}$. Такой параметрический стабилизатор обеспечивает постоянство нерегулируемого выходного напряжения меры в некотором диапазоне изменений напряжения питания $U_{п}$ и тока нагрузки $I_{н}$. С помощью балластного резистора R устанавливается рабочий режим кремниевых стабилитрона. Влияние изменений температуры окружающей среды и p - n -перехода стабилитрона уменьшается путем термостабилизации.

Схема компенсационного стабилизатора напряжения отличается от схемы параметрического наличием системы автоматического регулирования, в которой выполняются сравнение выходного напряжения меры и напряжения стабилитрона, а также автоматическая компенсация изменений выходного напряжения.

Меры напряжения на кремниевых стабилитронах имеют ряд преимуществ по сравнению с мерами ЭДС на основе насыщенных нормальных элементов. Ими являются лучшие нагрузочные характеристики (токи нагрузки до 1–10 мА), меньшее значение выходного сопротивления меры (0,01–20 Ом в зависимости от принципа действия ИОН), меньшее время готовности к измерениям (0,5–2 ч), существенно меньшая чувствительность к транспортной тряске. Меры напряжения, воспроизводящие значение 1,018 В (имитирующие значение ЭДС нормального элемента), могут иметь выходное сопротивление, близкое к значению внутреннего сопротивления НЭ.

Но по характеристике долговременной стабильности значения воспроизводимого напряжения меры на стабилитронах уступают мерам ЭДС на основе насыщенных нормальных элементов. По этой причине для мер напряжения на крем-

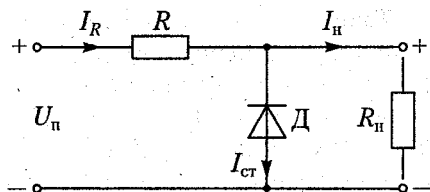


Рис. 6.3. Электрическая схема простейшего параметрического стабилизатора напряжения

ниевых стабилитронах устанавливают меньшие промежутки времени после сличения с более точным средством измерений, в течение которых их напряжение будет соответствовать указанному значению с некоторой погрешностью (кратковременная стабильность). Обычно это 10 дней, 1, 3, 6 или 12 месяцев, причем для одной и той же меры может быть установлено сразу несколько интервалов с различными значениями нестабильности выходного напряжения.

Так, например, мера напряжения Н4–9, предназначенная для передачи размера единицы напряжения постоянного тока от вторичных эталонов к рабочим эталонам и средствам измерений на местах их эксплуатации и являющаяся компенсационным ИОН, воспроизводит два значения напряжения: 1,018 и 10,0 В. Нестабильность выходного напряжения меры за время после сличения с более точным эталоном составляет:

- на выходе 1,018 В при выходном сопротивлении 1000 Ом: 0,0002 % — за 30 суток; 0,0003 % — за 90 суток; 0,0005 % — за 12 месяцев;
- на выходе 10,0 В при выходном сопротивлении 0,1 Ом: 0,0001 % — за 30 суток; 0,0002 % — за 90 суток; 0,0004 % — за 12 месяцев.

Эта и подобные ей меры благодаря высокой кратковременной стабильности могут использоваться в качестве транспортируемого эталона при сличении эталонов различных уровней, в том числе эталонов разных стран, и для передачи размера единицы постоянного напряжения средствам измерений, транспортировка которых в удаленный метрологический центр по конструктивным особенностям затруднена или невозможна.

6.3. Калибраторы напряжения и силы тока

Калибраторами называют средства измерений, воспроизводящие калиброванные (нормированные) значения выходного сигнала (в данном случае — электрического напряжения и силы тока). В том, что выходной сигнал нормирован, то есть имеет установленные границы отклонений от заданного значения, заключается основное отличие калибраторов от обычных источников напряжения и силы тока. Калибраторы применяют для поверки или калибровки средств измерений: вольтметров, амперметров, ваттметров, счетчиков электроэнергии и т. п. — методом прямых измерений, а также могут быть использованы для различного рода исследований.

В отличие от мер напряжения и ЭДС, воспроизводящих одно или несколько значений физической величины, калибраторы представляют собой многозначные меры, воспроизводящие физическую величину, как правило, в широком диапазоне значений и с высокой дискретностью установки заданного значения. Принцип действия калибратора может быть пояснен на примере простейшей структурной схемы (рис. 6.4).

В основе любого калибратора напряжения или силы тока лежит мера постоянного напряжения на стабилитроне (ИОН), размер напряжения которой преобразуется в определенный размер другой физической величины: переменное напряжение, постоянный или переменный ток — с помощью соответствующих измерительных преобразователей (калибраторам постоянного напряжения такое

преобразование не требуется). Далее этот размер подвергается масштабному преобразованию цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) с целью получения выходной величины заданного размера, усиливается по мощности (УМ) и поступает на выход прибора.

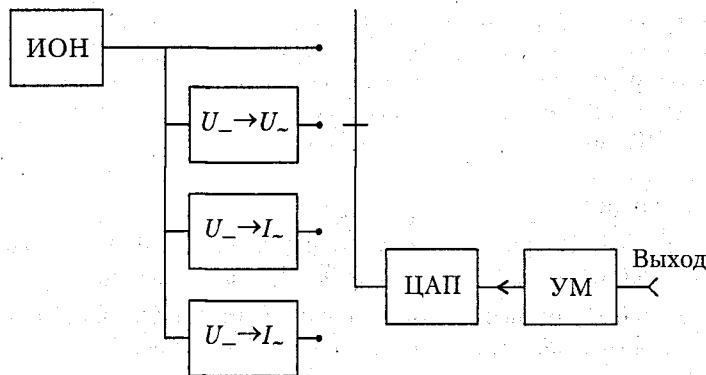


Рис. 6.4. Простейшая структурная схема калибратора напряжений и токов

К числу метрологических характеристик калибраторов относятся:

- ❑ диапазон воспроизводимых значений физической величины;
- ❑ дискретность установки;
- ❑ предел допускаемой погрешности установленного значения;
- ❑ диапазон частот, воспроизводимых переменных напряжений и токов;
- ❑ допустимый уровень пульсаций постоянного напряжения и тока или допустимый уровень искажений формы кривой переменного напряжения и тока;
- ❑ допустимая мощность нагрузки калибратора, выраженная в вольт-амперах, в ваттах или в омах, либо выходное сопротивление калибратора.

В качестве примера современного калибратора можно привести универсальный калибратор Н4-7, предназначенный для поверки, калибровки и исследований приборов и устройств как в составе автоматизированных установок, так и автономно. Калибратор Н4-7 воспроизводит:

- ❑ напряжение постоянного тока в диапазоне 0,1 мкВ — 200 В (с блоком усилителя напряжения — до 1000 В) с пределом допускаемой основной погрешности (0,001–0,002) % за 90 дней после калибровки;
- ❑ напряжение переменного тока синусоидальной формы в диапазоне 0,1 мкВ — 20 В при частотах 0,1 Гц — 1 МГц; до 100 В при частотах 0,1 Гц — 100 кГц; до 500 В при частотах 0,1 Гц — 20 кГц; до 700 В при частотах 0,1 — 10 кГц (диапазон 140–700 В воспроизводится с усилителем напряжения) с пределом допускаемой основной погрешности (0,005–0,25) % за 1 год и в зависимости от поддиапазона и частоты;
- ❑ силу постоянного тока до 2 А (с блоком усиления силы тока — до 30 А) с пределом допускаемой основной погрешности (0,004–0,03) % за 1 год;

- силу переменного тока синусоидальной формы до 2 А при частотах 0,1 Гц — 10 кГц, а в комплекте с усилителем силы тока — до 20 А при частотах 0,1–5 кГц с пределом допускаемой основной погрешности (0,03–0,5) % за 1 год и в зависимости от поддиапазона и частоты;
- сопротивление постоянному току в диапазоне 10 Ом — 10 МОм с пределом допускаемой основной погрешности (0,002–0,02) % за 1 год.

Следует отметить, что помимо калибраторов напряжения и силы тока в практике электрических измерений используют калибраторы и других физических величин: импульсных напряжений, угла сдвига фаз и т. д.

6.4. Меры сопротивления, емкости, индуктивности

При выполнении электрических измерений существенную роль выполняют такие элементы, как резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и взаимной индуктивности, входящие в состав измерительной цепи. Параметры этих элементов должны соответствовать заданным значениям, быть неизменными во времени и независимыми (в установленных пределах) от воздействия возмущающих факторов. В тех случаях, когда при выполнении измерений необходимо знать значение единицы физической величины с высокой точностью, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и взаимной индуктивности выполняют ся как меры, представляющие собой самостоятельные средства измерений.

Значение меры, полученное при поверке или калибровке, называется *действительным значением меры*. Указанное на мере значение величины, для воспроизведения которого разрабатывалась и изготавливалась мера и которому с допустимыми отклонениями должно быть равно действительное значение, является *номинальным значением меры*. Различают однозначные меры, имеющие одно номинальное значение, и многозначные меры, имеющие ряд номинальных значений. Несколько однозначных или многозначных мер, не объединенных конструктивно в единое изделие, но используемых совместно для решения конкретных метрологических задач, образуют *наборы мер*.

К мерам сопротивления, емкости и индуктивности предъявляются общие требования. Важнейшими из них являются стабильность параметров меры во времени и высокая точность подгонки действительного значения меры к номинальному. Меры должны иметь минимальное значение остаточных (паразитных) параметров, то есть минимальные индуктивность и емкость для мер электрического сопротивления, минимальные активное сопротивление и межвитковую емкость для мер индуктивности и т. д. Из других требований следует упомянуть малую зависимость значения меры от условий эксплуатации, возможность учета этого влияния; малую термоЭДС материала меры в паре с медью; удобство применения; техническую, конструктивную совместимость с другими средствами измерений. Кроме этих требований к мерам предъявляются иные специфические требования, зависящие от вида меры, условий применения, рода тока и т. п.

В области электрических измерений применяются однозначные меры электрического сопротивления (ОМЭС) и многозначные меры электрического сопро-

тивления (ММЭС), предназначение для работы в цепях постоянного и переменного тока. В качестве ОМЭС для работы в цепях постоянного тока широкое распространение получили измерительные катушки электрического сопротивления, изготовленные из манганиновой проволоки или ленты. Манганин — сплав Cu (84 %), Ni (4 %) и Mn (12 %). Он обладает малым температурным коэффициентом сопротивления ($\alpha < 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), большим удельным сопротивлением ($0,45 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$), малой термоЭДС при контакте с медью (менее 3 мкВ/К).

ОМЭС, выполненные на базе катушек электрического сопротивления, имеют резистивный элемент в виде каркаса с обмоткой из манганиновой проволоки. Каркас крепится к корпусу, который снабжен четырьмя зажимами. Два зажима являются токовыми и предназначены для включения ОМЭС в цепь тока, два других называются потенциальными и предназначены для измерения падения напряжения на резистивном элементе (рис. 6.5).

Точки *a* и *b* являются точками разветвления, которые посредством соединительных проводников соединены с токовыми (I_1 , I_2) и потенциальными (U_1 , U_2) зажимами. Для таких ОМЭС действительное и номинальное значения сопротивления определяется по отношению к точкам *a* и *b*.

Ток нагрузки, пропускаемый через ОМЭС, не может превышать некоторый установленный предел в целях ограничения разогрева резистивного элемента. Допустимую нагрузку принято характеризовать значениями номинальной и максимальной мощности. Зная значение номинальной мощности и номинальное значение сопротивления ОМЭС, можно определить допустимую силу электрического тока, пропускаемого через ОМЭС при ее поверке или калибровке. При отклонении значения мощности от номинального до любого, не превышающего максимального, допускается появление дополнительной погрешности, которая не должна превышать значение, численно равное классу точности.

Действительное значение сопротивления ОМЭС R_t (в омах) при изменении температуры окружающей среды в пределах рабочих температур определяется по формуле

$$R_t = R_{t_0}[1 + \alpha(t - t_0) + \beta(t - t_0)^2], \quad (6.1)$$

где R_{t_0} — действительное значение сопротивления ОМЭС при температуре поверки (калибровки), Ом; t_0 — температура, при которой выполнялась поверка (калибровка), °С; α и β — коэффициенты, определяемые для каждой ОМЭС экспериментально.

Помимо активного сопротивления ОМЭС имеют остаточные индуктивность и емкость, влияющие на результат измерения. Особенно сильным это влияние оказывается при использовании ОМЭС в цепях переменного тока. При повышенных частотах эти реактивные параметры могут привести к значительным погрешностям. В первом приближении эквивалентную схему ОМЭС можно представить как это показано на рис. 6.6.

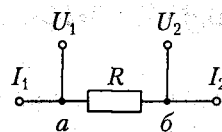


Рис. 6.5. Схема соединения токовых и потенциальных зажимов ОМЭС

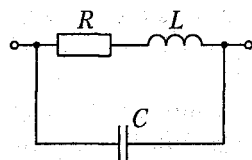


Рис. 6.6. Эквивалентная схема ОМЭС

Степень безреактивности ОМЭС принято характеризовать постоянной времени

$$\tau = (L/R) - CR,$$

где L и C — соответственно остаточная индуктивность и шунтирующая емкость как сосредоточенные параметры; R — сопротивление постоянному току. Чем меньше постоянная времени, тем лучше ОМЭС. Для уменьшения постоянной времени применяют специальные виды намотки. Индуктивность уменьшается, когда намотка бифилярная. При бифилярной намотке проводник складывается вдвое, обе стороны получившейся петли плотно прижимаются друг к другу, и такой сдвоенный провод наматывается на каркас. В результате токи, проходящие по двум соседним проводникам, направлены встречно и их суммарное магнитное поле значительно уменьшается. С другой стороны, бифилярная обмотка, состоящая из большого числа витков, обладает значительной собственной распределенной емкостью. Для уменьшения емкости бифилярной обмотки ее разделяют на ряд секций. Благодаря последовательному соединению емкостей отдельных секций общая емкость обмотки снижается.

Наборы различных резистивных элементов, смонтированных в одном корпусе, образуют магазины сопротивлений, выполняющие роль ММЭС. Специальные переключатели позволяют набирать из имеющихся в магазине резистивных элементов различные значения сопротивления. В зависимости от конструкции переключающего устройства различают ММЭС с рычажными и штепсельными переключателями. Резистивные элементы ММЭС группируются в *декады*. Каждая полная декада имеет десять резистивных элементов одинакового номинального значения. Номинальные значения резистивных элементов в декадах сокращенного типа находятся в отношении 1 : 2 : 3 : 4. На рис. 6.7 приведены схемы рычажной ММЭС с полным числом резистивных элементов в декаде (рис. 6.7, а) и ММЭС со штепсельным переключателем с сокращенным числом резистивных элементов в декаде (рис. 6.7, б).

Применяя ММЭС, следует учитывать, что их начальное сопротивление (при установке всех переключателей в нулевые положения) отлично от нуля и должно прибавляться к значению сопротивления, устанавливаемого с помощью переключателей.

В качестве мер емкости используются конденсаторы постоянной или переменной емкости и магазины емкости. К ним предъявляются следующие основные требования: минимальная зависимость значения емкости от времени, температуры и частоты; малые потери в диэлектрике, характеризующиеся тангенсом угла потерь; высокое сопротивление изоляции и достаточно высокая электрическая прочность изоляции.

Довольно хорошо этим требованиям соответствуют воздушные конденсаторы, выпускаемые в качестве мер постоянной и переменной емкости. Однако вследствие низкой диэлектрической проницаемости воздуха воздушные конденсаторы имеют большие габариты даже при малом значении емкости. Поэтому конденсаторы с воздушным диэлектриком выпускаются с номинальными значениями емкости от 1 до 10^3 пФ. В конденсаторах с номинальными значениями емкости свыше 10^4 пФ применяется слюдяной диэлектрик, а при емкости свыше 10^6 пФ — диэлектрик из полимерных пленок.

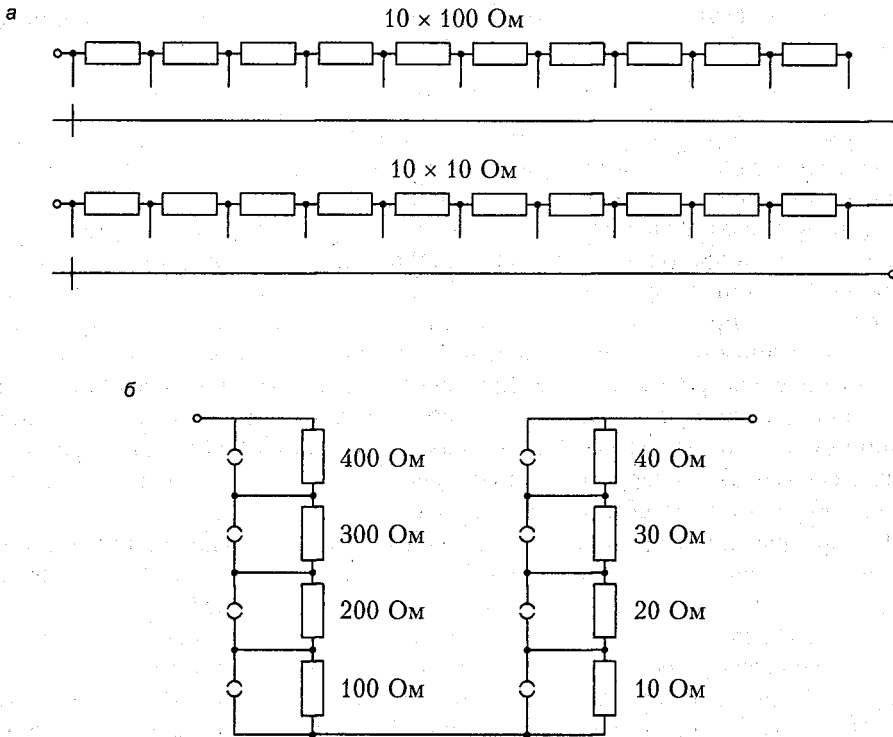


Рис. 6.7. Схемы ММЭС: а — рычажной с полным числом резистивных элементов в декаде; б — со штепсельным переключателем с сокращенным числом резистивных элементов в декаде

Слюдяные конденсаторы состоят из тонких металлических пластин со слюдяными прослойками, позволяют получить большие значения емкости (до 1 мкФ) при небольших габаритах и выпускаются в виде как однозначных мер емкости, так и магазинов емкостей. Магазины емкости состоят из отдельных конденсаторов постоянной емкости. В отличие от магазинов сопротивлений, где отдельные резистивные элементы соединяются последовательно, в магазинах емкости для получения суммарной емкости конденсаторы соединяют между собой параллельно. В качестве младших декад в магазинах емкости могут применяться конденсаторы с плавной регулировкой емкости в дополнение к декадам со ступенчатым изменением емкости.

В качестве мер индуктивности применяются катушки индуктивности и магазины индуктивности. Катушки должны сохранять постоянство индуктивности с течением времени, обладать малым активным сопротивлением и как можно меньшей зависимостью индуктивности от частоты, температуры, значения протекающего тока.

Катушки индуктивности выполняют в виде обмоток из медной проволоки на изоляционных каркасах. Использование каркаса из немагнитного материала (например, фарфора, керамики, кварцевого стекла, пластмассы) уменьшает зависимость индуктивности от тока, протекающего в катушке. Для уменьшения поверх-

ностного эффекта в катушках применяют многожильный провод. Для увеличения сопротивления изоляции обмотки катушек пропитывают специальными маслами и заливают фиксирующей массой. Для уменьшения влияния внешних магнитных полей катушки экранируют. Выпускаемые промышленностью катушки имеют номинальное значение индуктивности от 0,01 мкГн до 1 Гн.

Меры взаимной индуктивности отличаются от катушек индуктивности наличием двух обмоток, укрепленных на общем каркасе. Катушки индуктивности и взаимной индуктивности предназначены для работы в цепях переменного тока с частотой до 10 кГц.

Магазин индуктивности представляет собой набор измерительных катушек индуктивности, объединенных в одном корпусе и снабженных рычажным переключателем. Для плавного изменения индуктивности применяются вариометры. Вариометр состоит из двух катушек, одна из которых подвижная. Путем изменения взаимного расположения катушек можно плавно изменять значение индуктивности или взаимной индуктивности. В ряде случаев вариометры включают в состав магазинов индуктивности. По принципу выполнения декад и внешнему оформлению магазины индуктивности аналогичны магазинам сопротивления. У большинства магазинов при изменении индуктивности общее активное сопротивление магазина остается неизменным. Для этого используют катушки сопротивления, замещающие активное сопротивление включаемых катушек индуктивности.

Для мер невысокого уровня точности нормируется только допустимое относительное отклонение от номинального значения, для более точных мер нормируется допустимое изменение действительного значения в год. Например, для мер электрического сопротивления класса точности 0,01 и более точных число, обозначающее класс точности, равно допустимому изменению сопротивления за год, выраженному в процентах, а для мер класса точности ниже, чем 0,01, число, обозначающее класс точности, равно допустимому отклонению действительного значения сопротивления от номинального, выраженному в процентах.

ГЛАВА 7 Масштабные измерительные преобразователи

Масштабным называется измерительный преобразователь, входная и выходная величины которого однородны и который изменяет значение электрической величины в заданное число раз.

К масштабным измерительным преобразователям относятся шунты, добавочные сопротивления, делители напряжения, измерительные усилители, измерительные трансформаторы тока и напряжения. Применение этих преобразователей позволяет изготавливать приборы для разных пределов измерений, расширять пределы измерений уже существующих приборов.

7.1. Токовые шунты

Токовые шунты применяются для расширения пределов измерений амперметров путем уменьшения в определенное число раз силы электрического тока, проходящего через амперметр. Это бывает необходимо, когда значение измеряемого тока превосходит диапазон измерений измерительного прибора (амперметра).

Шунт представляет собой резистор, включаемый параллельно входу измерительного прибора (рис. 7.1). В этом случае измеряемый ток I_1 распределится между шунтом и измерительным прибором обратно пропорционально значениям их сопротивлений: $I_{\text{ш}}/I_2 = R_{\text{ИП}}/R_{\text{ш}}$, где $R_{\text{ш}}$ — значение сопротивления шунта, $R_{\text{ИП}}$ — значение входного сопротивления измерительного прибора (ИП), но так как $I_1 = I_{\text{ш}} + I_2$, то

$$I_1 = I_2 \left(1 + \frac{R_{\text{ИП}}}{R_{\text{ш}}} \right) = n I_2,$$

где $n = I_1/I_2$ — коэффициент шунтирования, на который нужно умножить показание прибора, чтобы получить значение измеряемого тока I_1 .

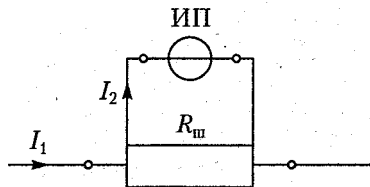


Рис. 7.1. Схема включения шунта для расширения пределов измерения амперметра

Шунты могут быть многопредельными. В амперметрах, предназначенных для измерения небольших значений токов (до 30 А), шунты помещают, как правило, в корпус прибора; в приборах для измерения больших значений применяют наружные шунты как самостоятельные средства измерений, которые имеют две пары зажимов: токовые и потенциальные. Токовые зажимы служат для включения шунта в измерительную цепь, к потенциальным зажимам, сопротивление между которыми равно $R_{ш}$, подключают измерительный прибор. Классы точности выпускаемых шунтов лежат в пределах от 0,02 до 0,5. Они позволяют расширить пределы измерения токов до 15 000 А и более.

Токовые шунты, выпускаемые как отдельное средство измерений, имеют нормированное номинальное значение падения напряжения между потенциальными зажимами, соответствующее номинальному значению тока. В эксплуатации имеются шунты постоянного тока с номинальными значениями напряжения 60, 75, 150 мВ. По этой причине к токовому шунту можно непосредственно подключать не амперметр, а милливольтметр.

Шунты применяют в основном в цепях постоянного тока. В цепях переменного тока возникает дополнительная составляющая погрешности, обусловленная реактивной составляющей сопротивления шунта, и с увеличением частоты значения сопротивления шунта и амперметра изменяются неодинаково.

Для измерения импульсных токов до 100 кА изготавливаются так называемые безреактивные шунты.

7.2. Добавочные сопротивления

Вольтметры, изготовленные на основе измерителей тока (например, магнитоэлектрической или электромагнитной системы), имеют встроенное добавочное сопротивление, включенное последовательно с измерительным механизмом. Обозначив через I_{\max} ток, вызывающий отклонение стрелки механизма на полную шкалу, увидим, что $I_{\max} = U_{\max} / (R_{ИП} + R_d)$, где R_d — значение добавочного сопротивления. Отсюда находим верхний предел измерений полученного вольтметра: $U_{\max} = I_{\max} (R_{ИП} + R_d)$. Из формулы видно, что механизм, стрелка которого отклоняется на полную шкалу при значении тока I_{\max} , можно использовать как вольтметр с верхним пределом измерений U_{\max} . Таким образом, подобрав соответствующее добавочное сопротивление, можно получить необходимый предел измерений напряжения.

Переносные вольтметры, как правило, делают многопредельными. Это означает, что в их конструкции предусмотрены добавочные сопротивления для каждого предела измерений. Добавочные сопротивления встраивают в корпус вольтметра с верхним пределом измерений до 300–1000 В. Для измерений более высоких напряжений (до 100 кВ и выше) добавочные сопротивления изготавливаются в виде отдельного средства измерений.

Добавочное сопротивление для вольтметров переменного тока должно иметь как можно меньшее значение реактивной составляющей, чтобы его полное сопротивление меньше зависело от частоты. Это достигается путем бифилярной намотки сопротивлений или намотки на плоских пластинках.

Для намотки сопротивлений используют сплавы с высоким удельным сопротивлением и малым значением температурного коэффициента: манганин, нихром, константан и т. д. Для приборов невысокой точности применяют также серийные радиотехнические неметаллические сопротивления.

Классы точности добавочных сопротивлений, изготовленных как отдельное средство измерений, лежат в пределах от 0,02 до 1,0. Номинальный ток, соответствующий номинальному напряжению, составляет 0,1–30 мА. Добавочные сопротивления, изготовленные как отдельное средство измерений, как правило, применяют на постоянном токе и включают последовательно с милли- или микроамперметром.

Для добавочных сопротивлений и токовых шунтов класс точности обозначает предел допускаемой относительной погрешности, выраженной в процентах.

7.3. Делители напряжения

Для уменьшения напряжения в определенное число раз применяются делители напряжения, представляющие собой в общем случае последовательное соединение двух сопротивлений (называемых высоковольтным и низковольтным плечами), подключаемых к двум точкам электрической цепи, напряжение между которыми необходимо измерить. Коэффициент деления определяется из выражения

$$K_d = \frac{Z_v + Z_n}{Z_n},$$

где Z_v и Z_n — значения полных сопротивлений высоковольтного и низковольтного плеч делителя соответственно. К выходу делителя (к низковольтному плечу) подключают вольтметр, по показаниям которого U_n определяют искомое значение измеряемого напряжения: $U = K_d U_n$.

В зависимости от рода измеряемого напряжения делители могут быть выполнены на чисто активных, емкостных, индуктивных элементах или смешанного типа, изготовленные на комбинации активных, емкостных и индуктивных элементов. Делители напряжения либо встраиваются в средства измерений, либо изготавливаются как отдельное средство измерений.

Делители напряжения могут быть предназначены для измерений самых разных сигналов. От этого зависят их конструкция и метрологические характеристики.

Так, для масштабного преобразования постоянных напряжений применяют делители напряжения на чисто активных сопротивлениях классов точности от 0,001 до 0,1 и классов напряжений от 100 В до 300 кВ и выше. Для преобразования низких переменных напряжений (до 100–1000 В) в диапазоне частот 20 Гц — 100 кГц могут быть использованы индуктивные (автотрансформаторные) делители классов точности до 0,0001, в более широком диапазоне напряжений (до 1150 кВ и выше) — емкостные делители напряжения классов точности 0,1–1,0. Для преобразования импульсных высоковольтных напряжений (до 4–5 МВ) применяют делители напряжения на чисто активных сопротивлениях и смешанные активно-емкостные делители и т. д.

7.4. Измерительные усилители

Для усиления слабых сигналов постоянных, переменных и импульсных токов и напряжений, то есть для расширения пределов измерения в сторону малых значений (от 0,1 нВ и 0,3 пА и ниже), применяют активные (то есть имеющие внешнее питание) масштабные преобразователи — измерительные усилители. По частотному диапазону усиливаемых сигналов измерительные усилители подразделяются на усилители постоянного тока, низкочастотные (20 Гц — 200 кГц), высокочастотные (до 250 МГц) и селективные, обеспечивающие усиление в узкой полосе частот. Они изготавливаются с нормированной погрешностью коэффициента передачи и имеют унифицированный номинальный выходной сигнал (как правило, 10 В или 5 мА). Основная проблема, возникающая при эксплуатации измерительных усилителей, — это влияние внешних электромагнитных помех (шумов) на результат измерений. По этой причине измерительные усилители могут иметь довольно большое значение погрешности — от 0,1 до 3 и даже до 10 %.

7.5. Измерительные трансформаторы переменного тока и напряжения

Электромагнитные измерительные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) используются для преобразования переменных токов и напряжений в токи и напряжения, допустимые для измерений приборами с небольшими стандартными пределами измерений (например, 5 А, 100 В).

Наиболее часто ТТ и ТН используются для измерений токов и напряжений в сетях промышленной частоты 50 Гц, в узлах учета и контроля качества электроэнергии. Кроме основной задачи (преобразования высоких напряжений и больших значений токов к размеру, удобному для измерений низковольтными приборами) они выполняют функцию изолирования цепей низкого напряжения от цепей высокого на полное рабочее напряжение линии электропередачи.

По принципу действия и ТТ и ТН являются обычными электромагнитными трансформаторами, использующими в работе закон электромагнитной индукции, такими же, как и силовые трансформаторы, но в отличие от последних они предназначены для измерений и имеют нормированные метрологические характеристики.

Измерительные трансформаторы состоят из двух изолированных друг от друга обмоток: первичной с числом витков w_1 и вторичной с числом витков w_2 , — размещенных на магнитном сердечнике. Первичную обмотку трансформатора тока включают в измерительную цепь последовательно для измерений тока, а первичную обмотку трансформатора напряжения — параллельно для измерений напряжения. Рабочей нагрузкой ТТ и ТН являются измерительные приборы и вспомогательные устройства, подключаемые к выходу вторичной обмотки. При этом ко вторичной обмотке ТТ подключают амперметры, токовые обмотки ваттметров и счетчиков электроэнергии, а также токовые цепи устройств автоматики и сигнализации. Ко вторичной обмотке ТН подключают вольтметры, потенциальные цепи ваттметров и счетчиков, а также потенциальные цепи устройств авто-

матики и сигнализации. Зажимы трансформаторов имеют специальную маркировку, обеспечивающую правильное включение трансформаторов и приборов.

Значения измеряемых величин определяют умножением показаний приборов на номинальные коэффициенты трансформации трансформатора тока, $K_{I_n} = I_{1n}/I_{2n}$, или трансформатора напряжения, $K_{U_n} = U_{1n}/U_{2n}$, где I_{1n} и U_{1n} — номинальные значения тока и напряжения первичных обмоток; I_{2n} и U_{2n} — номинальные значения тока и напряжения вторичных обмоток трансформаторов, соответствующие номинальным значениям первичных тока и напряжения. Номинальные коэффициенты трансформации указывают в документации и на маркировке трансформаторов в виде отношения номинальных значений первичных и вторичных токов или напряжений.

Далее рассмотрим, почему два трансформатора, ТТ и ТН, действующие с использованием одного физического закона, в одном случае преобразуют электрический ток, а в другом — напряжение, а также причины, приводящие к возникновению погрешности измерений.

Трансформатор тока. Работает в режиме, близком к короткому замыканию, и именно поэтому является преобразователем тока. Для идеального трансформатора тока с короткозамкнутой вторичной обмоткой измеряемый ток I_1 , проходя по первичной обмотке с числом витков w_1 , создает в магнитном сердечнике трансформатора магнитный поток Φ , пропорциональный магнитодвижущей силе $I_1 w_1$ (ампер-витки), который в соответствии с законом об электромагнитной индукции наводит во вторичной обмотке с числом витков w_2 электродвижущую силу E_2 . Поскольку вторичная обмотка короткозамкнута и активная составляющая выходного сопротивления идеального трансформатора равна нулю, то под действием E_2 возникает вторичный ток I_2 , который, согласно правилу Ленца, оказывает размагничивающее действие, пропорциональное значению ампер-витков $I_2 w_2$. Если ТТ идеальный и его вторичная обмотка короткозамкнута, то $I_1 w_1 = I_2 w_2$ (рис. 7.2, а). Следует обратить внимание на то, что вторичный ток I_2 сдвинут по фазе относительно первичного тока I_1 на угол 180° . Коэффициент трансформации идеального трансформатора равен отношению числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной, $K_{I_n} = I_1/I_2 = w_2/w_1$.

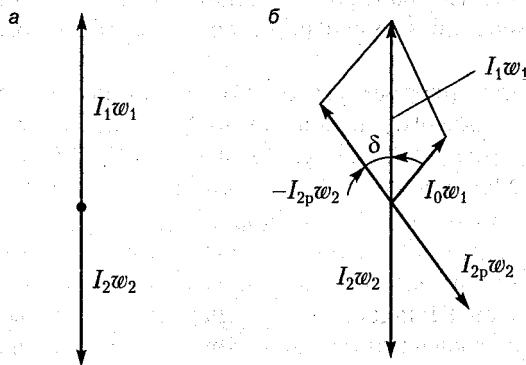


Рис. 7.2. Упрощенные векторные диаграммы трансформатора тока: а — идеального; б — реального

Реальный ТТ отличается от идеального тем, что в его магнитном сердечнике есть потери, выходное сопротивление вторичной обмотки отличается от нуля и из-за подключаемых приборов его режим работы несколько отличается от режима короткого замыкания. Это приводит к тому, что на векторной диаграмме вектор реальных ампер-витков вторичной обмотки $I_2 w_2$ по модулю и по углу сдвига фаз отличается от вектора $I_1 w_1$ идеального ТТ (рис. 7.2, б). На компенсацию потерь расходуется энергия первичного тока (вектор ампер-витков $I_0 w_1$).

Векторная диаграмма (рис. 7.2, б) показывает, что действительный коэффициент трансформации ТТ только приблизительно равен отношению чисел витков обмоток. Кроме того, он не остается постоянным при изменении условий эксплуатации. При увеличении, например, тока I_1 увеличиваются ток I_2 , потери в магнитном сердечнике и, соответственно, вектор $I_0 w_1$; при изменении значения нагрузки изменяется отношение токов I_1/I_2 . Поэтому для реальных ТТ в соответствии с их классом точности устанавливают предел допускаемой погрешности по току и угловую погрешность для работы при нормированном значении нагрузки вторичной обмотки.

Погрешность по току (или токовая погрешность) определяется как отклонение действительного коэффициента трансформации от номинального значения. Она составляет (в процентах)

$$\gamma_I = 100 \frac{I'_1 - I_1}{I_1} = 100 \frac{K_{I_n} - K_I}{K_I},$$

где $I'_1 = K_{I_n} I_2$ и $I_1 = K_I I_2$.

Угловая погрешность определяется неточностью передачи значения фазы первичного тока вторичным током и численно равна значению угла δ (в угловых минутах) (рис. 7.2, б).

Наибольшее сопротивление (в омах), на которое может быть замкнута вторичная обмотка при условии, что погрешность трансформатора не превысит допустимое значение, называется *номинальной нагрузкой*. В документации на ТТ и на его маркировке обычно указывают номинальную мощность нагрузки, выраженную в вольт-амперах. Если, например, номинальная мощность составляет 15 В·А, то при номинальном значении тока во вторичной цепи 5 А напряжение на зажимах не должно превышать 3 В. Номинальная нагрузка в этом случае должна быть не более $z = U_{2н}/I_{2н} = 0,6$ Ом.

В зависимости от назначения ТТ подразделяют на рабочие и лабораторные. Рабочие ТТ предназначены для эксплуатации в составе установок переменного тока частотой 50 Гц, лабораторные ТТ — для поверки средств измерений, в том числе других трансформаторов тока, а также для точных лабораторных измерений.

Рабочие электромагнитные трансформаторы тока выпускают на номинальные значения первичных токов от 1 до 40 000 А при номинальных значениях вторичных 1 или 5 А.

Классы точности — от 0,2 до 10 при номинальной мощности вторичной нагрузки от 2,5 до 100 В·А.

Изоляция трансформаторов может быть рассчитана на эксплуатацию в сетях с номинальным напряжением от 0,66 до 750 кВ.

Лабораторные ТТ могут выпускаться на номинальные значения первичных токов от 0,1 до 60 000 А при номинальных значениях вторичных 1, 2 или 5 А. Классы точности лабораторных ТТ — от 0,01 до 0,2 при номинальной мощности от 2,5 до 15 В·А. Для многопредельных лабораторных ТТ могут устанавливаться различные классы точности, действующие при различных коэффициентах трансформации и различных значениях вторичной нагрузки.

Число витков вторичной обмотки ТТ, как правило, больше числа витков первичной, поэтому при эксплуатации вторичная обмотка должна быть постоянно замкнута на сопротивление, не превышающее номинальную нагрузку. Если вторичную цепь ТТ во время работы разомкнуть, то ТТ превратится в трансформатор напряжения и ток первичной обмотки создаст в магнитном сердечнике очень сильный магнитный поток, который вызовет появление на зажимах вторичной обмотки высокого напряжения. Кроме того что это опасно для обслуживающего персонала, появление высокого напряжения может вызвать пробой изоляции вторичной обмотки на корпус, а также перегрев сердечника вследствие высоких потерь на вихревые токи и гистерезис. Даже при транспортировании и хранении ТТ выходные зажимы вторичной обмотки должны быть замкнуты накоротко.

Следует отметить, что первичные обмотки как лабораторных, так и рабочих ТТ на большие значения токов (свыше 600 А) делают одновитковыми — в виде шины с измеряемым током, проходящей через окно в сердечнике, на который намотана вторичная обмотка.

Трансформаторы напряжения. В отличие от трансформаторов тока ТН работают в режиме, близком к холостому ходу. Под действием приложенного измеряемого напряжения U_1 по первичной обмотке ТН протекает небольшой намагничивающий ток, создающий в магнитном сердечнике магнитный поток Φ . В свою очередь, на основании закона об электромагнитной индукции, потоком Φ во вторичной обмотке ТН создается электродвижущая сила E_2 . Если трансформатор идеальный, то есть отсутствуют потери в сердечнике и нагрузка вторичной обмотки, то коэффициент трансформации равен отношению числа витков первичной и вторичной обмоток $K_U = U_1/E_2 = w_1/w_2$ (рис. 7.3, а).

Реальный ТН отличается от идеального тем, что в его магнитном сердечнике и в обмотках есть потери, поэтому его режим работы отличается от режима холостого хода. Вследствие этого реальное напряжение на вторичной обмотке U_2 отличается от E_2 и коэффициент трансформации только приблизительно равен отношению числа витков первичной и вторичной обмоток (рис. 7.3, б), причем действительное значение коэффициента трансформации зависит от значения нагрузки и значения первичного напряжения. Поэтому для реальных ТН, так же как для ТТ, в соответствии с их классом точности устанавливают предел допускаемой погрешности по напряжению и угловую погрешность для работы при нормированном значении нагрузки.

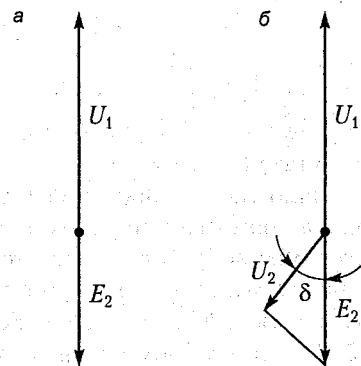


Рис. 7.3. Упрощенные векторные диаграммы трансформатора напряжения: а — идеального; б — реального

Погрешность по напряжению определяется как отклонение действительного коэффициента трансформации от номинального значения. Она равна (в процентах)

$$\gamma_U = 100 \frac{U'_1 - U_1}{U_1} = 100(K_{U_n} - K_U)K_U,$$

где $U'_1 = K_{U_n} U_2$ и $U_1 = K_U U_2$.

Угловая погрешность определяется неточностью передачи значения фазы первичного напряжения вторичным напряжением и численно равна значению угла δ (в минутах) (рис. 7.3, б).

Номинальную нагрузку ТН выражают в виде значения номинальной мощности нагрузки P_n (в вольт-амперах) и указывают в документации и на маркировке ТН. Трансформатор должен иметь погрешность не более установленной классом точности в диапазоне нагрузок от 25 до 100 % от P_n .

В зависимости от назначения ТН подразделяют на рабочие и лабораторные. Рабочие ТН предназначены для эксплуатации в составе установок переменного тока частотой 50 Гц, лабораторные — для поверки средств измерений и выполнения точных лабораторных измерений.

Рабочие электромагнитные ТН выпускают на номинальные первичные напряжения до 500 кВ. При увеличении класса напряжения существенно возрастают геометрические размеры и масса ТН, что связано с необходимостью изолирования цепей низкого напряжения от цепей высокого, поэтому для измерений напряжений 500 кВ и выше изготавливаются так называемые емкостные трансформаторы напряжения. Емкостные ТН представляют собой последовательное соединение емкостного делителя напряжения и электромагнитного ТН более низкого класса напряжения (обычно 35 кВ).

Стандартные значения номинальных выходных напряжений ТН составляют $100/\sqrt{3}$ или 100 В. Классы точности рабочих ТН — от 0,1 до 3,0 при значениях номинальной мощности нагрузки от 10 до 1200 В·А.

Для работы в сетях с номинальным рабочим напряжением до 10 кВ изготавливаются трехфазные ТН, включаемые одновременно в три фазы линии электропередачи. Трехфазные ТН представляют собой три однофазных трансформатора, помещенных на общем магнитном сердечнике в один корпус.

Лабораторные ТН выпускают только в однофазном исполнении на номинальные значения напряжений от 220 В до 35 кВ классов точности 0,05, 0,1 или 0,2 при работе на номинальную нагрузку от 5 до 25 В·А. Как правило, лабораторные ТН изготавливаются сразу на несколько пределов измерений.

Аварийным режимом при работе ТН является короткое замыкание вторичной обмотки. Для предотвращения аварийного режима в первичную цепь ТН устанавливают предохранитель в виде плавкой вставки.

ГЛАВА 8 Электрсмеханические измерительные преобразователи и приборы

8.1. Принцип действия

Электромеханические измерительные преобразователи (измерительные механизмы) и приборы относятся к аналоговым устройствам, показания которых являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины. Электромеханический прибор состоит из двух основных частей: измерительной цепи и электро-механического измерительного преобразователя (измерительного механизма). Измерительная цепь, обычно представляющая собой масштабный измерительный преобразователь, преобразует измеряемую величину в другую величину, непосредственно воздействующую на измерительный механизм. В измерительном механизме, состоящем из подвижной и неподвижной частей, электромагнитная энергия этой величины преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части относительно неподвижной. Поскольку обычно применяется угловое перемещение, то в дальнейшем будут рассматриваться не силы, действующие в приборе, а моменты.

На основании второго закона Ньютона запишем для подвижной части измерительного механизма уравнение для вращающихся тел, учитывающее наиболее важные моменты, действующие на подвижную часть:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = M_{\text{вп}} + M_{\text{пр}} + M_{\text{уст}}, \quad (8.1)$$

где $J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$ — момент сил инерции; J — момент инерции подвижной части; α — угол поворота подвижной части; t — время; $M_{\text{вп}}$ — вращающий момент; $M_{\text{пр}}$ — противодействующий момент; $M_{\text{уст}}$ — момент успокоения.

Вращающий момент возникает и однозначно определяется измеряемой величиной x , но в общем случае может зависеть также от угла поворота подвижной части, то есть $M_{\text{вп}} = F(x, \alpha)$.

Для электромеханических приборов, в которых действуют силы электромагнитного поля, $M_{\text{вр}}$ определяется из общего уравнения динамики системы

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha}, \quad (8.2)$$

где $W_{\text{эм}}$ — энергия электромагнитного поля, сосредоточенная в измерительном механизме.

В зависимости от способа создания вращающего момента, то есть в зависимости от вида преобразования энергии электромагнитного поля в механическую энергию перемещения подвижной части, электромеханические измерительные механизмы (преобразователи) подразделяются на магнитоэлектрические, электромагнитные, электростатические, электродинамические, ферродинамические и индукционные.

Если бы движению подвижной части ничего не противодействовало, то она при любом значении измеряемой величины (кроме нуля) доходила бы до упора, что делало бы измерение невозможным. Для того чтобы угол отклонения α однозначно зависел от измеряемой величины, в измерительном механизме создается противодействующий момент $M_{\text{пр}}$, направленный навстречу вращающему и зависящий от угла поворота. Таким образом, при возникающем динамическом равновесии ($M_{\text{вр}} + M_{\text{пр}} = 0$) каждому определенному значению измеряемой величины будет соответствовать определенный угол поворота подвижной части.

По способу создания противодействующего момента измерительные механизмы делятся на две группы: с механическим противодействующим моментом и с электрическим противодействующим моментом — *логометры*.

В измерительных механизмах первой группы противодействующий момент создается с помощью упругого элемента (спиральной пружины, растяжек или подвеса), который при повороте подвижной части закручивается. При этом значение $M_{\text{пр}}$ определяется из выражения

$$M_{\text{пр}} = -W\alpha, \quad (8.3)$$

где W — удельный противодействующий момент, зависящий от свойств упругого элемента. В таких измерительных механизмах угол α определяется электрической величиной, создающей вращающий момент (электрический ток, напряжение, их произведение и т. д.).

В логометрах противодействующий момент создается так же, как и вращающий, но один из моментов должен зависеть от угла поворота подвижной части. В этом случае угол поворота будет определяться отношением электрических величин, создающих вращающий и противодействующий моменты (например, отношением электрических токов).

При перемещении подвижной части на нее, кроме указанных моментов, действуют динамические моменты: момент сил инерции $\left(J \frac{d^2\alpha}{dt^2} \right)$ и момент успокоения,

пропорциональный угловой скорости движения подвижной части $\frac{d\alpha}{dt}$.

$$M_{\text{усп}} = -P \frac{d\alpha}{dt}, \quad (8.4)$$

где P — коэффициент успокоения. Знак «минус» показывает, что момент успокоения, так же как и противодействующий, направлен навстречу вращающему моменту. Задачей $M_{\text{усп}}$ является обеспечение плавного и аperiодического движения подвижной части измерительного механизма. От него в значительной степени зависит важный эксплуатационный параметр прибора — время успокоения. Момент успокоения создается либо применением специальных устройств, называемых демпферами, или успокоителями, либо без них. В зависимости от конструкции приборов в них применяются магнитоиндукционные, жидкостные или воздушные успокоители.

Если выражения (8.3) и (8.4) подставить в уравнение (8.1) и перенести в левую часть, то получится дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами, описывающее движение подвижной части измерительного механизма:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = M_{\text{пр}}. \quad (8.5)$$

8.2. Общие узлы и детали











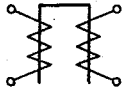

Несмотря на то что электромеханические приборы существенно различаются по своему устройству, имеется ряд деталей и узлов, общих для всех таких приборов.

Корпус прибора защищает измерительный механизм от внешних воздействий (механических повреждений, пыли, в отдельных случаях — воды и газов) и чаще всего выполняется из пластмассы.

Для определения числового значения измеряемой величины приборы имеют отсчетное устройство, состоящее из шкалы и указателя. Шкала прибора обычно представляет собой пластину белого цвета, на которую нанесены черные отметки, соответствующие определенным значениям измеряемой величины, и условные обозначения. Номенклатура, изображение и место расположения условных обозначений устанавливаются нормативными документами. В соответствии с ними на шкалу наносят единицу измерения измеряемой величины, класс точности прибора, род тока, товарный знак предприятия-изготовителя, заводской номер, год изготовления или заменяющий его шифр, знак Государственного реестра, испытательное напряжение изоляции, используемое положение прибора (горизонтальное, вертикальное или под углом, если это положение имеет значение), символ, указывающий принцип действия прибора (табл. 8.1).

Указатели применяются стрелочные и световые. В первом случае стрелка, жестко соединенная с подвижной частью измерительного механизма, перемещается над шкалой прибора. При световом способе отсчета на оси подвижной части закрепляется зеркальце, освещаемое специальным осветителем; отраженный от зеркальца световой луч попадает на шкалу и образует на ней световое пятно с темной нитью посередине. Применение светового указателя увеличивает чувствительность прибора, поскольку при этом масса и момент инерции подвижной части существенно уменьшаются, кроме того, меняя расстояние между шкалой и осью подвижной части, можно сделать длину луча довольно большой, что при одном и том же угловом перемещении увеличивает линейное перемещение.

Таблица 8.1. Условные обозначения электромеханических приборов

Наименование прибора	Условное обозначение	Наименование прибора	Условное обозначение
Прибор магнито-электрический с подвижной рамкой		Прибор электродинамический	
Логометр магнито-электрический		Прибор ферродинамический	
Прибор магнито-электрический с подвижным магнитом		Логометр электродинамический	
Логометр магнито-электрический с подвижным магнитом		Логометр ферродинамический	
Прибор электромагнитный		Прибор индукционный	
Логометр электромагнитный		Прибор электростатический	

Крепление подвижной части определяется элементом, создающим противодействующий момент, и выполняется с помощью опор (при использовании спиральных пружинок), растяжек или подвеса.

Опоры состоят из кернов и подпятников. Керны представляют собой отрезки стальной проволоки, заточенные с одной стороны в виде конуса. Подпятники имеют форму цилиндра с коническим углублением по оси. Чаще всего они изготавливаются из агата или корунда. Закрепленные на подвижной части по оси вращения керны входят в углубления подпятников, расположенных на неподвижной части. Основным недостатком данного способа крепления — трение при вращении, которое приводит к погрешности измерения.

Этот недостаток в значительной степени устраняется при креплении с использованием двух растяжек, представляющих собой упругие металлические ленты, прикрепляемые одним концом к подвижной части, а другим — к неподвижной. При создании натяжения ленты поддерживают подвижную часть, а при ее повороте закручиваются, создавая противодействующий момент. Растяжки изготавливаются из специальных сортов бронзы, а также из платиносеребряных и кобальтовых сплавов. При необходимости растяжки могут использоваться и для подвода тока к обмотке подвижной части.

Крепление на подвесе применяется в приборах наибольшей чувствительности — гальванометрах. Подвес представляет собой тонкую упругую нить, на которой свободно подвешивается подвижная часть измерительного механизма. В таких приборах применяется световой отсчет, и они требуют установки по уровню, поскольку даже небольшое отклонение положения прибора от вертикального вызывает появление дополнительной погрешности измерения. Ток к подвижной части подводится посредством безмоментных токоподводов.

Необходимая степень успокоения достигается с помощью специальных устройств, называемых *демпферами*, или *успокоителями*. Применяют магнитоиндукционные, жидкостные и воздушные успокоители.

Магнитоиндукционный момент успокоения создается в результате взаимодействия поля постоянного магнита и вихревых токов, наводимых либо в металлических (неферромагнитных) деталях подвижной части измерительного механизма, либо в закрепленной на подвижной части пластине (из алюминия), перемещающейся в рабочем зазоре постоянного магнита. Вместо пластины может использоваться короткозамкнутый виток. Магнитоиндукционный успокоитель прост конструктивно и применяется в тех случаях, когда поле тормозного магнита не влияет на показания прибора.

Жидкостное успокоение достигается тем, что подвижная часть измерительного механизма или ее фрагмент помещаются в вязкую жидкость. При движении подвижной части энергия расходуется на преодоление трения, возникающего между слоями жидкости благодаря наличию градиента скорости между ними, вследствие чего и создается необходимое успокоение. Основное достоинство жидкостного успокоения состоит в том, что оно оказывает тормозящее действие при движении подвижной части во всех направлениях, что используется для повышения вибростойкости приборов.

Воздушный успокоитель состоит из камеры и находящейся внутри нее легкой пластины, жестко закрепленной на оси подвижной части. При вращении оси пластина перемещается внутри камеры, в результате чего по обе ее стороны создается разность давлений. Это препятствует свободному перемещению подвижной части и вызывает ее успокоение. Воздушные успокоители не содержат источников электромагнитных полей, что является их достоинством по сравнению с магнитоиндукционными.

Для установки указателя на требуемую отметку шкалы (например, на ноль) в электромеханических приборах применяют устройство, называемое *корректором*. Основным элементом корректора является винт, расположенный на корпусе прибора. При его повороте происходит закручивание пружины, растяжек или подвеса, что перемещает подвижную часть и дает возможность установить указатель на нужную отметку шкалы.

Некоторые приборы (как правило, гальванометры) снабжены *арретиром* — устройством для закрепления подвижной части измерительного механизма в неподвижном положении, что необходимо при переноске, транспортировке или хранении высокочувствительных приборов. Арретирование осуществляется механическим или электрическим путями. Во втором случае происходит замыкание накоротко обмотки подвижной части.

8.3. Магнитоэлектрические измерительные преобразователи и приборы

Основной составной частью магнитоэлектрических приборов является магнитоэлектрический измерительный механизм (преобразователь), в котором вращающий момент создается в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и проводника с током, выполняемого обычно в виде рамки (катушки), по которой протекает измеряемый ток.

Основными узлами магнитоэлектрического измерительного механизма являются магнитная система и подвижная часть. Конструктивно различают магнитоэлектрические механизмы с подвижной рамкой и с подвижным магнитом. Наиболее широко распространен механизм с подвижной рамкой. В свою очередь измерительные механизмы с подвижной рамкой делятся на механизмы с внешним магнитом и с внутренним магнитом.

По способу создания противодействующего момента магнитоэлектрические измерительные механизмы подразделяются на измерительные механизмы с механическим противодействующим моментом и с электрическим противодействующим моментом (логометры).

Момент успокоения создается магнитоиндукционным путем (без применения специальных успокоителей) за счет взаимодействия токов, наводимых в дюралюминиевом каркасе подвижной рамки и в цепи самой рамки, с полем постоянного магнита.

Условные обозначения магнитоэлектрических приборов представлены в табл. 8.1. По существовавшей до недавнего времени классификации в названии типа приборов используется буква М (например, М4263). В современных условиях возможны и другие обозначения.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы с механическим противодействующим моментом. На рис. 8.1 показано устройство магнитоэлектрического измерительного механизма с подвижной рамкой (катушкой) и внешним магнитом, где 1 — постоянный магнит, 2 — магнитопровод, 3 — полюсные наконечники, 4 — неподвижный сердечник, 5 — спиральная пружина, 6 — подвижная рамка, 7 — рабочий воздушный зазор, 8 — указатель. Ток к подвижной рамке подводится через две спиральные пружины. При протекании через нее тока i воз-

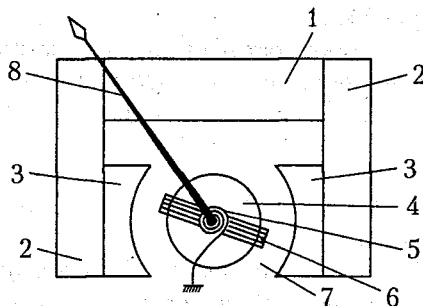


Рис. 8.1. Устройство магнитоэлектрического измерительного механизма с подвижной рамкой

никает вращающий момент, мгновенное значение которого $M_{\text{вр}}$ определяется выражением (8.2). Рамка перемещается в узком воздушном зазоре толщиной 1...2 мм, в котором создается радиальное магнитное поле с постоянной магнитной индукцией B . В этом случае магнитный поток, сцепляющийся с рамкой, будет определяться выражением

$$\Phi = BS\alpha,$$

где S — площадь рамки; α — угол ее поворота.

Энергия электромагнитного поля, сцепляющегося с подвижной рамкой, с учетом энергии, запасаемой в самой рамке, определяется выражением

$$W_{\text{эм}} = \Psi i + \frac{Li^2}{2},$$

где $\Psi = \Phi w = BS\omega\alpha$ — потокосцепление подвижной рамки; w — число витков обмотки рамки; L — собственная индуктивность рамки. Поскольку от угла поворота рамки α зависит только потокосцепление Ψ , то для вращающего момента после дифференцирования согласно (8.2) получим:

$$M_{\text{вр}} = BS\omega i. \quad (8.6)$$

Противодействующий момент $M_{\text{пр}}$ создается пружиной и определяется выражением (8.3). Из условия равновесия вращающего и противодействующего моментов

$$M_{\text{вр}} + M_{\text{пр}} = 0, \quad (8.7)$$

и с учетом (8.6) получим для установившегося угла поворота подвижной части измерительного механизма:

$$\alpha = \frac{BS\omega i}{W} = S_I i, \quad (8.8)$$

где $S_I = \frac{BS\omega}{W}$ — чувствительность измерительного механизма к току.

Из выражения (8.8) следует, что магнитоэлектрический измерительный механизм с механическим противодействующим моментом непосредственно является измерителем тока. Кроме того, поскольку S_I есть величина постоянная, не зависящая от измеряемой величины и угла поворота подвижной части, прибор будет иметь равномерную шкалу.

При протекании через рамку постоянного тока I вращающий момент и угол поворота подвижной части соответственно будут равны:

$$M_{\text{вр}} = BS\omega I; \quad \alpha = \frac{BS\omega I}{W} = S_I I. \quad (8.9)$$

Если ток синусоидальный ($i = I_m \sin \omega t$), то мгновенное значение вращающего момента $M_{\text{вр}} = BS\omega I_m \sin \omega t$.

Учитывая, что у магнитоэлектрических измерительных механизмов период собственных (свободных) колебаний подвижной части приблизительно 1 с (частота собственных колебаний $\omega_0 = 6,28 \text{ с}^{-1}$), на частотах свыше 10 Гц рамка в силу своей инерционности не будет успевать реагировать на изменения тока.

Вследствие этого угол поворота подвижной части будет определяться средним за период T значением вращающего момента

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{вр}t} dt. \quad (8.10)$$

Таким образом, при синусоидальном токе $M_{\text{вр}}$ и, соответственно, угол поворота подвижной части α равен нулю. Поэтому для измерений на синусоидальном токе магнитоэлектрические измерительные механизмы не применяют.

Периодический ток с периодом T несинусоидальной формы аналитически может быть представлен в виде разложения в ряд Фурье по гармоническим составляющим

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} I_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k),$$

где I_0 — постоянная составляющая; k — номер гармоники; I_{mk} — амплитуда k -й гармоники; $\omega = \frac{2\pi}{T}$, ψ_k — начальная фаза k -й гармоники. В этом случае, согласно (8.10), для среднего значения вращающего момента и угла поворота подвижной части получим:

$$M_{\text{вр}} = BS\omega I_0; \quad \alpha = \frac{BS\omega}{W} I_0,$$

то есть при протекании по рамке переменного несинусоидального тока магнитоэлектрический прибор будет измерять постоянную составляющую.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы с механическим противодействующим моментом применяются главным образом в амперметрах и вольтметрах постоянного тока, гальванометрах, а также в некоторых типах омметров.

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры. В амперметрах измерительный механизм включается в цепь непосредственно или с помощью шунта. Непосредственное включение (без шунта) применяется при измерении токов, допустимых для токоподводящих пружинок (или растяжек) и обмотки рамки подвижной части измерительного механизма. Значение таких токов не превышает 30 мА, то есть непосредственное включение характерно только для микро- и миллиамперметров. В остальных случаях в амперметрах используют шунты. В многопредельных амперметрах используют многопредельные шунты.

В вольтметрах последовательно с измерительным механизмом включается добавочный резистор, и это соединение подключается к тем точкам схемы, между которыми необходимо измерить напряжение. В многопредельных вольтметрах используют несколько добавочных резисторов.

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры имеют весьма широкий диапазон измеряемых величин — от сотых долей микроампера и десятых долей милливольт до десятков килоампер и сотен киловольт. Этот диапазон определяется высокой чувствительностью измерительного механизма (при измерениях малых токов и напряжений) и возможностями применяемых шунтов и добавочных резисторов (при измерении токов и напряжений больших значений).

С точки зрения применения амперметры и вольтметры выпускают переносными и щитовыми. Переносные приборы в большинстве случаев делают высоко-

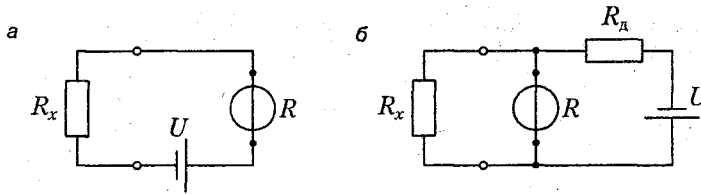


Рис. 8.2. Схемы омметров: а — с последовательным; б — с параллельным включением измерительного механизма и объекта исследования

точными (классов 0,1–0,5), многопредельными и часто комбинированными. Щитовые приборы, как правило, выпускают однопредельными, чаще всего классов точности 1,0, 1,5 и 2,5.

Магнитоэлектрические омметры. Омметры выпускают с последовательным (рис. 8.2, а) и параллельным (рис. 8.2, б) включением измерительного механизма и объекта исследования. При последовательном включении угол поворота подвижной части измерительного механизма

$$\alpha = \frac{S_I U}{R + R_x}, \quad (8.11)$$

а при параллельном включении

$$\alpha = \frac{S_I U R_x}{R R_x + R_d (R + R_x)}, \quad (8.12)$$

где S_I — чувствительность измерительного механизма к току; R — сопротивление измерительного механизма; R_x — измеряемое сопротивление; R_d — сопротивление добавочного резистора, необходимого для ограничения тока в параллельной схеме; U — напряжение источника питания.

Из выражений (8.11) и (8.12) следует:

- 1) угол поворота подвижной части определяется значением R_x , поэтому шкала прибора может быть проградуирована в единицах измерения сопротивления (омах) при постоянном напряжении источника питания, при этом получаемая шкала при обеих схемах включения неравномерна;
- 2) так как показания прибора зависят от изменения напряжения питания, то в этих омметрах постоянным поддерживается значение произведения $B U = \text{const}$, а следовательно, и $S_I U = \text{const}$. Это обеспечивается встраиванием в магнитную систему прибора магнитного шунта в виде ферромагнитной пластинки переменного сечения, шунтирующего рабочий воздушный зазор. Перемещая эту пластинку с помощью специальной ручки на панели прибора, можно менять магнитную индукцию B , а значит и чувствительность S_I , компенсируя изменение напряжения источника питания.

Последовательная схема применяется для измерения больших сопротивлений (до сотен МОм), параллельная — для измерения малых (до 1000 Ом). Обычно омметры выполняют в виде переносных приборов классов точности 1,5 и 2,5.

Гальванометры широко применяют в качестве нуль-индикаторов, а также для измерения малых токов, напряжений и количества электричества. Подробнее гальванометры будут рассмотрены позже.

Основными достоинствами магнитоэлектрических приборов являются равномерная шкала, высокая точность и высокая чувствительность.

Равномерность шкалы связана с независимостью чувствительности к току S_I от угла поворота подвижной части и измеряемой величины. Высокая точность объясняется рядом причин. Наличие равномерной шкалы уменьшает погрешности градуировки и отсчета. Влияние внешних электрических полей отсутствует, а влияние внешних магнитных полей незначительно благодаря сильному собственному магнитному полю в воздушном зазоре (0,2–1,2 Тл). По этой же причине приборы имеют малое собственное потребление энергии. В отношении чувствительности магнитоэлектрические приборы не имеют себе равных среди электро-механических приборов. Например, микроамперметр М95 имеет ток полного отклонения 0,1 мкА (при классе точности 1,0). Именно поэтому гальванометры как приборы, обладающие наибольшей чувствительностью, в подавляющем большинстве бывают только магнитоэлектрическими.

К недостаткам магнитоэлектрических приборов следует отнести невозможность их непосредственного применения для измерения в цепях переменного тока,

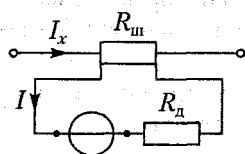


Рис. 8.3. Схема простейшей термокомпенсации в амперметре

ка, невысокую перегрузочную способность (при перегрузке обычно перегорают токоподводящие пружинки или растяжки), подверженность влиянию температуры. Наиболее неблагоприятным в отношении влияния температуры является амперметр с шунтом. При неизменном токе с повышением температуры сопротивления измерительного механизма и шунта меняются по-разному, вследствие чего происходит перераспределение токов между шунтом и подвижной катушкой. Для уменьшения возникающей температурной погрешности применяют схемы термокомпенсации, простейшая из которых показана на

рис. 8.3. Здесь уменьшение температурной погрешности достигается за счет включения последовательно с измерительным механизмом сопротивления R_d из манганина.

Магнитоэлектрические гальванометры. Гальванометром называется прибор с неградуированной шкалой, имеющий высокую чувствительность к току и напряжению. Высокая чувствительность достигается уменьшением противодействующего момента и использованием светового указателя с большой длиной светового луча.

Шкала не градуируется, поскольку градуировочная характеристика существенно зависит от внешних влияющих факторов. В этом случае в качестве метрологических характеристик гальванометров указывают их чувствительность к току и сопротивление рамки.

В гальванометрах используются как стрелочные, так и световые указатели. Подвижная часть прибора устанавливается на растяжках или крепится на подвесе, что требует установки по уровню.

Существуют три разновидности магнитоэлектрических гальванометров:

- 1) гальванометр постоянного тока — применяется для измерения малых постоянных токов и напряжений, а также в качестве нуль-индикатора в мостах и компенсаторах (потенциометрах) постоянного тока;

- 2) баллистический гальванометр — предназначен для измерения малых количеств электричества, протекающих в течение коротких промежутков времени;
- 3) вибрационный гальванометр — до недавнего времени использовался в качестве нуль-индикатора в мостах и компенсаторах (потенциометрах) переменного тока.

В подавляющем большинстве конструкций гальванометров подвижной частью является рамка с током, и только вибрационный гальванометр может иметь в качестве подвижной части либо постоянный магнит, либо рамку.

Важной характеристикой гальванометров является постоянство нулевого положения указателя, под которым понимают невозвращение указателя к нулевой отметке при плавном его движении от крайней отметки шкалы. По этому параметру гальванометрам присваивают разряд постоянства, который указывают на шкале прибора в виде цифрового обозначения разряда, заключенного в ромб.

Гальванометры должны иметь корректор (для установки указателя на нулевую отметку) и арретир (для фиксации подвижной части в неподвижном положении — например, при переноске). Их необходимо защищать от помех. Так, от механических сотрясений гальванометры защищают, устанавливая их на капитальные стены или специальные фундаменты; от токов утечки — с помощью заземляемых экранов и т. п.

Рассмотрим теорию движения подвижной части гальванометра постоянного тока. Согласно (8.5), уравнение движения подвижной части гальванометра

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = M_{\text{вп}}.$$

В этом выражении вращающий момент $M_{\text{вп}} = BS\omega I$, как для любого магнитоэлектрического прибора (см. ранее). Коэффициент успокоения P определяется двумя составляющими:

$$P = P_1 + P_2,$$

где P_1 — коэффициент успокоения вследствие трения рамки о воздух, который в уже изготовленном приборе является постоянной величиной; P_2 — коэффициент магнитоиндукционного успокоения, определяемый из следующих соображений. При повороте рамки от начального положения на угол α магнитный поток Φ , пронизывающий ее контур, изменится и в обмотке рамки возникнет ЭДС самоиндукции

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -wBS \frac{d\alpha}{dt},$$

поскольку в воздушном зазоре, в котором перемещается рамка, создается радиальное магнитное поле с $\Phi = BS\alpha$.

Если рамка замкнута на внешнее сопротивление, то в образовавшейся с обмоткой рамки цепи возникнет электрический ток, равный

$$i = \frac{e}{R_r + R_{\text{вн}}} = - \frac{wBS}{R_r + R_{\text{вн}}} \frac{d\alpha}{dt},$$

где R_r и $R_{\text{вн}}$ — сопротивления обмотки рамки гальванометра и внешней цепи, на которую она замкнута.

В результате взаимодействия этого тока с полем постоянного магнита измерительного механизма возникает момент успокоения

$$M_{\text{усп2}} = \omega B S i = - \frac{\omega^2 B^2 S^2}{R_r + R_{\text{ин}}} \frac{d\alpha}{dt} = - P_2 \frac{d\alpha}{dt},$$

откуда $P_2 = \frac{\omega^2 B^2 S^2}{R_r + R_{\text{ин}}}$. Таким образом, коэффициент магнитоиндукционного успо-

коения зависит как от сопротивления внешней цепи, так и от конструктивных особенностей магнитоэлектрического измерительного механизма, в частности от индукции в воздушном зазоре.

Представим уравнение движения подвижной части гальванометра в каноническом виде, разделив все его члены на коэффициент при высшей производной:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{P}{J} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{W}{J} \alpha = \frac{BS\omega}{J} I. \quad (8.13)$$

Полученное уравнение является линейным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами и ненулевой правой частью, общее решение которого имеет вид $\alpha = \alpha_{\text{уст}} + \alpha_{\text{св}}$, где $\alpha_{\text{уст}}$ — установившаяся (или вынужденная) составляющая, являющаяся частным решением уравнения (8.13)

и имеющая вид правой части $\left(\alpha_{\text{уст}} = \frac{BS\omega}{W} I \right)$; $\alpha_{\text{св}}$ — свободная составляющая, являющаяся общим решением соответствующего (8.13) однородного уравнения (с нулевой правой частью) и определяемая видом корней характеристического уравнения

$$k^2 + \frac{P}{J} k + \frac{W}{J} = 0,$$

которые в общем виде можно записать как

$$k_1 = -\frac{P}{2J} + \sqrt{\frac{P^2}{4J^2} - \frac{W}{J}},$$

$$k_2 = -\frac{P}{2J} - \sqrt{\frac{P^2}{4J^2} - \frac{W}{J}},$$

где $\sqrt{\frac{W}{J}} = \omega_0$ — частота собственных колебаний подвижной части при отсутствии

успокоения; $\frac{P}{2J} = \delta$ — коэффициент затухания. Корни уравнения в зависимости

от знака подкоренного выражения могут принимать различные значения, которые определяют вид решения исходного уравнения, а следовательно и характер движения подвижной части гальванометра.

Различают три характерных режима работы гальванометра.

$$1. \frac{P^2}{4J^2} - \frac{W}{J} > 0 \text{ или } \beta = \frac{P}{2\sqrt{JW}} > 1,$$

где β — степень успокоения (одна из основных характеристик гальванометра). В этом случае корни характеристического уравнения вещественные и разные.

Общее решение уравнения (8.13) имеет вид

$$\alpha = \frac{BS\omega}{W}I + C_1 \exp(k_1 t) + C_2 \exp(k_2 t), \quad (8.14)$$

где C_1 и C_2 — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий при $t = 0$. Так как в начальный момент рамка находится в покое, то начальными условиями будут

$$\alpha = 0; \quad \frac{d\alpha}{dt} = 0.$$

Выражение (8.14) не содержит периодических функций, вследствие чего движение подвижной части гальванометра будет апериодическим (кривая 3 на рис. 8.4). При этом чем больше коэффициент успокоения P , тем больше будет время достижения конечного равновесного положения.

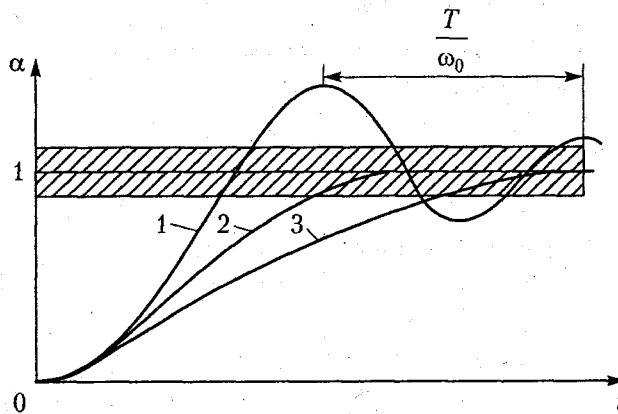


Рис. 8.4. Зависимости угла поворота подвижной части гальванометра от времени при различных режимах его работы

$$2. \quad \frac{P^2}{4J^2} - \frac{W}{J} < 0 \text{ или } \beta = \frac{P}{2\sqrt{JW}} < 1.$$

В этом случае корни характеристического уравнения будут комплексно-сопряженными, а общее решение уравнения (8.13) будет иметь вид

$$\alpha = \frac{BS\omega}{W}I + C_3 \exp(-\delta t) \sin(\omega' t + \theta),$$

где $\delta = \frac{P}{2J}$, $\omega' = \sqrt{\frac{W}{J} - \frac{P^2}{4J^2}}$. Постоянные интегрирования C_3 и θ определяются ана-

логично C_1 и C_2 . Наличие тригонометрической функции указывает на колебательный характер движения подвижной части гальванометра (с круговой частотой ω'). Амплитуда колебаний равна коэффициенту $C_3 \exp(-\delta t)$ при тригонометрической функции и является затухающей функцией времени (кривая 1 на рис. 8.4). Таким образом, при $t = \infty$ амплитуда станет равной нулю и подвижная часть повернется на конечный угол $\alpha = \alpha_{\text{уст}} = \frac{BS\omega}{W}I$.

$$3. \frac{P^2}{4J^2} - \frac{W}{J} = 0 \text{ или } \beta = \frac{P}{2\sqrt{JW}} = 1.$$

Это пограничный (между апериодическим и колебательным режимами), или *критический*, режим работы гальванометра. При этом корни характеристического уравнения вещественные, равные.

Общее решение дифференциального уравнения (8.13) примет вид

$$\alpha = \frac{BS\omega}{W} I + (C_4 + C_5 t) \exp(-\delta t).$$

Постоянные интегрирования C_4 и C_5 определяются так же, как и в двух предыдущих случаях. Рассмотренному случаю соответствует кривая 2 на рис. 8.4, то есть при критическом режиме подвижная часть двигается апериодически, но наиболее ускоренно.

Соответствующий суммарный коэффициент успокоения называется коэффициентом критического успокоения $P_{кр}$. Его значение можно определить из выражения

$$\frac{P_{кр}}{2\sqrt{JW}} = 1; \quad P_{кр} = 2\sqrt{JW}. \quad (8.15)$$

В то же время, как было показано ранее, суммарный коэффициент успокоения $P_{усп} = P_1 + P_2$, и для критического режима

$$P_{кр} = P_1 + \frac{\omega^2 B^2 S^2}{R_r + R_{вн. кр}}, \quad (8.16)$$

где $R_{вн. кр}$ — внешнее критическое сопротивление гальванометра, которое определяется как наибольшее сопротивление внешней цепи, на которое замкнута рамка гальванометра и при котором подвижная часть во время переходного процесса движется апериодически, но наиболее ускоренно. Сопротивление

$$R_r + R_{вн. кр} = R_{кр}$$

называется полным критическим сопротивлением гальванометра. Приравняв выражения (8.15) и (8.16), можно определить $R_{кр}$:

$$R_{кр} = \frac{\omega^2 B^2 S^2}{2\sqrt{JW} - P_1}.$$

На практике работы гальванометра в критическом режиме добиваются изменением сопротивления его внешней цепи.

Отметим, что современные гальванометры постоянного тока позволяют измерять токи в пределах до сотых долей микроампера и напряжения до десятых долей милливольт.

Баллистическим называется гальванометр, отличающийся увеличенным моментом инерции и предназначенный для измерения количества электричества. Конструктивно баллистический гальванометр отличается от обычного гальванометра постоянного тока наличием дополнительной детали подвижной части в виде цилиндра, которая увеличивает ее момент инерции.

Считается, что подвижная часть начинает свое движение после окончания импульса измеряемого тока в обмотке рамки гальванометра.

Анализ работы баллистического гальванометра показывает, что наибольшее отклонение его подвижной части α_{1m} пропорционально количеству электричества Q , прошедшему через рамку прибора:

$$\alpha_{1m} = S_Q Q,$$

где S_Q — баллистическая чувствительность (амплитуда наибольшего отклонения подвижной части гальванометра, выраженная в делениях шкалы, отстоящей от зеркальца на 1 м, и получаемая при прохождении через рамку подвижной части количества электричества 1 Кл). Баллистическая чувствительность зависит от степени успокоения.

Величина, обратная S_Q , носит название постоянной баллистического гальванометра C_Q . Она равна количеству электричества, необходимому для получения α_{1m} в 1 мм шкалы, отстоящей на 1 м от зеркала.

Вибрационный гальванометр представляет собой магнитоэлектрический прибор для измерения переменного тока, подвижная часть которого, обладая очень малым моментом инерции, колеблется с частотой и амплитудой измеряемого тока (в пределах частотного диапазона). Как уже отмечалось, до недавнего времени эти приборы применялись в качестве нуль-индикаторов в мостовых и компенсационных схемах переменного тока, но были вытеснены более точными и удобными электронными милливольтметрами переменного тока и осциллографическими индикаторами нуля.

Магнитоэлектрические логометры. В логометрах противодействующий момент создается электрическим путем. Подвижная часть этих приборов состоит из двух жестко скрепленных между собой рамок, по которым протекают токи I_1 и I_2 . Токи в рамках направлены таким образом, что создаваемые ими моменты действуют навстречу друг другу. Приняв один из моментов вращающим, другой можно считать противодействующим. Хотя бы один из параметров, определяющих значения моментов, должен зависеть от угла поворота подвижной части α . Технически наиболее просто сделать зависящей от угла α магнитную индукцию B . Для этого поле в зазоре должно быть неравномерным, что достигается неравномерностью самого зазора.

В соответствии с (8.9) выражения для моментов M_1 и M_2 можно записать следующим образом:

$$M_1 = B_1(\alpha) S_1 \omega_1 I_1; \quad M_2 = B_2(\alpha) S_2 \omega_2 I_2,$$

где $B_1(\alpha)$ и $B_2(\alpha)$ — функции, выражающие закон изменения индукции для рамок при их перемещении в зазоре. В равновесии вращающий и противодействующий моменты равны друг другу:

$$B_1(\alpha) S_1 \omega_1 I_1 = B_2(\alpha) S_2 \omega_2 I_2,$$

откуда

$$\frac{B_2(\alpha) S_2 \omega_2}{B_1(\alpha) S_1 \omega_1} = \frac{I_1}{I_2}.$$

Выразив отсюда угол поворота α , полученную зависимость можно представить в виде

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right), \quad (8.17)$$

показывающем, что отклонение подвижной части логометра зависит от отношения токов в его обмотках. Отметим, что в логометрах отсутствует механический противодействующий момент, который возвращал бы указатель после измерения на нулевую отметку шкалы.

В настоящее время магнитоэлектрические логометры применяются для измерения больших сопротивлений в приборах, которые называются мегаомметрами. Схема включения логометра в магнитоэлектрическом мегаомметре представлена на рис. 8.5. На этой схеме 1 и 2 — рамки логометра с сопротивлениями R_1 и R_2 ; R_n и R_d — добавочные резисторы, постоянно включенные в схему; R_x — измеряемое сопротивление; U — напряжение источника питания, в качестве которого применяется магнитоэлектрический генератор с ручным приводом, встроенный в корпус прибора. Так как

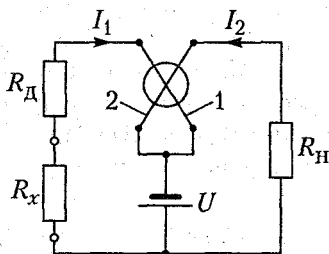


Рис. 8.5. Схема включения логометрического измерительного механизма в магнитоэлектрическом мегаомметре

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_d + R_x}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2 + R_n},$$

то на основании формулы (8.17)

$$\alpha = F\left(\frac{R_2 + R_n}{R_1 + R_d + R_x}\right),$$

то есть угол отклонения подвижной части определяется значением R_x и не зависит от напряжения источника питания U . Класс точности современных мегаомметров составляет 1,0, 1,5.

8.4. Применение магнитоэлектрических приборов для измерений в цепях переменного тока

Высокая чувствительность, точность и малое значение потребляемой мощности выгодно отличают магнитоэлектрические приборы от других электромеханических приборов. Вследствие этого естественно стремление использовать магнитоэлектрические приборы для измерений на переменном токе. Эта задача решается двумя путями: во-первых, уменьшением момента инерции подвижной части, что наблюдается в вибрационных гальванометрах; во-вторых, преобразованием переменного тока в постоянный с последующим его измерением магнитоэлектрическим прибором.

В качестве преобразователей переменного тока в постоянный применяются полупроводниковые диоды, термопреобразователи, электронные лампы, транзи-

сторы, интегральные микросхемы и т. п. В соответствии с типом используемого преобразователя различают выпрямительные, термоэлектрические и электронные приборы (последние будут рассмотрены в главе 9).

Выпрямительные приборы. Эти приборы представляют собой соединение выпрямительного преобразователя и магнитоэлектрического измерительного механизма. В настоящее время в выпрямительных преобразователях используют полупроводниковые диоды (кремниевые и германиевые). По существовавшей до недавнего времени классификации в названии типа выпрямительных приборов использовалась буква Ц (например, Ц4352). В современных условиях возможны и другие обозначения.

В зависимости от схемы включения диодов и измерительного механизма осуществляется одно- или двухполупериодное выпрямление переменного тока. В схемах первого типа (рис. 8.6, а) через измерительный механизм (и диод $VD1$) проходит только прямая полуволна переменного тока, а обратная — пропускается через диод $VD2$ и резистор R ($R = R_{\text{и}}$). Ветвь, состоящая из диода $VD2$ и резистора R , предназначена для выравнивания обеих полуволн тока в общей цепи, а также для защиты диода $VD1$ от пробоя при обратной полуволне напряжения.

В схеме двухполупериодного выпрямления ток через измерительный механизм проходит в обе половины периода, поэтому чувствительность этих схем выше, чем чувствительность однополупериодных. На рис. 8.6, б показана наиболее распространенная схема двухполупериодного выпрямления — мостовая.

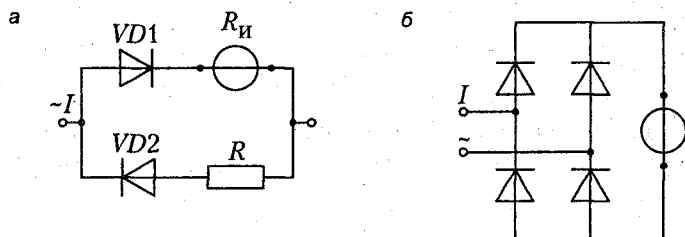


Рис. 8.6. Включение диодов и измерительного механизма: а — при однополупериодном, б — при двухполупериодном выпрямлении

Выпрямительные свойства диода характеризуются коэффициентом выпрямления

$$k_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} = \frac{R_{\text{обр}}}{R_{\text{пр}}},$$

где $I_{\text{пр}}$ и $I_{\text{обр}}$ — токи, протекающие через диод в прямом и обратном направлениях; $R_{\text{пр}}$ и $R_{\text{обр}}$ — прямое и обратное сопротивления диода соответственно. Значение коэффициента выпрямления зависит от приложенного к диоду напряжения, частоты, протекающего тока и температуры окружающей среды.

В мостовых схемах на каждый диод приходится меньшее напряжение, чем в однополупериодных. Это приводит к уменьшению коэффициента $k_{\text{в}}$. Поэтому для измерения малых напряжений применяют схемы однополупериодного выпрямления.

Значение вращающего момента измерительного магнитоэлектрического механизма при протекании по рамке пульсирующего выпрямленного тока, согласно (8.6),

$$M_{\text{врт}} = BS\omega i.$$

Вследствие инерционности подвижной части измерительного механизма ее отклонение будет определяться средним значением вращающего момента, который для схем одно- и двухполупериодного выпрямления соответственно будет равен:

$$M_{\text{врт}} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{врт}} dt = BS\omega \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt = BS\omega \frac{I_{\text{ср}}}{2};$$

$$M_{\text{врт}} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{врт}} dt = BS\omega \frac{1}{T} \int_0^T i dt = BS\omega I_{\text{ср}},$$

где T — период и $I_{\text{ср}}$ — среднее значение измеряемого тока.

Угол поворота подвижной части измерительного механизма определяется по выражению (8.7) и для схем одно- и двухполупериодного выпрямления соответственно будет равен:

$$\alpha = \frac{BS\omega}{W} \frac{I_{\text{ср}}}{2}; \quad \alpha = \frac{BS\omega}{W} I_{\text{ср}}. \quad (8.18)$$

Из выражений (8.18) видно, что отклонение подвижной части выпрямительного прибора пропорционально среднему значению измеряемого тока $I_{\text{ср}}$. При измерениях в цепях переменного тока шкалы приборов, как правило (за исключением специальных приборов), градуируются в действующих (средних квадратических) значениях синусоидального тока (частотой 50 Гц). Среднее и действующее значения переменного тока связаны между собой через коэффициент формы кривой тока

$$k_{\text{ф}} = \frac{I}{I_{\text{ср}}},$$

где I — действующее значение измеряемого тока. Учитывая это, для схемы двухполупериодного выпрямления получим:

$$\alpha = \frac{BS\omega}{Wk_{\text{ф}}} I.$$

Таким образом, при одном и том же действующем значении, но при разной форме измеряемого тока (а значит, разных $k_{\text{ф}}$) угол поворота подвижной части будет разным, то есть показания выпрямительных приборов зависят от формы кривой измеряемого тока (а для вольтметров — напряжения).

К недостаткам выпрямительных приборов относятся также:

- неравномерность шкалы в начальной части (0–15 %), что связано с нелинейностью реальных прямых вольт-амперных характеристик диодов;
- невысокий класс точности (чаще всего 1,5; 2,5), что объясняется нестабильностью характеристик полупроводниковых диодов;
- подверженность влиянию температуры окружающей среды вследствие температурной зависимости вольт-амперных характеристик диодов (снижение влияния температуры обеспечивается специальными схемами термокомпенсации).

В качестве примера на рис. 8.7 приведена схема выпрямительного вольтметра. При увеличении температуры окружающей среды эквивалентное сопротивление выпрямляющего моста уменьшается, что компенсируется увеличением сопротивления добавочного резистора, выполненного частично из меди, частично из марганца. Уменьшение частотной погрешности достигается включением конденсатора C . С повышением частоты усиливается шунтирующее действие емкости диода при его обратном включении, что увеличивает обратный ток через диод при том же значении прямого (уменьшается коэффициент выпрямления). Это уменьшает среднее значение выпрямленного тока, от которого зависит угол поворота подвижной части. Благодаря емкости C , шунтирующей часть резистора R_D , при повышении частоты общий ток вольтметра возрастает, что компенсирует уменьшение выпрямленного тока.

Достоинства выпрямительных приборов являются высокая чувствительность, малое собственное потребление мощности и сравнительно широкий диапазон рабочих частот (до 100 кГц с применением точечных кремниевых диодов и схем частотной компенсации).

Сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма, выпрямительного преобразователя, шунта или добавочного резистора образует выпрямительный амперметр или вольтметр.

Выпрямительные приборы в большинстве случаев выпускают комбинированными и многопредельными. За счет переключений в схеме с помощью переключателей эти приборы позволяют измерять постоянные и переменные токи и напряжения, а также сопротивления по схеме омметра. Наличие многопредельных шунтов и добавочных резисторов позволяет приборам иметь несколько пределов измерения тока и напряжения.

Термоэлектрические приборы. Они представляют собой сочетание одного или нескольких термопреобразователей с магнитоэлектрическим прибором (рис. 8.8). В результате прохождения измеряемого тока I_x по нагревателю 2 выделяется тепловая энергия, которая повышает температуру горячего спая термопары 1. Термоэлектродвижущая сила, вызванная разностью температур горячего спая и холодных концов термопары (а точнее, ток I_m , протекающий в цепи термопары и измерительного механизма), измеряется чувствительным магнитоэлектрическим механизмом. Таким образом, термоЭДС, а следовательно и отклонение подвижной части прибора, функционально связаны с величиной измеряемого тока. Эта зависимость близка к квадратичной. По существовавшей ранее классификации в названии термоэлектрических приборов используется буква Т (например, Т131).

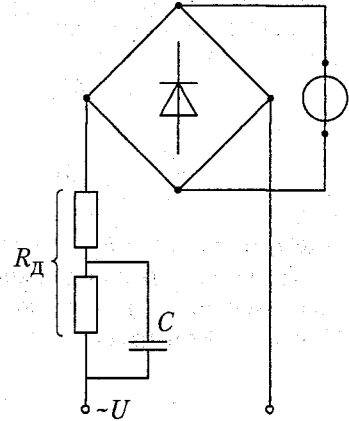


Рис. 8.7. Схема выпрямительного вольтметра

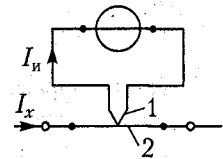


Рис. 8.8. Простейшая схема термоэлектрического прибора

Термопреобразователи различают контактные и бесконтактные. В контактном термопреобразователе термопара имеет тепловой и гальванический контакты с нагревателем. Бесконтактные термопреобразователи, в которых нагреватель и рабочий конец термопары разделены электроизолятором (например, каплей стекла), используются для создания термобатарей, состоящих из нескольких термопар, соединенных последовательно. Это увеличивает термоЭДС преобразователя, однако при последовательном включении термопар сопротивление цепи измерительного механизма увеличивается и существенного выигрыша в чувствительности не получается.

При измерении малых токов используют вакуумные термопреобразователи. В них нагреватель и термопара помещаются в стеклянный баллон, из которого откачан воздух. В результате достигается уменьшение потерь на теплоотдачу в окружающую среду и, следовательно, для нагрева рабочего конца термопары требуется меньшая мощность.

ТермоЭДС E_T пропорциональна мощности P , выделяемой в нагревателе. В свою очередь эта мощность пропорциональна квадрату измеряемого тока I_x . ТермоЭДС создает в цепи термопары и измерительного прибора постоянный ток I_m , который вызывает отклонение подвижной части измерительного механизма α . Таким образом,

$$P = CI_x^2 = C_1 E_1 = C_2 I_4 = C\alpha,$$

где C , C_1 , C_2 и C_3 — постоянные коэффициенты, зависящие от свойств термопары и параметров измерительного прибора, откуда

$$\alpha = f(I_x^2). \quad (8.19)$$

Из формулы (8.19) видно, что показания термоэлектрических приборов пропорциональны квадрату действующего (среднего квадратического) значения измеряемого тока. Однако квадратичный характер шкалы прибора сохраняется лишь на начальном ее участке, а затем искажается по причине увеличения потерь теплоты нагревателем в окружающую среду.

То, что отклонение α связано с действующим (средним квадратическим) значением измеряемого тока, обеспечивает независимость показаний от формы кривой измеряемой величины. Достоинствами приборов являются также высокая чувствительность и широкий частотный диапазон измерений — вплоть до сотен мегагерц. Однако на частотах, начиная с 10 МГц, частотная погрешность увеличивается до 5–10 %. Это объясняется проявлением на высоких частотах поверхностного эффекта, что повышает сопротивление нагревателя, и влиянием собственных емкостей, через которые часть измеряемого тока ответвляется, минуя нагреватель.

Недостатками термоэлектрических приборов являются малая перегрузочная способность, ограниченный срок службы термопар, зависимость показаний приборов от температуры окружающей среды и значительное собственное потребление мощности (в амперметрах на 5 А примерно 1 В·А), вследствие чего шунты для расширения пределов измерения не применяются (как правило, каждый поддиапазон измерений имеет собственный термопреобразователь с соответствующей чувствительностью).

В настоящее время применяются многопредельные термоэлектрические приборы для измерения переменных и постоянных токов от 100 мкА до 100 А классов точности 1,0 и 1,5. В качестве вольтметров термоэлектрические приборы практически не используются из-за небольшой величины входного сопротивления.

8.5. Электромагнитные измерительные преобразователи и приборы

Основной составной частью электромагнитных приборов является электромагнитный измерительный механизм (преобразователь, рис. 8.9), в котором вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитного поля катушки 1, по которой протекает измеряемый ток, и ферромагнитного сердечника 2, эксцентрически закрепленного на оси подвижной части 4. Ферромагнитный сердечник изготавливается из материалов с большой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой (электротехническая сталь, пермаллой).

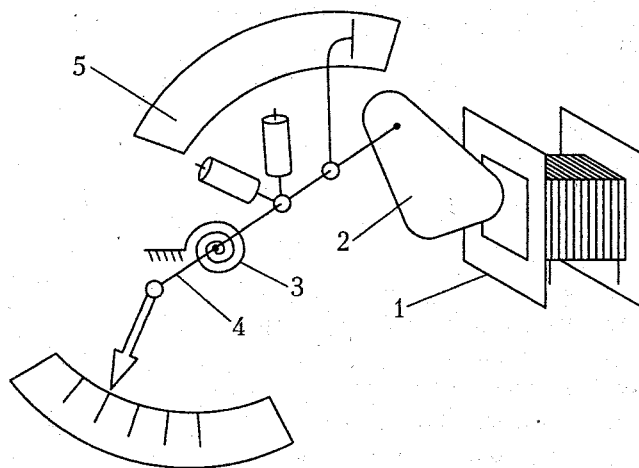


Рис. 8.9. Устройство электромагнитного измерительного механизма

Противодействующий момент создается, как правило, механическим путем с помощью пружины 3. Успокоение обеспечивается либо воздушным успокоителем 5, либо магнитоиндукционным путем. Условное обозначение электромагнитных приборов представлено в табл. 8.1. По существовавшей до недавнего времени классификации в названии типа прибора используется буква Э (например, Э545).

При протекании по катушке тока i сердечник намагничивается и втягивается в зазор катушки, при этом электромагнитная энергия катушки

$$W_{эм} = \frac{Li^2}{2},$$

где L — собственная индуктивность катушки, зависящая от положения сердечника.

Мгновенный вращающий момент в соответствии с выражением (8.2) составит:

$$M_{\text{врт}} = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{Li^2}{2} \right) = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} i^2.$$

При протекающем по катушке постоянном токе I вращающий момент

$$M_{\text{вп}} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2.$$

Если ток синусоидальный ($i = I_m \sin \omega t$), то мгновенное значение вращающего момента

$$M_{\text{врт}} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{4} \frac{dL}{d\alpha} I_m^2 (1 - \cos 2\omega t). \quad (8.20)$$

Как видно из выражения (8.20), мгновенный вращающий момент имеет постоянную и гармоническую составляющие. При этом на частотах свыше 10 Гц подвижная часть измерительного механизма в силу своей инерционности не будет успевать реагировать на изменения тока. Вследствие этого угол поворота подвижной части будет определяться средним за период T значением вращающего момента

$$M_{\text{вп}} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{врт}} dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2, \quad (8.21)$$

где I — действующее значение измеряемого синусоидального тока.

Если по катушке протекает периодический ток с периодом T несинусоидальной формы, который аналитически может быть представлен в виде разложения в ряд Фурье по гармоническим составляющим

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} I_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k),$$

где I_0 — постоянная составляющая; k — номер гармоники; I_{mk} — амплитуда k -й гармоники; $\omega = \frac{2\pi}{T}$, ψ_k — начальная фаза k -й гармоники, то, согласно (8.21), получим для среднего значения вращающего момента следующее выражение:

$$\begin{aligned} M_{\text{вп}} &= \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{врт}} dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T \left[I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} I_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k) \right]^2 dt = \\ &= \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots) = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2. \end{aligned}$$

Здесь I_0, I_1, I_2, \dots — постоянная составляющая и действующие значения гармонических составляющих тока соответственно; I — действующее значение переменного несинусоидального тока.

Поскольку противодействующий момент создается упругим элементом, то в соответствии с (8.3) и (8.7) угол поворота подвижной части (для всех трех рассмотренных видов тока)

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dL}{d\alpha} I^2. \quad (8.22)$$

Из выражения (8.22) вытекает следующее:

- зависимость угла поворота подвижной части от тока нелинейна;
- поворот подвижной части одинаков как при постоянном, так и при переменном токе, имеющем действующее значение, равное значению постоянного тока;
- показание прибора не зависит от формы кривой измеряемого тока.

Линейную зависимость угла поворота α от тока получают для значительной части рабочего диапазона показаний, изготавливая сердечник специальной формы, при которой $\frac{dL}{d\alpha}$ является требуемой функцией α .

Основная область применения электромагнитных измерительных механизмов — это измерение токов (амперметры) и напряжений (вольтметры) промышленной частоты.

В электромагнитных амперметрах катушка измерительного механизма включается непосредственно в цепь измеряемого тока. Щитовые амперметры выпускают с одним диапазоном измерений, переносные, как правило, имеют несколько поддиапазонов. Переход от одного поддиапазона к другому осуществляется переключением секций обмотки катушки, включаемых последовательно или параллельно. При измерении больших переменных токов используют измерительные трансформаторы тока.

Промышленность выпускает переносные амперметры класса точности 0,5 с верхними пределами измерений от 5 мА до 10 А для частот до 1500 Гц (например, Э539); щитовые амперметры классов точности 1,5 и 2,5 для токов до 300 А со встроенными трансформаторами тока и до 10 кА с наружными трансформаторами тока (например, ЭА0702).

Электромагнитный вольтметр состоит из электромагнитного измерительного механизма и включенного последовательно с ним добавочного резистора, предназначенного для обеспечения необходимого диапазона измерений. Верхние пределы измерений изменяют подключением различных добавочных резисторов, а при измерении больших переменных напряжений — с помощью измерительных трансформаторов напряжения.

Угол поворота подвижной части электромагнитного вольтметра

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dL}{d\alpha} \frac{U^2}{Z^2},$$

где Z — полное сопротивление цепи вольтметра (катушки и добавочного резистора).

Промышленностью выпускаются переносные вольтметры класса точности 0,5 с верхними пределами измерений от 1,5 до 600 В в диапазоне частот 45–100 Гц (например, Э545); щитовые вольтметры классов точности 1,5 и 2,5 с верхними пределами измерений от 0,5 до 600 В при непосредственном включении и до 600 кВ — с трансформаторами напряжения для частот от 45 до 1000 Гц (например, ЭВ0702).

Основными достоинствами электромагнитных приборов следует считать возможность работы в цепях как постоянного, так и переменного тока; независимость показаний от формы кривой измеряемой величины; простота конструкции

и, как следствие, высокая надежность и низкая стоимость; способность выдерживать большие перегрузки по току, что объясняется отсутствием токоподводов к подвижной части.

К их недостаткам относят малую точность и низкую чувствительность, большое собственное потребление мощности, узкий диапазон рабочих частот (индуктивное сопротивление катушки с ростом частоты увеличивается, что уменьшает чувствительность измерительного механизма и угол отклонения подвижной части), а также то, что шкала электромагнитных приборов обычно равномерна в пределах 25–100 %.

На работу электромагнитных измерительных механизмов сильное влияние оказывают внешние магнитные поля (поскольку собственное магнитное поле слабое). Для устранения этого влияния применяют магнитное экранирование (измерительный механизм помещают внутрь замкнутой оболочки из ферромагнитного материала, чаще всего — из пермаллоя), иногда используют астатическую конструкцию приборов, на которую внешние (особенно равномерные) поля действуют значительно слабее, чем на обычные механизмы. Кроме того, при измерениях применяют метод взятия двух отсчетов: первый отсчет берется при нормальном положении прибора, а второй — при развернутом на 180° в горизонтальной плоскости — с последующим вычислением среднего значения.

При использовании электромагнитных приборов в цепях постоянного тока появляется погрешность от гистерезиса намагничивания сердечника, проявляющаяся в неодинаковости показаний при увеличении и уменьшении измеряемой величины (тока или напряжения).

В электромагнитных приборах погрешности возникают при изменении температуры окружающей среды и частоты протекающего тока. В амперметрах температурная погрешность связана с изменением упругости пружинок, создающих противодействующий момент, что особенно сильно сказывается в приборах классов точности 0,2; 0,1. В вольтметрах температурная погрешность обусловлена изменением полного сопротивления цепи вольтметра. Частотная погрешность амперметров возникает вследствие действия вихревых токов в сердечнике и других металлических частях измерительного механизма, в которые проникает магнитный поток катушки. У электромагнитных вольтметров частотная погрешность выше, чем у амперметров, что объясняется зависимостями от частоты сопротивлений катушки и добавочного резистора.

Электромагнитные логометры до недавнего времени применялись в частотомерах, однако сильная зависимость показаний от частоты не позволяла изготовлять их с классом точности выше 1,5, поэтому в настоящее время они практически вытеснены гораздо более точными цифровыми частотомерами.

8.6. Электростатические измерительные преобразователи и приборы

В электростатических измерительных преобразователях и приборах вращающий момент создается в результате взаимодействия двух систем заряженных пластин, одна из которых является неподвижной.

Применяются две конструкции электростатических приборов. В первой (рис. 8.10) под действием разности потенциалов подвижные пластины 1 стремятся втянуться между неподвижными 2, при этом изменяется активная площадь взаимодействия пластин (такая конструкция применяется в вольтметрах для измерения низких напряжений — до единиц киловольт). Для увеличения чувствительности при этом применяется световой указатель, зеркальце 3 которого непосредственно крепится на подвижной части. Растяжки 4 создают противодействующий момент. Во второй конструкции разность потенциалов изменяет расстояние между пластинами (эта конструкция применяется в вольтметрах для измерения высоких напряжений — до сотен киловольт — в киловольтметрах).

Условное обозначение электростатических приборов представлено в табл. 8.1. По существовавшей классификации в названии типа прибора используется буква С (например, С511).

Энергия электростатического поля системы заряженных тел

$$W_э = \frac{Cu^2}{2},$$

где C — электрическая емкость между подвижными и неподвижными пластинами; u — напряжение (разность потенциалов) между ними.

Мгновенный вращающий момент, определяемый выражением (8.2), будет равен

$$M_{врт} = \frac{dW_э}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{Cu^2}{2} \right) = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} u^2.$$

Если приложенное напряжение постоянно ($u = U$), то вращающий момент

$$M_{врт} = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} U^2.$$

Если $u = U_m \sin \omega t$, то мгновенное значение вращающего момента

$$M_{врт} = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} U_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{4} \frac{dC}{d\alpha} U_m^2 (1 - \cos 2\omega t). \quad (8.23)$$

Как видно из выражения (8.23), мгновенный вращающий момент имеет постоянную и гармоническую составляющие. При этом на частотах свыше 10 Гц подвижная часть измерительного механизма в силу своей инерционности не будет успевать реагировать на изменения напряжения. Вследствие этого угол поворота подвижной части будет определяться средним за период T значением вращающего момента

$$M_{врт} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{врт} dt = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} U^2, \quad (8.24)$$

где U — действующее значение измеряемого синусоидального напряжения.

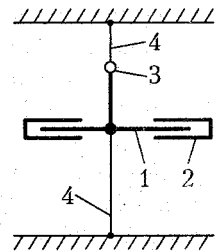


Рис. 8.10.
Устройство
электростатического
о измерительного
механизма

Если измеряется напряжение несинусоидальной формы с периодом T , которое аналитически может быть представлено в виде разложения в ряд Фурье по гармоническим составляющим

$$u = U_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k),$$

где U_0 — постоянная составляющая; k — номер гармоники; U_{mk} — амплитуда k -й гармоники; $\omega = \frac{2\pi}{T}$, ψ_k — начальная фаза k -й гармоники, то, согласно (8.24), для среднего значения вращающего момента получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} M_{\text{вр}} &= \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{вр}t} dt = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T \left[U_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k) \right]^2 dt = \\ &= \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} (U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots) = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} U^2. \end{aligned}$$

Здесь U_0, U_1, U_2, \dots — постоянная составляющая и действующие значения гармонических составляющих напряжения; U — действующее значение переменного несинусоидального напряжения. Поскольку противодействующий момент создается упругим элементом, то в соответствии с (8.3) и (8.7) угол поворота подвижной части (для всех трех рассмотренных видов напряжения)

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dC}{d\alpha} U^2. \quad (8.25)$$

Из выражения (8.25) вытекают следующие положения:

- зависимость угла поворота подвижной части от напряжения нелинейна;
- поворот подвижной части одинаков при постоянном и при переменном напряжении, имеющем действующее значение, равное значению постоянного напряжения;
- показание прибора не зависит от формы кривой измеряемого напряжения.

Линейную зависимость угла поворота α от напряжения получают для значительной части рабочего диапазона показаний, изготавливая подвижные пластины специальной формы. В этом случае $\frac{dC}{d\alpha}$ является требуемой функцией α .

Электростатические приборы применяются главным образом в качестве измерителей напряжения — вольтметров. Измеряемое вольтметром напряжение непосредственно подается на измерительный механизм. Схемы включения электростатических вольтметров обладают некоторыми особенностями. У вольтметров с малыми и средними пределами измерения воздушный зазор между пластинами очень мал, поэтому возникает опасность короткого замыкания пластин, а следовательно и источника измеряемого напряжения, при случайных ударах, тряске и т. п. Для исключения этого внутрь вольтметра встраивается защитный резистор. В этом случае прибор включается в цепь с помощью зажимов 1 и 2 (рис. 8.11, здесь C_V — емкость вольтметра). При измерении напряжений повышенной частоты (сотни килогерц и более) во избежание дополнительной по-

грешности защитный резистор отключается путем включения вольтметра через зажимы 1 и Э (экран).

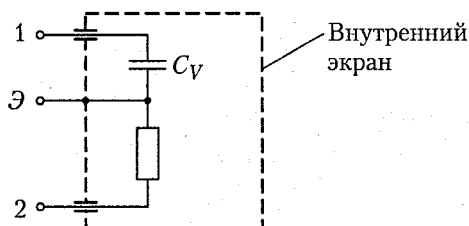


Рис. 8.11. Схема подключения электростатического вольтметра

В настоящее время промышленностью выпускаются несколько типов электростатических вольтметров с верхними пределами измерений от 30 В до 75 кВ классов точности 0,5; 1,0; 1,5 для работы в частотном диапазоне до 30 МГц.

К достоинствам электростатических приборов относится в первую очередь очень малое собственное потребление мощности от измеряемой цепи. При измерении постоянного напряжения оно определяется сопротивлением изоляции между входными зажимами вольтметра (порядка 10^{10} – 10^{14} Ом), при измерении переменного напряжения — зависит от емкости измерительного механизма (приблизительно 3–30 пФ) и частоты измеряемого напряжения. Кроме того, показания электростатических вольтметров не зависят от формы кривой измеряемого напряжения, на них слабое влияние оказывает температура окружающей среды и совершенно не влияют магнитные поля. К достоинствам приборов следует отнести довольно широкий диапазон рабочих частот и возможность изготовления вольтметров для измерения больших напряжений — до сотен киловольт — без применения громоздких, дорогих и потребляющих большую мощность добавочных резисторов и измерительных трансформаторов.

Недостатками электростатических приборов являются малая чувствительность, неравномерность шкалы в пределах только 25–100 % и сильное влияние внешних электростатических полей, для защиты от которых измерительный механизм помещается в заземляемый металлический экран.

Расширение пределов измерений электростатических вольтметров, работающих в цепях переменного тока, достигается при помощи включения добавочных конденсаторов C_d (рис. 8.12, а) или емкостных делителей напряжения C_1 и C_2

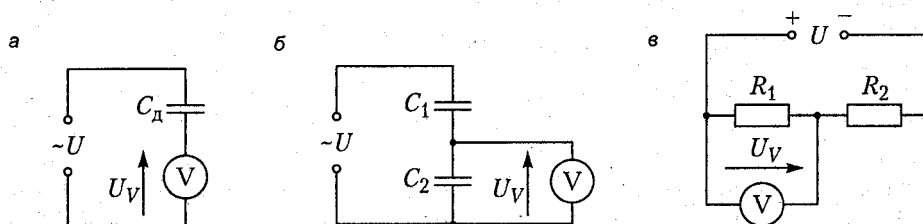


Рис. 8.12. Схемы электростатических вольтметров с использованием: а — добавочных конденсаторов; б — емкостных делителей напряжения; в — омических делителей

(рис. 8.12, б), в цепях постоянного тока — посредством омических делителей напряжения R_1 и R_2 (рис. 8.12, в).

Для схемы, изображенной на рис. 8.12, а, можно записать:

$$U_V = U \frac{C_d}{C_V + C_d}.$$

Собственная емкость вольтметра C_V изменяется в соответствии с поворотом подвижной части. Кроме того, в конденсаторах возникают потери, зависящие от частоты. Поэтому при использовании добавочных конденсаторов погрешности измерений существенно возрастают.

Для схемы с емкостным делителем напряжения (рис. 8.12, б) получим:

$$U_V = U \frac{C_1}{C_V + C_1 + C_2}.$$

Если выбрать емкость $C_2 \gg C_V$, то отношение напряжений — измеряемого и отображаемого на шкале вольтметра — останется постоянным для всех значений измеряемого напряжения. В этом случае включение емкостного делителя напряжения не будет искажать показания вольтметра.

8.7. Электродинамические и ферродинамические измерительные преобразователи и приборы

Принцип действия электродинамических и ферродинамических приборов практически одинаков. Вращающий момент в них возникает в результате взаимодействия магнитных полей неподвижных и подвижных (одной или двух) катушек с токами. Различие заключается лишь в том, что в ферродинамических приборах неподвижные катушки расположены на сердечнике из ферромагнитного материала, который набирается из листов электротехнической стали или пермаллоя, что существенно увеличивает магнитный поток, а следовательно и вращающий момент.

Число подвижных катушек зависит от способа создания противодействующего момента. Если противодействующий момент создается механическим путем с помощью упругого элемента (пружинки), то подвижная часть имеет одну катушку. Если противодействующий момент создается электрическим путем, то измерительный механизм включает две подвижные катушки и называется логометром.

Нужная степень успокоения обеспечивается с помощью воздушного (как правило, у электродинамических приборов) или магнитоиндукционного успокоителей.

Условные обозначения электродинамических и ферродинамических приборов представлены в табл. 8.1. По существовавшей до недавнего времени классификации в названии типа прибора использовалась буква Д (например, Д5103). В современных условиях возможны и другие обозначения.

Электродинамический измерительный механизм с механическим противодействующим моментом. Электродинамический измерительный механизм (рис. 8.13) содержит две электрически последовательно соединенные неподвижные катушки 1, разделенные воздушным зазором, и одну подвижную катушку 2, в обесточенном состоянии находящуюся под углом β (обычно 135°) к горизонтальной плоскости.

От расстояния между неподвижными катушками зависит конфигурация магнитного поля, что влияет на характер шкалы. Ток к подвижной катушке подводится через пружинки, создающие противодействующий момент.

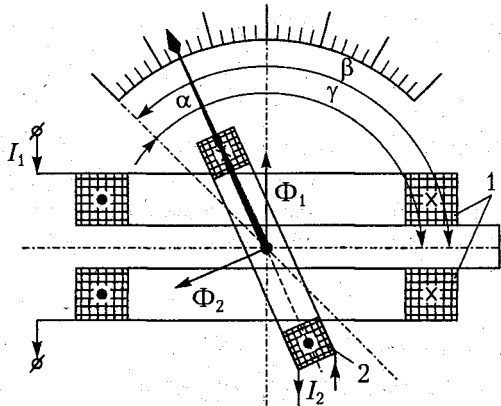


Рис. 8.13. Устройство электродинамического измерительного механизма с механическим противодействующим моментом

При протекании токов (в общем случае разных) в обмотках катушек измерительного механизма электромагнитная энергия двух контуров определится выражением

$$W_{\text{эм}} = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + M_{12} i_1 i_2,$$

где L_1 и L_2 — собственные индуктивности неподвижных и подвижной катушек соответственно; M_{12} — взаимная индуктивность неподвижных и подвижной катушек; i_1 и i_2 — токи, протекающие в обмотках неподвижных и подвижной катушек.

Поскольку собственные индуктивности катушек не зависят от угла поворота α подвижной части, то значение вращающего момента, согласно выражению (8.2),

$$M_{\text{врт}} = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha} = \frac{dM_{12}}{d\alpha} i_1 i_2.$$

Если по катушкам протекают постоянные токи I_1 и I_2 , то создаваемый ими вращающий момент

$$M_{\text{врт}} = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2.$$

Если токи синусоидальные, $i_1 = I_{m1} \sin \omega t$ и $i_2 = I_{m2} \sin(\omega t - \psi)$, где ψ — угол сдвига фаз между ними, то мгновенный вращающий момент

$$\begin{aligned} M_{\text{врт}} &= \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_{m1} \sin \omega t I_{m2} \sin(\omega t - \psi) = \\ &= \frac{1}{2} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_{m1} I_{m2} [\cos \psi - \cos(2\omega t - \psi)]. \end{aligned} \quad (8.26)$$

Как видно из выражения (8.26), мгновенный вращающий момент имеет постоянную и гармоническую составляющие. При этом на частотах свыше 10 Гц подвижная часть измерительного механизма в силу своей инерционности не будет успевать реагировать на изменения тока. Вследствие этого угол поворота подвижной части будет определяться средним за период T значением вращающего момента

$$\begin{aligned} M_{\text{вп}} &= \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{врт}} dt = \frac{1}{2} \frac{dM_{12}}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T I_{m1} I_{m2} [\cos \psi - \cos(2\omega t - \psi)] dt = \\ &= \frac{1}{2} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_{m1} I_{m2} \cos \psi = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2 \cos \psi, \end{aligned}$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов i_1 и i_2 соответственно.

Если по катушкам протекают периодические токи несинусоидальной формы, которые аналитически можно представить в виде разложений в ряды Фурье по гармоническим составляющим, то средний вращающий момент будет определяться суммой слагаемых, содержащих произведения действующих значений токов одной частоты (для каждой гармоники):

$$M_{\text{вп}} = \frac{dM_{12}}{d\alpha} (I_{01} I_{02} + I_{11} I_{12} \cos \psi_1 + I_{21} I_{22} \cos \psi_2 + \dots),$$

где I_{01}, I_{02} — постоянные составляющие токов в катушках; I_{11}, I_{21}, \dots — действующие значения гармонических составляющих тока, протекающего по обмоткам неподвижных катушек; I_{12}, I_{22}, \dots — действующие значения гармонических составляющих тока, протекающего по обмотке подвижной катушки; ψ_1, ψ_2, \dots — углы фазовых сдвигов между соответствующими гармоническими составляющими токов в подвижной и неподвижных катушках.

В измерительных механизмах с механическим противодействующим моментом угол поворота подвижной части в соответствии с (8.3) и (8.7) будет равен:

□ при постоянных токах

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2; \quad (8.27)$$

□ при синусоидальных токах

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2 \cos \psi; \quad (8.28)$$

□ при несинусоидальных токах

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} (I_{01} I_{02} + I_{11} I_{12} \cos \psi_1 + I_{21} I_{22} \cos \psi_2 + \dots). \quad (8.29)$$

Из уравнений (8.27)–(8.29) следует:

1. При одновременном изменении направлений токов I_1 и I_2 знак угла отклонения не меняется, то есть электродинамические измерительные механизмы могут применяться для измерений в цепях как постоянного, так и переменного токов.
2. Характер шкалы прибора зависит от произведения токов, протекающих в катушках, от формы катушек и их взаимного расположения.

Фактически, вид зависимостей (8.27)–(8.29) будет справедлив и для ферродинамических измерительных механизмов, только коэффициенты пропорциональности перед произведением токов и $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$ будут включать в себя помимо удельного противодействующего момента W еще и компоненты, учитывающие наличие магнитопровода в неподвижной катушке.

Электродинамические и ферродинамические измерительные механизмы с одной подвижной катушкой применяются для измерения токов (амперметры), напряжения (вольтметры), мощности (ваттметры), а также для измерения энергии на постоянном токе (счетчики энергии постоянного тока).

Электродинамические амперметры и вольтметры. В электродинамических и ферродинамических амперметрах неподвижные и подвижную катушки электрически соединяют либо последовательно, либо параллельно. При последовательном соединении в выражениях (8.27)–(8.29) $I_1 = I_2 = I$, $\psi = 0$, $\cos \psi = 1$ ($\psi_k = 0$, $\cos \psi_k = 1$), то есть для постоянных, синусоидальных и несинусоидальных токов получаем одну формулу для угла поворота подвижной части:

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I^2, \quad (8.30)$$

где I — либо значение постоянного тока, либо действующее значение синусоидального тока, либо действующее значение несинусоидального тока (в зависимости от того, какой ток протекает по обмоткам катушек).

Как видно из выражения (8.30), зависимость $\alpha = f(I)$ нелинейна. Для получения линейной зависимости $\alpha = f(I)$, а следовательно и равномерной шкалы, неподвижные катушки располагают таким образом, чтобы зависимость $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$ от α

корректировала функцию (8.30), приближая ее к линейной. На практике этого удается достичь в пределах 25–100 % от длины шкалы.

При параллельном соединении подвижной и неподвижных катушек необходимо обеспечить компенсацию температурной и частотной погрешностей, возникающих вследствие перераспределения токов между катушками при изменении температуры и частоты. При выполнении условий компенсации $I_1 = c_1 I$, $I_2 = c_2 I$ (c_1, c_2 — коэффициенты пропорциональности) $\cos \psi = 1$ ($\cos \psi_k = 1$) для угла поворота подвижной части получим:

$$\alpha = \frac{c_1 c_2}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I^2.$$

Равномерность шкалы достигается тем же способом, что и в случае последовательного включения катушек.

Чаще всего выпускаются электродинамические амперметры с двумя поддиапазонами измерений. Их переключение осуществляется изменением способа включения неподвижных катушек (последовательно или параллельно). Для расширения пределов измерения применяют измерительные трансформаторы тока. Промышленностью выпускаются электродинамические амперметры с верхними пределами измерения от 5 мА до 20 А классов точности 0,1 и 0,2 в частотном диапазоне до 1500 Гц (Д5090).

В электродинамическом вольтметре все катушки измерительного механизма и добавочный резистор включаются последовательно. Угол поворота подвижной части для вольтметра определяется как

$$\alpha = \frac{1}{WZ^2} \frac{dM_{12}}{d\alpha} U^2,$$

где Z — полное сопротивление цепи вольтметра, включая сопротивления катушек и добавочного резистора; U — измеряемое напряжение (это значение постоянного напряжения либо действующее значение синусоидального или несинусоидального напряжения в зависимости от рода измеряемой величины). Равномерность шкалы достигается тем же способом, что и в амперметрах, но так же, как и в амперметрах, лишь в пределах 25–100 % ее длины.

В многопредельных вольтметрах используют секционированные добавочные резисторы. Для обеспечения перехода от одного предела измерения к другому приборы снабжают переключателями пределов или несколькими входными зажимами. Для увеличения верхнего предела измерения вольтметра применяют измерительные трансформаторы напряжения.

Промышленность выпускает многопредельные электродинамические вольтметры с верхними пределами от 1,5 до 600 В классов точности 0,1 и 0,2 в рабочем диапазоне частот до 1500 Гц (Д5103).

Основными достоинствами электродинамических амперметров и вольтметров следует считать возможность измерения с высокой точностью как на постоянном, так и на переменном токе; независимость показаний от формы кривой измеряемого тока или напряжения; высокую стабильность свойств. Вследствие этого электродинамические амперметры и вольтметры применяются для точных измерений в цепях переменного и постоянного тока, а также для поверки и градуировки других менее точных приборов.

Однако электродинамические приборы имеют низкую чувствительность (по сравнению с магнитоэлектрическими приборами), поскольку собственное магнитное поле невелико. Вследствие этого они обладают большим собственным потреблением мощности от объекта измерения, их характеризуют сильная подверженность влиянию внешних магнитных полей (способы защиты те же, что и для электромагнитных приборов: экранирование, применение астатических конструкций и метода двух отсчетов), а также малая перегрузочная способность по току.

Следует отметить наличие температурной и частотной погрешностей у электродинамических приборов. Особенно это относится к амперметрам с параллельным соединением катушек и вольтметрам. При изменении температуры и частоты происходит перераспределение токов в параллельно соединенных катушках

амперметра и изменение полного сопротивления цепи вольтметра. Термокомпенсация осуществляется подбором сопротивлений добавочных резисторов из манганина и меди, включаемых в каждую из параллельных ветвей амперметра так, чтобы температурные коэффициенты сопротивления этих ветвей были одинаковыми, и уменьшением сопротивления катушки вольтметра (правда, это приводит к увеличению тока, потребляемого прибором). Компенсация частотной погрешности достигается включением добавочных катушек индуктивности или конденсаторов в соответствующие ветви схемы амперметра (для выравнивания постоянных времени этих ветвей) и шунтированием части добавочного резистора конденсатором в вольтметрах. Ферродинамические приборы отличаются от электродинамических наличием у неподвижных катушек магнитопровода из магнитомягкого листового материала. Это существенно увеличивает магнитный поток и вращающий момент, что обеспечивает ферродинамическим приборам ряд преимуществ. Они имеют более высокую чувствительность, меньшее собственное потребление мощности и меньшую подверженность влиянию внешних магнитных полей (благодаря наличию магнитопровода увеличивается собственное магнитное поле, кроме того, сам магнитопровод может играть роль экрана). В то же время использование ферромагнитного сердечника приводит к появлению дополнительных погрешностей, связанных, например, с нелинейностью кривой намагничивания, с гистерезисом при работе на постоянном токе и т. д.

Область применения ферродинамических амперметров и вольтметров — измерение переменных токов и напряжений в узком диапазоне частот при тяжелых условиях эксплуатации (тряске, вибрациях, ударах). Промышленностью до недавнего времени выпускались щитовые (классов точности 1,5 и 2,5) и переносные (класса 0,5) ферродинамические амперметры и вольтметры, работавшие в узком, установленном нормативными документами, диапазоне частот (45–55 Гц или 450–550 Гц). В настоящее время выпуск ферродинамических амперметров и вольтметров практически прекращен.

Электродинамические и ферродинамические ваттметры. Из выражения для мощности на постоянном токе $P = UI$ видно, что ее можно измерить косвенным методом с помощью амперметра и вольтметра. В этом случае необходимо производить одновременный отсчет по двум приборам с последующим вычислением, снижающим точность измерения. Наличие нескольких катушек позволяет использовать электродинамические и ферродинамические измерительные механизмы для измерения мощности. Такие приборы называются ваттметрами, их применяют для измерения мощности в цепях постоянного и однофазного переменного тока.

На рис. 8.14, *a* показана схема включения в цепь электродинамического (или ферродинамического) измерительного механизма, применяемая в ваттметре. Последовательно соединенные неподвижные катушки 1 включают последовательно с нагрузкой Z , потребляемая мощность в которой измеряется (они называются последовательной цепью ваттметра). Подвижная катушка 2 с добавочным резистором R_d включается параллельно нагрузке. Цепь подвижной катушки называется параллельной цепью ваттметра.

На основании выражения (8.27) при данном способе включения катушек в цепь, когда $I_1 = I$, а $I_2 = I_U = U/(R_U + R_d)$, где I_U и R_U — ток и сопротивление под-

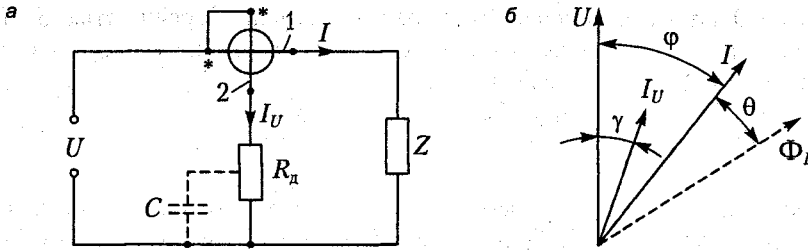


Рис. 8.14. Электродинамический (или ферродинамический) ваттметр: а — схема включения; б — векторная диаграмма

вижной катушки 2, для ваттметра, работающего на постоянном токе, угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} \frac{UI}{R_U + R_d} = SP,$$

где $P = UI$ — измеряемая мощность; $S = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} \frac{1}{R_U + R_d}$ — чувствительность ваттметра. Добиваясь конструктивным путем $\frac{dM_{12}}{d\alpha} = \text{const}$, обеспечивают равномерность шкалы прибора.

При работе на переменном токе вектор тока I_U параллельной цепи ваттметра будет отставать от вектора напряжения U на угол γ вследствие некоторой индуктивности подвижной катушки (рис. 8.14, б). Поэтому в выражении (8.28) $\psi = \varphi - \gamma$, и в целом для α получим:

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} II_U \cos(\varphi - \gamma),$$

где φ — угол фазового сдвига между током и напряжением в нагрузке (при ее индуктивном характере).

Ток в параллельной цепи ваттметра, исходя из векторной диаграммы (см. рис. 8.14, б), определяется выражением

$$I_U = \frac{U}{R_U + R_d} \cos \gamma.$$

Принимая $\frac{dM_{12}}{d\alpha} = \text{const}$, получим:

$$\alpha = SUI \cos(\varphi - \gamma) \cos \gamma. \quad (8.31)$$

Из выражения (8.31) следует, что отклонение подвижной части ваттметра α пропорционально активной мощности на переменном токе ($P = UI \cos \varphi$) в двух случаях: при $\gamma = \varphi$ и $\gamma = 0$. Обеспечить первый вариант оказывается непросто, поскольку угол φ зависит от характера нагрузки и в общем случае может быть любым в пределах от -90° до $+90^\circ$. Условие $\gamma = 0$ может быть выполнено включением конденсатора C соответствующей емкости, шунтирующего часть добавочного резистора R_d (см. рис. 8.14, а). Однако $\gamma = 0$ лишь при определенной частоте. С изменением частоты это условие нарушается.

При $\gamma \neq 0$ ваттметр измеряет мощность с угловой погрешностью δ_γ . При малом значении угла γ (обычно не более $40-50'$) можно принять $\sin \gamma \approx \gamma$, $\cos \gamma \approx 1$, и, соответственно, угловая погрешность

$$\delta_\gamma = \frac{UI \cos(\varphi - \gamma) \cos \gamma - UI \cos \varphi}{UI \cos \varphi} \approx \gamma \operatorname{tg} \varphi. \quad (8.32)$$

Выражение (8.32) показывает, что при углах φ , близких к 90° , угловая погрешность может достигать больших значений. Обычный ваттметр в этом случае будет измерять мощность с существенной погрешностью. Поэтому для измерения активной мощности в нагрузке при углах φ , близких к 90° , применяют специальные малокосинусные ваттметры, в которых обеспечивается малое номинальное значение угла $\varphi_{\text{ном}}$.

Постоянная (цена деления) обычного ваттметра определяется как

$$C = \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{\alpha_{\text{max}}} \text{ [Вт/дел.]}, \quad (8.33)$$

где $U_{\text{ном}}$ и $I_{\text{ном}}$ — номинальные значения напряжения и тока для тех пределов, на которые включен ваттметр; α_{max} — полное число делений шкалы.

Выражение для постоянной малокосинусного ваттметра учитывает величину $\cos \varphi_{\text{ном}}$:

$$C = \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}{\alpha_{\text{max}}} \text{ [Вт/дел.]}. \quad (8.34)$$

Значение $\cos \varphi_{\text{ном}}$ указывается на шкале прибора (например, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,1$).

В ферродинамических ваттметрах угловая погрешность зависит от разности углов γ и θ (см. рис. 8.14, б), где θ — угол между векторами тока I и магнитного потока Φ в рабочем зазоре сердечника.

Еще одна специфическая погрешность ваттметра связана с потребляемой его последовательной и параллельной цепями мощностью, зависящей от способа включения прибора.

При измерении мощности, потребляемой нагрузкой, возможны две схемы включения ваттметра, различающиеся способом включения параллельной цепи (рис. 8.15). Если не учитывать фазовые сдвиги между токами и напряжениями в катушках и считать сопротивление нагрузки чисто активным, то погрешности, обусловленные потреблением мощности катушками ваттметра, определяются следующим образом:

□ для схемы на рис. 8.15, а

$$\delta = \frac{UI_{\parallel} - U_{\parallel} I_{\parallel}}{U_{\parallel} I_{\parallel}} = \frac{P_I}{P_{\parallel}};$$

□ для схемы на рис. 8.15, б

$$\delta = \frac{U(I_V + I_{\parallel}) - U_{\parallel} I_{\parallel}}{U_{\parallel} I_{\parallel}} = \frac{P_U}{P_{\parallel}},$$

где P_I и P_U — мощности, потребляемые последовательной и параллельной цепями ваттметра соответственно; $P_{\parallel} = U_{\parallel} I_{\parallel}$ — мощность, потребляемая нагрузкой.

Таким образом, рассматриваемые погрешности, во-первых, заметны лишь при измерениях мощности в маломощных цепях. Во-вторых, схему включения, показанную на рис. 8.15, а, целесообразно использовать при измерении мощности в высокоомной (по сравнению с сопротивлением последовательной цепи ваттметра) нагрузке, а схему, показанную на рис. 8.15, б, — при измерении мощности в низкоомной (по сравнению с сопротивлением параллельной цепи ваттметра) нагрузке.

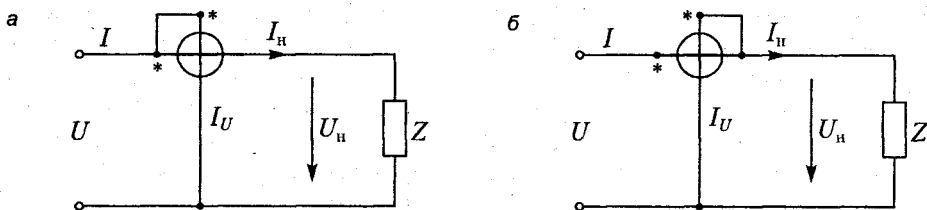


Рис. 8.15. Схемы включения параллельной цепи ваттметра: а — при высокоомной нагрузке; б — при низкоомной нагрузке

Общая погрешность при измерении мощности ваттметром будет определяться инструментальной погрешностью самого прибора и схемой его включения в цепь. Она вычисляется по формуле

$$\delta = \sqrt{\left(k \frac{P_{\text{ном}}}{P_W}\right)^2 + \left(\frac{P_W - P_{\text{И}}}{P_{\text{И}}}\right)^2},$$

где k — класс точности ваттметра; P_W — значение мощности, измеренное ваттметром и определяемое как произведение числа делений, указываемого стрелкой прибора, на постоянную C , которая определяется по формулам (8.33) и (8.34).

Из выражений (8.27)–(8.29) видно, что если поменять направление только одного из токов, то изменится направление отклонения подвижной части измерительного механизма прибора. У ваттметра имеются две пары зажимов (для последовательной и параллельной цепей). В зависимости от их включения в электрическую цепь может меняться направление отклонения указателя прибора. Поэтому для правильного включения ваттметра в цепь один из каждой пары зажимов обозначается знаком «*» (звездочка).

Электродинамические ваттметры выпускают в виде переносных приборов высоких классов точности (0,1; 0,2; 0,5) с несколькими верхними пределами измерения тока и напряжения: чаще всего два для тока (например, 5 и 10 А) и шесть для напряжения (30, 75, 150, 300, 450 и 600 В). Их используют для точных измерений мощности постоянного и переменного тока. При измерениях на больших напряжениях и токах ваттметры включают через измерительные трансформаторы тока (для последовательной цепи) и напряжения (для параллельной цепи).

Промышленностью также выпускаются ферродинамические переносные и щитовые ваттметры более низких классов точности (0,2; 0,5; 1,0). Их применяют главным образом на переменном токе промышленной частоты; на постоянном

токе они имеют значительную погрешность, обусловленную гистерезисом сердечников.

В качестве примера приведем лабораторный ваттметр Д5089 класса точности 0,2 с двумя пределами измерения по току (5 и 10 А) и шестью — по напряжению (см. ранее), а также щитовой ваттметр для измерения активной мощности в трехпроводных сетях трехфазного тока Д8002 класса точности 2,5 с диапазоном измерений до 120 кВт.

Электродинамический и ферродинамический счетчики электрической энергии постоянного тока. Для учета энергии в цепях постоянного тока применяются электродинамические и ферродинамические счетчики электрической энергии.

Электродинамический счетчик состоит из неподвижной двухсекционной и подвижной катушек. Схема включения его в цепь аналогична схеме включения ваттметра. Неподвижная катушка служит для создания равномерного магнитного поля и подключена к шунту, по которому протекает ток нагрузки I . Подвижная катушка через коллекторные пластины, по которым во время вращения катушки скользят щетки, подсоединена вместе с добавочным резистором и компенсационной катушкой (она компенсирует момент трения) параллельно нагрузке. Подвижная катушка состоит из трех секций, пространственно расположенных под углом 120° и электрически соединенных треугольником, и жестко связана с осью вращения.

В ферродинамическом счетчике обмотка неподвижной катушки уложена в пазах цилиндрического сердечника из ферромагнитного материала. Ее магнитный поток замыкается через воздушный зазор и внешний магнитопровод.

Индукция магнитного поля, создаваемого неподвижной катушкой, $B = c_1 I$, где c_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции катушки и параметров шунта. Ток в подвижной катушке $I_n = c_2 U$, где c_2 — коэффициент пропорциональности, зависящий от сопротивлений подвижной катушки и добавочного резистора; U — напряжение на нагрузке.

В результате взаимодействия магнитного поля неподвижной катушки и проводника с током (подвижная катушка) возникает вращающий момент $M_{вр}$, пропорциональный мощности P в нагрузке:

$$M_{вр} = c_3 B I_n = c_4 I U = c_4 P$$

(здесь c_3 и c_4 — коэффициенты пропорциональности, зависящие от конструкции счетчика).

Тормозной момент M_t на оси создается с помощью алюминиевого диска, закрепленного на оси подвижной части и проходящего между полюсами постоянного магнита:

$$M_t = k \frac{d\alpha}{dt},$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, M_t пропорционален скорости вращения $\frac{d\alpha}{dt}$ подвижной части счетчика. Под действием вращающего момента диск начинает вращаться с ускорением, что увеличивает тормозной момент до тех пор, пока моменты не уравно-

везят друг друга ($M_{\text{пр}} = M_r$) и вращение не станет равномерным. При установившейся скорости вращения

$$c_4 P = \frac{d\alpha}{dt}.$$

Интегрируя от t_1 до t_2 :

$$\int_{t_1}^{t_2} c_4 P dt = \int_{t_1}^{t_2} k \frac{d\alpha}{dt} dt,$$

получим:

$$c_4 W = kN,$$

то есть энергия W , израсходованная в нагрузке за интервал времени $(t_2 - t_1)$, пропорциональна числу оборотов подвижной части N :

$$W = CN,$$

где C — действительная постоянная счетчика.

Отсчет энергии производится по показаниям счетчика оборотов подвижной части измерительного механизма, градуированного в единицах энергии. Число оборотов, соответствующее единице электрической энергии (обычно 1 кВт·ч), указывается на лицевой панели счетчика (*передаточное число*).

Электродинамические логометры. В логометрических измерительных механизмах подвижная часть состоит из двух жестко скрепленных между собой под определенным углом катушек, которые включаются в цепь с помощью безмоментных токоподводов по схеме, зависящей от назначения измерительного механизма. Анализ работы логометра показывает, что угол отклонения подвижной части α определяется отношением токов, протекающих через подвижные катушки, и углами фазового сдвига этих токов относительно тока, протекающего через неподвижные катушки.

В настоящее время наиболее часто электродинамические логометры используются в специальных приборах, предназначенных для непосредственного измерения угла сдвига фаз φ между током и напряжением в нагрузке и коэффициента мощности $\cos \varphi$ в однофазной цепи переменного тока, которые называются *фазометрами*. Схема включения такого фазометра показана на рис. 8.16. Если параметры параллельных ветвей подобрать таким образом, чтобы $I_1 = I_2$, а фазовый сдвиг между этими токами был равен пространственному углу между подвижными катушками А и Б логометрического механизма, то угол отклонения подвижной части прибора будет равен углу фазового сдвига между током и напряжением в нагрузке Z . Следовательно, шкала фазометра может быть градуирована в значениях угла φ и $\cos \varphi$.

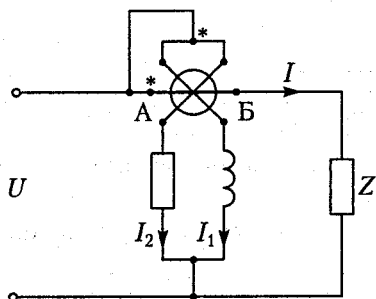


Рис. 8.16. Упрощенная схема электродинамического фазометра

Электродинамические фазометры выпускаются в виде переносных приборов, предназначенных для работы на промышленной частоте,

с диапазоном измерений угла φ , равным $0-90^\circ$ или $0-360^\circ$, и $\cos \varphi$, равным $0-1$ (для индуктивной или емкостной нагрузки), классов точности 0,2 и 0,5.

В симметричных трехфазных цепях применяются специальные трехфазные фазометры, классы точности которых 1,5; 2,5.

В несимметричных трехфазных цепях фазовые сдвиги между током и напряжением измеряют в каждой фазе отдельно. При этом токовые зажимы фазометра включают последовательно в фазу трехфазной цепи, а потенциальные — между фазой и нулевой точкой трехфазной цепи. Если нулевая точка недоступна, то ее создают искусственно.

8.8. Индукционные приборы

Принцип действия индукционных приборов основан на взаимодействии магнитных потоков электромагнитов и вихревых токов, индуцированных магнитными потоками этих электромагнитов в подвижной части.

Условные обозначения индукционных приборов представлены в табл. 8.1. По существовавшей классификации в названии типа прибора используется буква И (например, И440).

В настоящее время для измерений широко применяются индукционные счетчики электрической энергии переменного тока.

Индукционные счетчики электрической энергии переменного тока. На рис. 8.17 в упрощенном виде показано устройство индукционного счетчика. Он состоит из двух электромагнитов 1 и 5, сердечники которых набраны из тонких листов электротехнической стали, алюминиевого диска 3, закрепленного на оси подвижной части, постоянного магнита 4, счетного механизма 2 и других узлов.

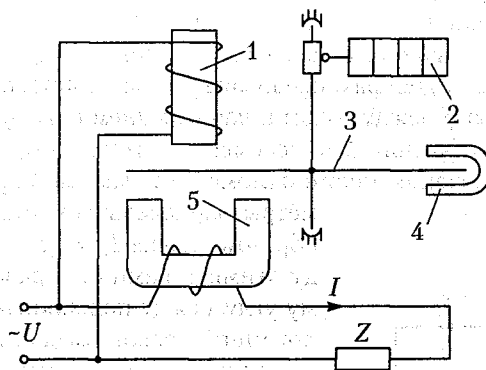


Рис. 8.17. Устройство индукционного счетчика и схема его включения в цепь

Рассмотрим более подробно распределение магнитных потоков в индукционном счетчике (рис. 8.18, а).

Трехстержневой электромагнит 1 имеет обмотку из тонкого медного провода с числом витков порядка 8–12 тысяч, включенную параллельно нагрузке. При прохождении по обмотке тока I_U создается магнитный поток Φ_U , который в ниж-

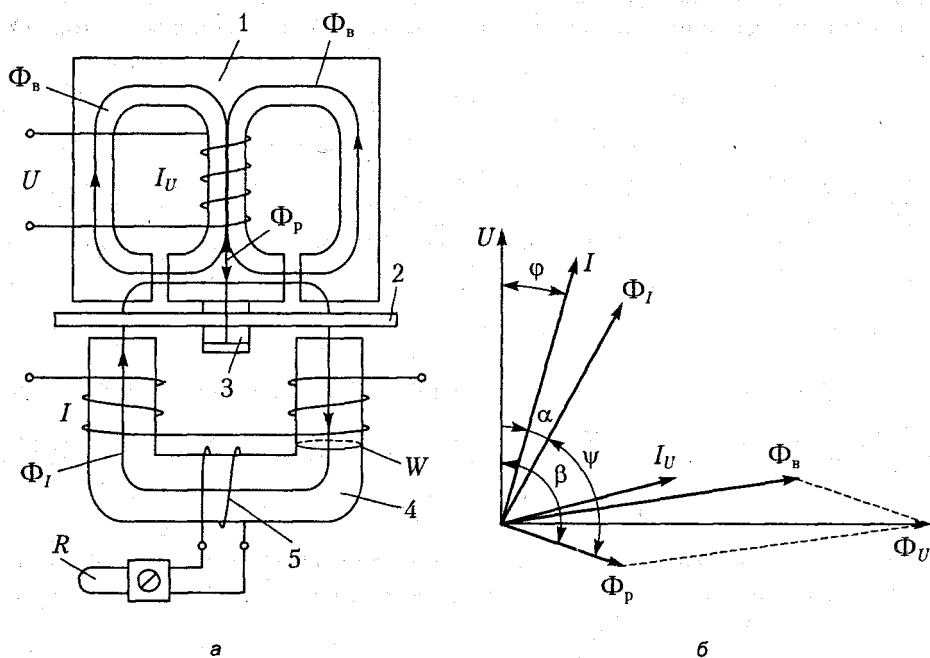


Рис. 8.18. Индукционный счетчик: а — схема; б — векторная диаграмма

ней части среднего сердечника разветвляется на рабочий поток Φ_p и нерабочий, или вспомогательный, поток Φ_v . Рабочий поток Φ_p пронизывает диск 2, индуцируя в нем вихревые токи, и замыкается через стальной противоположный полюс 3. Нерабочий поток Φ_v не пересекает диск, а замыкается через боковые стержни сердечника 1. Он не принимает непосредственного участия в создании вращающего момента и служит для получения необходимого сдвига фаз между потоком Φ_p и напряжением сети U . Обмотка сердечника 1 из-за большого числа витков обладает значительной индуктивностью, и ток в ней I_U отстает от напряжения U на угол, близкий к 90° . Нерабочий поток Φ_v вызывает в сердечнике 1 незначительные потери, поэтому он отстает от тока I_U на небольшой угол ($1-2^\circ$). Рабочий поток Φ_p отстает от этого же тока на существенно больший угол ($20-25^\circ$), поскольку, кроме потерь в стали, имеются активные потери в алюминиевом диске. Поток Φ_U является геометрической суммой потоков Φ_p и Φ_v .

П-образный электромагнит 4 имеет обмотку с небольшим числом витков, выполненную из медного сравнительно толстого провода и включенную последовательно с нагрузкой цепи Z . По этой обмотке проходит ток нагрузки I , который при ее активно-индуктивном характере (наиболее часто встречающийся характер нагрузки) отстает от напряжения U на угол φ (рис. 8.18, б). Ток I создает магнитный поток Φ_p , который отстает от тока I на угол α (порядка $5-15^\circ$) из-за наличия потерь в стали электромагнита. Поток Φ_I дважды пересекает диск 2 (рис. 8.18, а), индуцируя в нем вихревые токи, которые, согласно закону электромагнитной индукции, отстают по фазе от потока на угол 90° (сопротивление диска считается чисто активным).

Дальнейший анализ работы индукционного счетчика показывает, что значение вращающего момента зависит от взаимодействия магнитных потоков Φ_I и Φ_p и от угла сдвига фаз между ними ψ и вычисляется согласно выражению

$$M_{\text{вр}} = k' \Phi_p \Phi_I \sin \psi, \quad (8.35)$$

где k' — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции электромагнитов и диска.

Из-за наличия воздушных зазоров сердечники обоих электромагнитов находятся в ненасыщенном состоянии, поэтому потоки Φ_I и Φ_p будут пропорциональны токам в обмотках, то есть

$$\Phi_I = k_I I; \quad \Phi_p = k_U I_U \frac{U}{Z_U},$$

где Z_U — полное сопротивление параллельной обмотки, которое при неизменной частоте — величина постоянная.

Подставляя значения потоков в уравнение (8.35) и объединяя постоянные, получим:

$$M_{\text{вр}} = kUI \sin \psi.$$

Для того чтобы показания счетчика соответствовали потребляемой нагрузкой энергии, его вращающий момент должен быть пропорционален активной мощности переменного тока, то есть

$$M_{\text{вр}} = kUI \cos \varphi = kP. \quad (8.36)$$

Для этого необходимо, чтобы $\sin \psi = \cos \varphi$, а это будет в том случае, если угол сдвига фаз между потоками Φ_I и Φ_p

$$\psi = 90^\circ - \varphi. \quad (8.37)$$

Из векторной диаграммы, приведенной на рис. 8.18, б, следует, что $\psi = \beta - \alpha - \varphi$. Таким образом, для выполнения условия (8.37) угол $\beta - \alpha$ должен быть равен 90° .

Выполнение этого условия достигается конструкцией электромагнита 1, которая позволяет получить угол $\beta > 90^\circ$. Для регулировки угла α на электромагнит 4 (рис. 8.18, а) накладывают короткозамкнутые витки w и обмотку 5, замкнутую на проволочный резистор R , выполненный в виде петли с перемещающимся контактом. Регулируя сопротивление R , меняют потери на пути потока Φ_I и, следовательно, изменяют угол α , добиваясь, таким образом, равенства $\beta - \alpha = 90^\circ$ и выполнения условия (8.37), а значит и соотношения (8.36).

Роль противодействующего момента в счетчиках выполняет тормозной момент M_τ , возникающий при вращении алюминиевого диска 3 подвижной части в поле постоянного магнита 4 (см. рис. 8.17). Так как значения индуцируемых в диске вихревых токов пропорциональны скорости изменения магнитного потока, то есть скорости вращения диска $\frac{d\alpha}{dt}$, то тормозной момент определяется выражением

$$M_\tau = k_1 \frac{d\alpha}{dt}, \quad (8.38)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности.

Под действием вращающего момента диск начинает вращаться с ускорением, что увеличивает тормозной момент до тех пор, пока моменты не уравновесят друг друга ($M_{\text{тр}} = M_{\text{в}})$ и вращение не станет равномерным. С учетом зависимостей (8.36) и (8.38) имеем

$$kP = k_1 \frac{d\alpha}{dt} \text{ или } Pdt = \frac{k_1}{k} d\alpha.$$

Интегрируя последнее равенство в пределах интервала времени Δt , получим:

$$W = CN,$$

где W — энергия, израсходованная в нагрузке за интервал времени Δt ; N — число оборотов диска за этот же интервал времени; C — постоянная счетчика.

Отсчет энергии производится по показаниям счетного механизма 2 (рис. 8.17) — счетчика оборотов, градуированного в единицах энергии. Единице электрической энергии (обычно 1 кВт · ч), регистрируемой счетным механизмом, соответствует определенное число оборотов подвижной части счетчика (диска). Это соотношение, которое называется *передаточным числом* A , указывается на лицевой панели счетчика.

В настоящее время промышленностью выпускается довольно большое количество типов индукционных счетчиков, среди которых отметим СА4У-И682, СА4У-И670М и СР4У-И689.

Основные характеристики счетчиков электрической энергии. Величина, обратная передаточному числу, то есть отношение зарегистрированной энергии к числу оборотов диска, называется *номинальной постоянной* $C_{\text{ном}}$. Значения A и $C_{\text{ном}}$ зависят только от конструкции счетного механизма и для данного счетчика остаются неизменными.

Количество энергии, действительно прошедшее через счетчик за один оборот подвижной части, называется *действительной постоянной* C . Действительная постоянная зависит от тока нагрузки, частоты и внешних условий (температуры, давления и т. д.). Зная значения C и $C_{\text{ном}}$, можно определить относительную погрешность (в процентах) счетчика:

$$\delta = \frac{W' - W}{W} \cdot 100 = \frac{C_{\text{ном}} - C}{C} \cdot 100,$$

где W' — энергия, измеренная счетчиком; W — действительное значение энергии, прошедшей через счетчик.

В соответствии с ГОСТ 6570-96 счетчики активной энергии должны выпускаться классов точности 0,5; 1,0; 2,0 и 2,5 (с 01.07.97 выпуск счетчиков класса 2,5 прекращен); счетчики реактивной энергии — 1,5; 2,0 и 3,0.

Для каждого класса точности счетчиков нормативными документами установлен *порог чувствительности* (в процентах) счетчика, определяемый как

$$\Delta S = \frac{100 I_{\text{мин}}}{I_{\text{ном}}},$$

где $I_{\text{мин}}$ и $I_{\text{ном}}$ — минимальное значение тока, при котором диск счетчика начинает безостановочно вращаться, и номинальное для счетчика значение тока в токовой обмотке соответственно. Порог чувствительности определяется при номиналь-

ных значениях напряжения и частоты, $\cos \varphi = 1$. Например, для счетчиков класса точности 1,0 значение $\Delta S \leq 0,4 \%$, а для счетчиков классов точности 1,0 и 2,0 — $\Delta S \leq 0,5 \%$. *Самоходом* называется вращение диска при отсутствии тока в нагрузке, но при наличии напряжения в параллельной цепи счетчика. Такое явление возникает, если момент, компенсирующий действие момента трения, превосходит сам момент трения. В соответствии с установленными требованиями самохода не должно быть при любом напряжении от 80 до 110 % от номинального.

Под действием внешних факторов у счетчиков появляются дополнительные погрешности, возникающие вследствие искажения формы кривой тока и напряжения, колебаний напряжения и частоты, резкого перепада мощности в нагрузке и т. п.

Кроме однофазных индукционных счетчиков промышленностью выпускаются также трехфазные счетчики активной и реактивной энергии. Трехфазные счетчики представляют собой, фактически, три (трехэлементные) или два (двухэлементные) счетчика, объединенных одной осью вращения. Двухэлементные счетчики применяют при измерении энергии в трехпроводных трехфазных цепях, а трехэлементные — в четырехпроводных цепях (с нулевым проводом).

ГЛАВА 9 Электронные аналоговые приборы

Электронные аналоговые приборы представляют собой средства измерений, в которых сигналы измерительной информации преобразуются с помощью аналоговых электронных устройств (преобразователей). С помощью этих устройств удается обеспечить высокий уровень метрологических характеристик приборов, в том числе высокую чувствительность, широкий диапазон измерений, большое входное сопротивление и малое потребление мощности от измерительной цепи.

9.1. Электронные вольтметры

В электронных вольтметрах измеряемое напряжение с помощью электронного измерительного преобразователя преобразуется в постоянный ток, который подается на магнитоэлектрический измерительный механизм со шкалой, градуированной в единицах напряжения — вольтах. По назначению и принципу действия электронные вольтметры подразделяют на вольтметры для измерения постоянного напряжения, переменного напряжения, универсальные, импульсные и селективные.

Упрощенная структурная схема вольтметра для измерения постоянного напряжения показана на рис. 9.1. Здесь ВД — входной многопредельный делитель напряжения, УПТ — усилитель постоянного тока, ИП — магнитоэлектрический прибор, угол отклонения подвижной части которого $\alpha = k_V U_x$, где k_V — коэффициент преобразования электронного вольтметра, U_x — измеряемое напряжение.

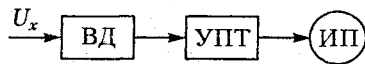


Рис. 9.1. Упрощенная структурная схема вольтметра для измерения постоянного напряжения

Входной делитель и усилитель постоянного тока обеспечивают высокое входное сопротивление (вплоть до 1 ГОм) и расширение диапазона измеряемых на-

пряжений. Усилитель постоянного тока имеет большое входное и малое выходное сопротивление. Он должен обеспечивать необходимый и стабильный коэффициент усиления и, следовательно, высокую чувствительность вольтметра. Однако повышение чувствительности путем увеличения коэффициента усиления УПТ сталкивается с техническими трудностями, связанными с нестабильностью работы УПТ, выражающейся в изменении коэффициента преобразования и дрейфе «нуля» (самопроизвольном изменении выходного сигнала) усилителя. В связи с этим верхний предел измерений таких вольтметров не бывает ниже единиц милливольт.

Для создания высокочувствительных вольтметров (микровольтметров) применяют схему, представленную на рис. 9.2, а. Здесь М — модулятор, Д — детектор, У — усилитель переменного тока, ИП — магнитоэлектрический прибор. На рис. 9.2, б показана упрощенная временная диаграмма напряжений на выходе отдельных блоков. На выходе модулятора М возникают однополярные импульсные сигналы, амплитуда которых пропорциональна измеряемому напряжению. Переменная составляющая этих сигналов усиливается усилителем переменного тока У, а затем выпрямляется детектором Д.

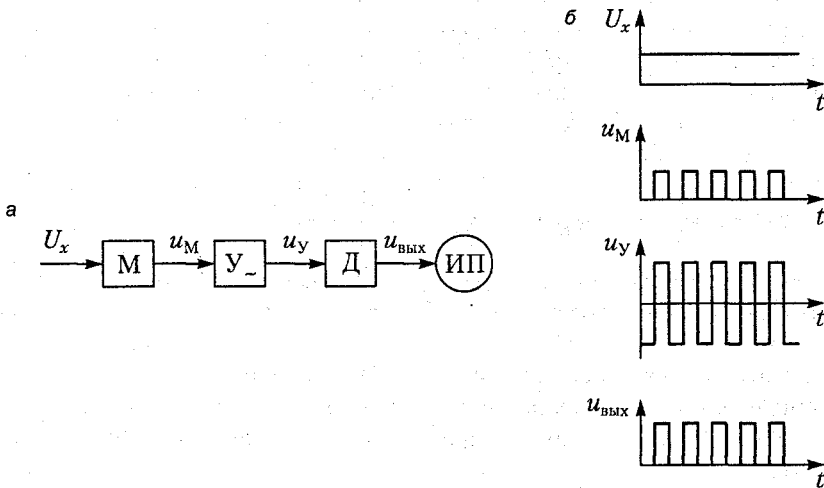


Рис. 9.2. Высокочувствительный электронный вольтметр для измерения постоянного напряжения: а — структурная схема; б — временная диаграмма напряжений

Среднее значение выходного сигнала детектора, пропорциональное входному напряжению $U_{cp} = kU_x$, измеряется магнитоэлектрическим прибором ИП. Такая схема позволяет практически избежать дрейфа «нуля» и имеет стабильный коэффициент усиления, который можно сделать довольно большим. Это позволяет измерять напряжения, начиная с единиц микровольт.

Вольтметры для измерения переменного напряжения выполняют по двум обобщенным структурным схемам, которые различаются своими характеристиками. По одной схеме (рис. 9.3, а) измеряемое напряжение u_x сначала с помощью детектора преобразуется в постоянный ток, который затем подается на УПТ и ИП, являющиеся, по существу, вольтметрами для измерения постоянного на-

пряжения. Детектор, являясь малоинерционным нелинейным звеном, позволяет вольтметру с такой структурой работать в широком частотном диапазоне от десятков герц до 1000 МГц. Однако наличие УПТ в силу отмеченных ранее причин (нестабильность коэффициента преобразования и дрейф «нуля») не позволяет делать такие вольтметры высокочувствительными. Обычно их верхний предел измерений при максимальной чувствительности составляет единицы милливольт. Так, например, вольтметр ВЗ-36 измеряет действующие значения синусоидального напряжения от 3 мВ до 300 В в диапазоне частот до 1 ГГц.

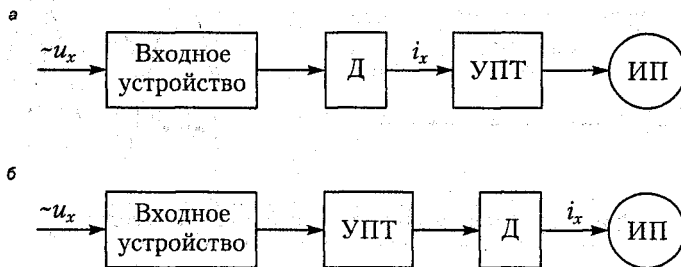


Рис. 9.3. Обобщенные структурные схемы вольтметров для измерения переменного напряжения

По другой схеме (рис. 9.3, б) измеряемое напряжение сначала усиливается усилителем переменного тока, чем удается повысить чувствительность вольтметра, а затем с помощью детектора преобразуется в постоянный ток. Однако создание усилителей переменного тока, работающих в широком частотном диапазоне, является довольно трудной технической задачей. Поэтому, с одной стороны, верхний предел измерений таких вольтметров при максимальной чувствительности составляет десятки микровольт, с другой стороны, их диапазон частот сравнительно невелик (для вольтметра ВЗ-57 диапазон измеряемых напряжений составляет 10 мкВ — 300 В в интервале частот 5 Гц — 5 МГц).

В зависимости от вида преобразования переменного напряжения в постоянный ток на выходе детектора отклонение подвижной части вольтметров может быть пропорционально амплитудному, средневыпрямленному или действующему (среднему квадратичному) значениям измеряемого напряжения. В соответствии с этим вольтметры называют вольтметрами амплитудных, средних или действующих (средних квадратичных) значений соответственно. Однако независимо от вида преобразования шкалы вольтметров, как правило, градуируют в действующих (средних квадратичных) значениях напряжения синусоидальной формы. Между амплитудным U_m , действующим U и средним U_{cp} значениями напряжения определенной формы кривой имеется связь посредством коэффициентов амплитуды k_a и формы k_ϕ :

$$k_a = \frac{U_m}{U}; \quad (9.1)$$

$$k_\phi = \frac{U}{U_{cp}}. \quad (9.2)$$

Вольтметры амплитудных значений имеют детекторы амплитудных значений (амплитудные или пиковые детекторы) с открытым (рис. 9.4, а) или закрытым (рис. 9.5, а) входами, где $u_{\text{вх}}$ и $u_{\text{вых}}$ — входное и выходное напряжения детектора. Для измерения амплитудного значения детектор снабжен запоминающим элементом. Это конденсатор, заряжаемый через диод до амплитудного значения переменного напряжения U_{mx} .

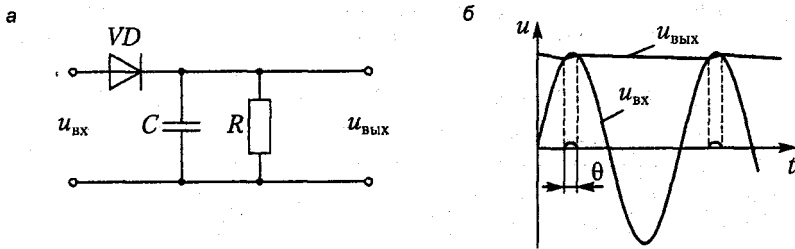


Рис. 9.4. Амплитудный детектор с открытым входом: а — схема; б — временная диаграмма напряжений

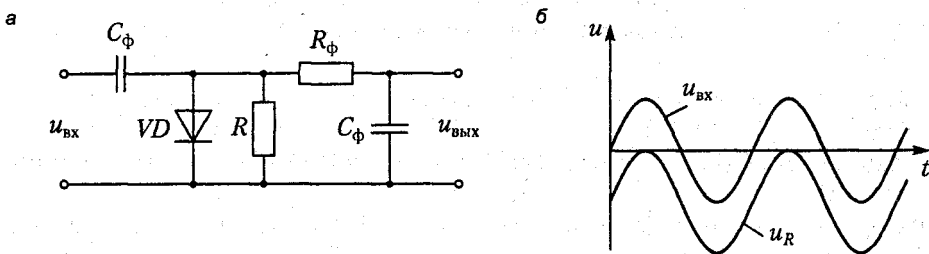


Рис. 9.5. Амплитудный детектор с закрытым входом: а — схема; б — временная диаграмма напряжений

В схеме с открытым входом конденсатор заряжается до напряжения U_{mx} через открытый диод с малым прямым сопротивлением $R_{\text{пр}}$. Пульсации напряжения на конденсаторе объясняются его подзарядом при открытом диоде ($u_{\text{вх}} > u_{\text{вых}}$) и разрядом через резистор R при закрытом диоде ($u_{\text{вх}} < u_{\text{вых}}$). Как видно из графика, приведенного на рис. 9.4, б, отпирание диода и подзаряд конденсатора происходят лишь в короткие промежутки времени θ . Для уменьшения пульсаций необходимо, чтобы $R \gg R_{\text{пр}}$. В этом случае среднее значение выходного напряжения будет равно U_{mx} и, следовательно, угол отклонения подвижной части измерительного прибора

$$\alpha = k_V U_{\text{mx}},$$

где k_V — коэффициент преобразования вольтметра.

Если измеряемое напряжение имеет постоянную составляющую U_0 , то есть $u_x = U_0 + U_{\text{mx}} \sin \omega t$, то она также через диод поступит в цепь заряда конденсатора, который зарядится до напряжения $U_0 + U_{\text{mx}}$. В этом случае показания вольтметра будут соответствовать максимальному значению суммарного приложенного напряжения.

В детекторе с закрытым входом (рис. 9.5, а и б) конденсатор сначала также заряжается до напряжения U_{mx} и далее в установившемся режиме независимо от наличия постоянной составляющей на входе на резисторе R будет пульсирующее напряжение

$$u_R = u_{вх} - U_C = U_{mx} \sin \omega t - U_{mx},$$

изменяющееся от 0 до $-2U_{mx}$. Среднее значение этого напряжения, которое измеряется магнитоэлектрическим прибором, равно U_{mx} . Для уменьшения пульсаций на выходе детектора ставится фильтр нижних частот $R_\phi C_\phi$. Таким образом, в случае применения детектора с закрытым входом показание вольтметра определяется только амплитудным значением переменной составляющей входного измеряемого напряжения u_x , то есть $\alpha = k_V U_{mx}$.

Поскольку шкала вольтметров градуируется в действующих значениях синусоидального напряжения, то необходимо от амплитудного значения перейти к действующему с учетом выражения (9.1) для коэффициента амплитуды k_a :

$$\alpha = k_V k_a U_x,$$

то есть показания вольтметров амплитудных значений зависят от формы кривой измеряемого напряжения, и при измерении напряжений другой формы необходимо делать соответствующий пересчет ($U_x = 1,41 U_{np} / k_a$, где U_{np} — значение напряжения, отсчитанное по шкале прибора; k_a — коэффициент амплитуды измеряемого напряжения).

Электронные вольтметры средних значений строятся с использованием схем одно- или двухполупериодного выпрямления, в которых применяются полупроводниковые диоды, работающие на линейном участке характеристики. Угол отклонения подвижной части измерительного прибора у таких вольтметров пропорционален средневыпрямленному значению измеряемого напряжения

$$\alpha = k_V \frac{1}{T} \int_0^T |u_x(t)| dt = k_V U_{ср.х}. \quad (9.3)$$

Чаще всего схемы детекторов средних значений применяются в высокочувствительных вольтметрах с предварительным усилением переменного сигнала, что, правда, несколько снижает диапазон рабочих частот. Шкалы таких вольтметров также градуируются в действующих значениях синусоидального напряжения. Следовательно, необходимо от среднего значения в выражении (9.3) перейти к действующему значению с учетом выражения (9.2) для коэффициента формы

$$\alpha = \frac{k_V}{k_\phi} U_x.$$

Таким образом, показания вольтметров средних значений также зависят от формы кривой измеряемого напряжения, и при измерении напряжений другой формы необходимо делать соответствующий пересчет ($U_x = k_\phi U_{np} / 1,11$, где U_{np} — значение напряжения, отсчитанное по шкале прибора; k_ϕ — коэффициент формы измеряемого напряжения).

В детекторах действующих (средних квадратических) значений обязательно используется элемент с квадратичной статической характеристикой преобразо-

вания $u_{\text{вых}} = ku_{\text{вх}}^2$. В качестве такого элемента могут быть использованы полупроводниковые диоды, многосеточные электронные лампы, поставленные в соответствующий режим работы, но наилучшими характеристиками обладают квадратирующие элементы на термопреобразователях и диодно-резистивные элементы, использующие принцип кусочно-линейной аппроксимации параболы.

Начальный участок вольт-амперной характеристики диода носит квадратичный характер ($i = ku_x^2$), поэтому отклонение подвижной части измерительного механизма будет пропорционально квадрату действующего значения измеряемого напряжения:

$$\begin{aligned} \alpha &= k_V \frac{1}{T} \int_0^T u_x^2(t) dt = k_V \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{mx}}^2 \sin^2 \omega t dt = \\ &= k_V \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{2} U_{\text{mx}}^2 - \frac{1}{2} U_{\text{mx}}^2 \cos 2\omega t \right) dt = k_V \frac{1}{2} U_{\text{mx}}^2 = k_V U_x^2. \end{aligned}$$

При больших токах наблюдается отклонение вольт-амперной характеристики диода от параболы, вследствие этого с целью расширения диапазона измерений и сохранения квадратичного характера результирующая характеристика детектора синтезируется из начальных участков вольт-амперных характеристик диодов. Шкала прибора в этом случае получается квадратичной с градуировкой в действующих значениях независимо от формы кривой измеряемого напряжения. Вольтметр с равномерной шкалой получается при использовании двух термопреобразователей, один из которых включен в цепь отрицательной обратной связи. Поскольку на детектор действующих значений подается предварительно усиленный сигнал, это приводит, с одной стороны, к увеличению чувствительности (от десятков микровольт), но, с другой, — к сужению рабочего диапазона частот (например, до 50 МГц у вольтметра ВЗ-48А).

Универсальные вольтметры предназначены для измерения как постоянных, так и переменных напряжений. Обобщенная структурная схема показана на рис. 9.6.

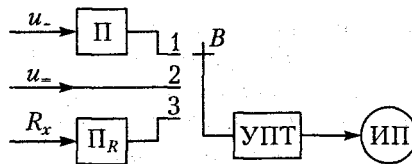


Рис. 9.6. Обобщенная структурная схема универсального вольтметра

В зависимости от положения переключателя B вольтметр работает по схеме для измерения переменного напряжения с преобразователем Π (положение 1) или для измерения постоянного напряжения (положение 2). Кроме того, в универсальных или комбинированных вольтметрах предусматривается возможность измерения сопротивлений (положение 3 переключателя). В таких вольтметрах имеется преобразователь Π_R , выходное напряжение которого, функционально связанное со значением измеряемого сопротивления, через усилитель постоянного тока подается на магнитоэлектрический прибор. На основании этого шкала

прибора градуируется в единицах сопротивления. При этом в широком диапазоне измеряемых значений (10^{-4} – 10^{17} Ом) шкала таких омметров резко неравномерна, диапазон показаний 0 – ∞ .

В качестве примера приведем характеристики вольтметра В7-36, с помощью которого можно измерять значения: постоянного напряжения в диапазоне 10 мВ – 1000 В (с делителем до 20 кВ), переменного напряжения 30 мВ – 1000 В в диапазоне частот 20 Гц – 1 ГГц, электрического сопротивления 10 Ом – 1000 МОм, а также постоянного (1 мкА – 10 А) и переменного (10 мА – 10 А с частотой до 1 кГц) токов с базовой погрешностью $\pm 2,5$ %.

Импульсные вольтметры применяются для измерения амплитуды импульсных сигналов различной формы, поэтому их градуируют в амплитудных значениях. Для этой цели в них используют детекторы амплитудных значений с открытым входом, выходное напряжение которых должно быть равно амплитуде измеряемых импульсов U_m . Однако малая длительность импульсов τ (10 – 100 нс) и значительная скважность $q = T/\tau$ (до 10^9), где T – период следования импульсов, предъявляют жесткие требования к детекторам, поэтому в современных импульсных вольтметрах применяют компенсационные схемы (рис. 9.7).

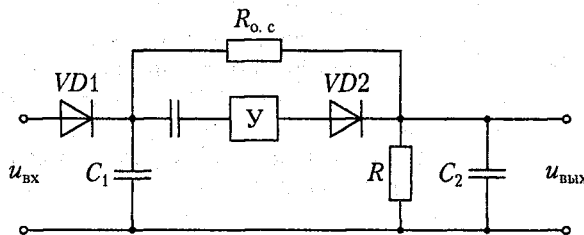


Рис. 9.7. Компенсационная схема амплитудного преобразователя импульсного вольтметра

Входные импульсы $u_{вх}$ заряжают через диод $VD1$ конденсатор C_1 . Переменная составляющая напряжения на этом конденсаторе, вызванная подзарядом его измеряемыми импульсами и разрядом между ними, усиливается усилителем переменного тока $У$ и выпрямляется диодом $VD2$. Постоянная времени цепи RC_2 выбирается такой, чтобы напряжение на конденсаторе C_2 в промежутках между импульсами изменялось незначительно. С выхода схемы через резистор обратной связи $R_{о.с}$ на конденсатор C_1 подается компенсирующее напряжение. При большом коэффициенте усиления усилителя переменная составляющая на конденсаторе C_1 значительно уменьшается, напряжение на нем становится практически равным амплитуде измеряемых импульсов, а на выходе схемы пропорционально этой амплитуде

$$u_{\text{вых}} = \frac{U_m R}{R + R_{о.с}}$$

В технической документации для импульсных вольтметров обязательно указывается диапазон допустимых значений длительности импульсов (или их частота) и скважности, при которых погрешности вольтметров не выходят за пределы

нормированных значений. Например, вольтметр В4-12 имеет диапазон измеряемых напряжений 1–1000 мВ (до 100 В с внешним делителем) при основной погрешности измерений 4–6 %; параметры измеряемых импульсов: длительность — 0,1–300 мкс, частота повторения — 50 Гц — 100 кГц, скважность — не менее 2.

Селективные вольтметры измеряют действующее значение напряжения в некоторой полосе частот или действующее значение отдельных гармоник измеряемого сигнала посредством выделения сигнала узкой полосы частот или отдельных гармонических составляющих с помощью перестраиваемого полосового фильтра. Измеряемый сигнал u_x через входной усилитель ВУ (рис. 9.8) подается на смеситель СМ, предназначенный для преобразования частотного спектра измеряемого сигнала. На выходе смесителя сигнал, пропорциональный измеряемому, имеет спектр частот $f_{СМi} = f_{\Gamma} - f_{xi}$, где f_{xi} — частота гармонических составляющих измеряемого сигнала; f_{Γ} — частота синусоидального сигнала генератора Г, называемого гетеродином. Усилитель промежуточной частоты УПЧ, играющий роль полосового фильтра, настроен на фиксированную частоту $f_{УПЧ}$, поэтому на его выход пройдет только составляющая выходного сигнала смесителя с частотой, равной $f_{УПЧ}$. Этот сигнал соответствует гармонической составляющей измеряемого сигнала с частотой $f_{xi} = f_{\Gamma} - f_{УПЧ}$, действующее значение которой измеряется вольтметром действующих значений ВДЗ. Изменяя частоту гетеродина f_{Γ} , можно измерять действующие значения различных гармонических составляющих входного сигнала u_x . Благодаря фиксированному значению частоты $f_{УПЧ}$ усилитель УПЧ имеет большой коэффициент усиления и узкую полосу пропускания, что обеспечивает высокую чувствительность и избирательность селективного вольтметра. Например, вольтметр В6-10 измеряет напряжения от 1 мкВ до 10 мВ (с внешним делителем напряжения до 1 В) в диапазоне частот 0,1–30 МГц при полосе пропускания 1 кГц.

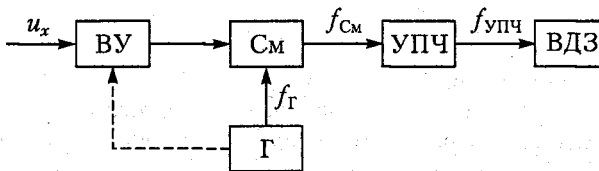


Рис. 9.8. Блок-схема селективного вольтметра

Главными достоинствами электронных вольтметров следует считать их высокую чувствительность, широкий диапазон рабочих частот, широкий диапазон измеряемых величин, большое входное сопротивление и, как следствие, практическое отсутствие потребляемой мощности от объекта измерения. Современные электронные аналоговые вольтметры обладают сравнительно малой погрешностью измерения (классы точности от 0,1). Все это делает их использование предпочтительным при измерениях в маломощных цепях и схемах электроники.

К основным их недостаткам относятся необходимость использования дополнительного источника питания для электронной схемы, зависимость показаний от формы кривой измеряемой величины (как, например, для вольтметров амплитудных и средних значений) и сравнительная сложность устройства.

9.2. Электронные омметры

Электронные омметры применяются для измерения активных сопротивлений в диапазоне 10^{-4} – 10^{17} Ом. Точность этих приборов, как правило, невысока (приведенная погрешность лежит в пределах 0,5–4 % и увеличивается при измерении сопротивлений более 10^{12} Ом до 10 %). В зависимости от диапазона измеряемых сопротивлений различают собственно омметры, микроомметры, миллиомметры, мегаомметры и тераомметры.

Принцип действия электронных омметров основан на преобразовании измеряемого сопротивления в функционально связанное с ним постоянное напряжение, измеряемое магнитоэлектрическим измерительным механизмом, шкала которого отградуирована в единицах сопротивления — омах.

Большинство электронных омметров собрано по довольно простым схемам (рис. 9.9). Здесь СИН — стабилизированный источник напряжения U_0 ; УПТ — усилитель постоянного тока; ОУ — операционный усилитель; ИМ — магнитоэлектрический измерительный механизм; R_x — резистор, электрическое сопротивление которого необходимо измерить; R_0 — резистор, сопротивление которого известно; U_x — напряжение на входе ИМ.

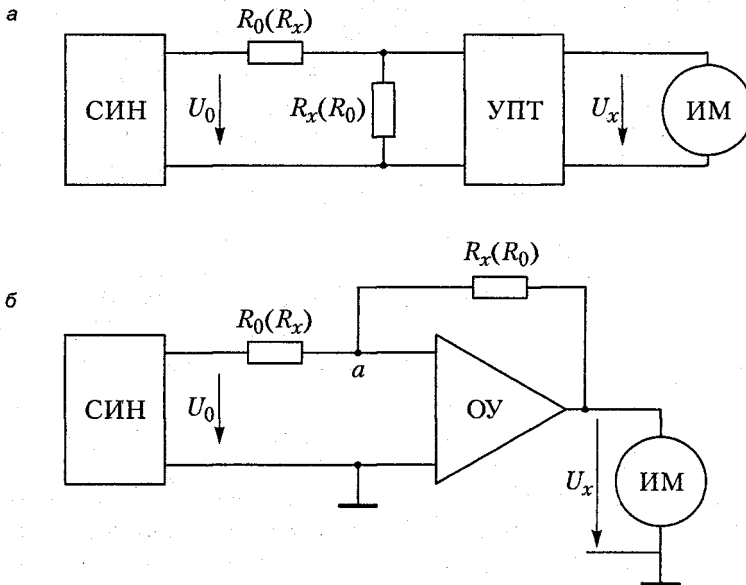


Рис. 9.9. Структурные схемы электронных омметров

Для схемы, изображенной на рис. 9.9, а, предполагается, что значение входного сопротивления УПТ $R_{вх}$ отвечает условиям либо $R_{вх} \gg R_{x \max}$ (вариант подключения резисторов R_x и R_0 , показанный на рисунке без скобок), либо $R_{вх} \gg R_0$ (вариант подключения резисторов R_x и R_0 , показанный на рисунке в скобках), а входной ток УПТ довольно мал по сравнению с токами, протекающими через резисторы R_x и R_0 .

В этом случае для первого варианта при $R_0 \gg R_x$ угол поворота подвижной части ИМ

$$\alpha = kU_x = \frac{k k_y U_0 R_x}{R_0 + R_x} \approx \frac{k k_y U_0 R_x}{R_0},$$

где k — коэффициент преобразования ИМ; k_y — коэффициент преобразования УПТ, и шкалу прибора можно считать линейной относительно R_x .

Для второго варианта при $R_x \gg R_0$

$$\alpha = kU_x = \frac{k k_y U_0 R_0}{R_0 + R_x} \approx \frac{k k_y U_0 R_0}{R_x},$$

и шкала прибора будет обратно пропорциональной по отношению к значению измеряемого сопротивления.

Для повышения точности весь диапазон измерений омметра разбивают на поддиапазоны, на каждом из которых сопротивление резистора R_0 имеет свое значение. Этим достигается изменение цены деления шкалы. Для уменьшения влияния нестабильной работы отдельных узлов (в особенности УПТ) в омметрах предусмотрены регулировки «Установка нуля» и «Установка ∞ » при замкнутых и разомкнутых входных зажимах соответственно.

В схеме на рис. 9.9, б применен операционный усилитель ОУ (усилитель с большим коэффициентом усиления k_{Oy} , большим входным и малым выходным сопротивлениями), охваченный отрицательной обратной связью, цепь которой образована резисторами R_x и R_0 . Для операционного усилителя потенциал точки a , равный U_x/k_{Oy} , и его входной ток практически равны нулю. Поэтому токи, протекающие через резисторы R_x и R_0 , можно считать равными между собой, и вследствие этого будут справедливы следующие соотношения:

- $\frac{U_0}{R_0} = \frac{U_x}{R_x}$ (вариант включения резисторов R_x и R_0 без скобок на рис. 9.9, б) и
- $\frac{U_0}{R_x} = \frac{U_x}{R_0}$ (вариант включения резисторов R_x и R_0 в скобках на рис. 9.9, б).

Отсюда для первого варианта включения $U_x = U_0 R_x / R_0$ и $\alpha = S_U U_0 R_x / R_0$ (S_U — чувствительность ИМ по напряжению), то есть омметр будет иметь линейную шкалу. Второй вариант применяется для измерения достаточно больших величин сопротивлений ($> 10^{12}$ Ом), когда применение первого варианта приводит к существенному росту погрешности. Шкала такого прибора будет гиперболической, поскольку $\alpha = S_U U_0 R_0 / R_x$. Для повышения точности в таких схемах можно увеличить ток через R_x за счет повышения напряжения источника питания U_0 . Например, в мегаомметре ЭС0210 при измерении в интервале 500 МОм — 100 ГОм выходное напряжение на зажимах прибора увеличивается до 2500 В.

Среди выпускаемых промышленностью электронных омметров отметим еще два: микроомметр БС3-010-1, предназначенный для измерения малых значений активного электрического сопротивления в интервале 100 нОм — 1 Ом с погрешностью 0,5 %, и тераомметр Е6-13А, обеспечивающий измерение значений сопротивления в диапазоне 10–10⁶ Ом по линейной шкале (9 поддиапазонов,

основная погрешность не более $\pm 2,5\%$ и 10^6 – 10^{14} Ом по обратно пропорциональной шкале (14 поддиапазонов, основная погрешность от 2,5 % в начале и до 10 % в конце диапазона).

9.3. Электронные ваттметры и счетчики электрической энергии

Электронные приборы для измерения мощности — **электронные ваттметры** — строятся на основе измерительного преобразователя мощности в постоянный ток, на выходе которого устанавливается магнитоэлектрический прибор со шкалой, градуированной в единицах мощности (например, щитовой ваттметр Ц42303/1 класса точности 1,5). В настоящее время выпускаются измерительные преобразователи активной, реактивной и полной мощностей переменного тока для однофазных и трехфазных цепей. Принципы построения этих преобразователей во многом схожи, поэтому в дальнейшем рассмотрим основные способы построения преобразователей активной мощности.

В основе работы преобразователей активной мощности лежит реализация зависимости $P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$, где P — измеряемая активная мощность, T — период тока i и напряжения u на нагрузке. В зависимости от способа получения произведения u на i различают параметрические и модуляционные преобразователи (множительные устройства).

Параметрические преобразователи могут быть с прямым и косвенным перемножением. При прямом перемножении используется четырехполосник, на вход которого подается, например, напряжение u , а ток i управляет коэффициентом его передачи. Построенный таким образом преобразователь (рис. 9.10, а) состоит из операционного усилителя ОУ; резистора R с постоянным значением сопротивления; управляемого током i резистора R_y , сопротивление которого $R_y = k_i$ (например, полевой транзистор), и устройства усреднения УУ. Выходной сигнал операционного усилителя $u_n = u R_y / R = u_i k / R$. Если напряжение $U_{\text{вых}}$ подается на магнитоэлектрический прибор, то угол отклонения подвижной части

$$\alpha = S_U U_{\text{вых}} = S_U \frac{1}{T} \int_0^T u_n dt = S_U \frac{k}{R} \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt = S_U \frac{k}{R} P,$$

где S_U — чувствительность измерительного механизма прибора по напряжению.

Структурная схема множительного устройства с использованием косвенного способа умножения на основании зависимости $4u_i u = (u_i + u)^2 - (u_i - u)^2$, показана на рис. 9.10, б, где П — преобразователь тока в напряжение ($u_i = k_i$), ФП1 и ФП2 — функциональные преобразователи, возводящие в квадрат, соответственно, суммы и разности входных напряжений, ВУ — вычитающее устройство.

Из рисунка видно, что $U_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int_0^T 4k u i dt = 4k P$. Функциональные преобразова-

тели ФП1 и ФП2 реализуются с помощью элементов, имеющих квадратичную вольт-амперную характеристику (например, полупроводниковых диодов, рези-

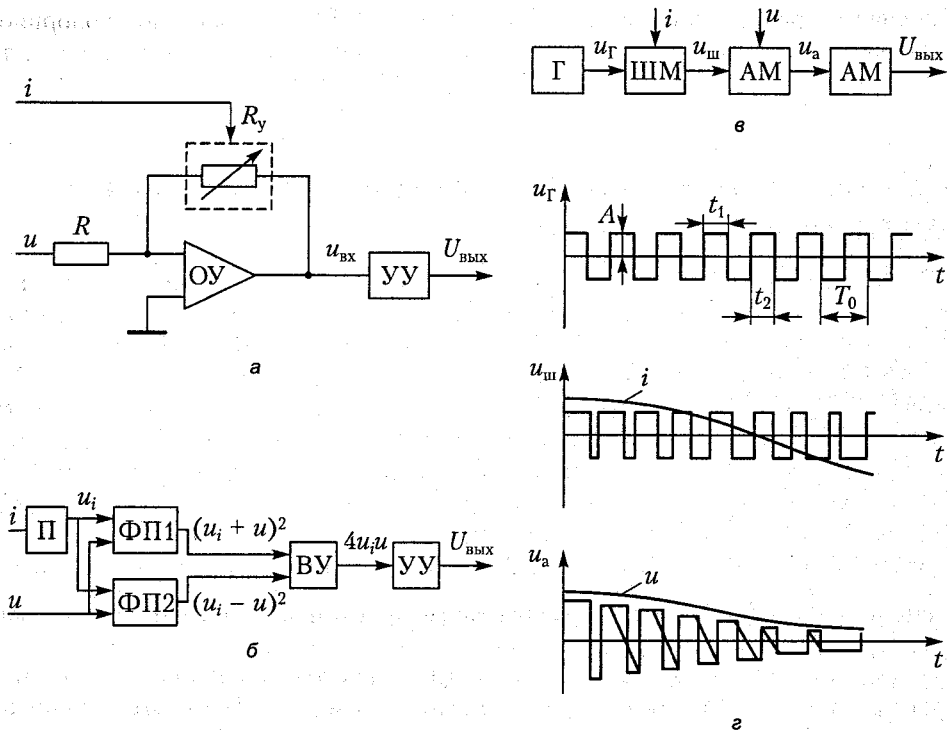


Рис. 9.10. Множительные устройства электронных ваттметров: а, б, в — структурные схемы; г — временная диаграмма напряжений

сторов или транзисторов), а также с использованием устройств на основе кусочно-линейной аппроксимации параболы, выполненных на диодах и резисторах. Наиболее точными являются модуляционные множительные устройства, основанные на двойной модуляции импульсных сигналов. Из различных видов модуляции наибольшее распространение получили широтно-импульсная и амплитудно-импульсная модуляции (ШИМ — АИМ).

Структурная схема преобразователя с ШИМ — АИМ показана на рис. 9.10, в, а временная диаграмма, поясняющая принцип его работы, — на рис. 9.10, г. Генератор Г формирует прямоугольные двуполярные импульсы с постоянными амплитудой A , периодом T_0 и длительностями положительной (t_1) и отрицательной ($t_2 = t_1$) полуволн. В широтном модуляторе ШИМ длительность импульсов под действием тока i меняется соответственно зависимости $\frac{t_1 - t_2}{T_0} = k_m i$, где k_m — ко-

эффициент преобразования ШИМ. Среднее за период T_0 значение напряжения на выходе ШИМ составит $u_{шT_0} = k_m i A$. В амплитудном модуляторе АМ амплитуда A этих импульсов модулируется пропорционально входному напряжению $A = k_a u$, где k_a — коэффициент преобразования АМ. Таким образом, среднее за период T_0 напряжение на выходе АМ будет пропорционально мгновенному значению измеряемой мощности ($u_{aT_0} = k_a k_m u i$).

Напряжение на выходе устройства усреднения УУ

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{aT_0} dt = \frac{1}{T} \int_0^T k_a k_{\text{ин}} u idt = k_a k_{\text{ин}} P,$$

где T — период изменения тока i и напряжения u .

Электронные счетчики активной энергии строятся на основе преобразователя мощности с последующим интегрированием его выходной величины в соответствии с зависимостью $W = \int_{t_1}^{t_2} P dt$. Одна из возможных схем счетчика может быть

составлена из преобразователя мощности в напряжение (ПМН) и преобразователя напряжения в последовательность импульсов (ПНЧ). В качестве ПМН можно использовать, например, преобразователь с ШИМ — АИМ (см. рис. 9.10, в). Частота следования импульсов на выходе ПНЧ будет пропорциональна напряжению на входе ПНЧ, а значит — на выходе ПМН, и будет пропорциональна мощности P . Счетчик импульсов подсчитывает количество импульсов (то есть производит интегрирование) на выходе ПНЧ, которое будет пропорционально активной энергии W .

Среди выпускаемых промышленностью электронных счетчиков электрической энергии отметим однофазный счетчик ЦЭ6805В класса точности 0,5 и трехфазный счетчик ЦЭ6808В класса точности 0,2, которые укомплектованы как жидкокристаллическими индикаторами, так и механическими отсчетными устройствами, универсальный счетчик активной и реактивной электроэнергии ЦЭ6812, а также многотарифные счетчики ЦЭ2726 (4 тарифа, однофазный, с межповоротным интервалом 16 лет) и ЦЭ2727 (8 тарифов, трехфазный, с межповоротным интервалом 10 лет) класса точности 1,0 с жидкокристаллическими индикаторами.

9.4. Электронные частотомеры и фазометры

Для измерения частоты и угла фазового сдвига в диапазоне частот от десятков герц до единиц мегагерц большое распространение получили электронные частотомеры и фазометры. Эти приборы представляют собой сочетание измерительных преобразователей частоты или угла сдвига фаз в постоянный ток и магнитоэлектрического измерительного механизма. В качестве преобразователей в указанных приборах чаще всего применяются управляемые электронные ключи.

Электронные частотомеры. Упрощенная схема электронного частотомера показана на рис. 9.11, где ФИ — формирователь импульсов постоянной длительности и постоянной амплитуды с частотой следования f_x , равной частоте входного исследуемого сигнала u ; СИН — стабилизированный источник напряжения U_0 ; ЭК — электронный ключ; С — конденсатор; ИМ — магнитоэлектрический измерительный механизм. Выходные импульсы формирователя ФИ управляют электронным ключом ЭК, поочередно подключая конденсатор С к СИН и ИМ. При подключении к СИН конденсатор заряжается, а при подключении к ИМ — разряжается. В результате угол поворота подвижной части ИМ ($\alpha = S_I I_{cp} = S_I C U_0 f_x$,

где S_I — чувствительность ИМ по току, I_{cp} — среднее значение тока, протекающего через ИМ) будет пропорционален измеряемой частоте f_x , и шкала прибора может быть отградуирована в единицах частоты — герцах (при условии постоянства значений C и U_0).

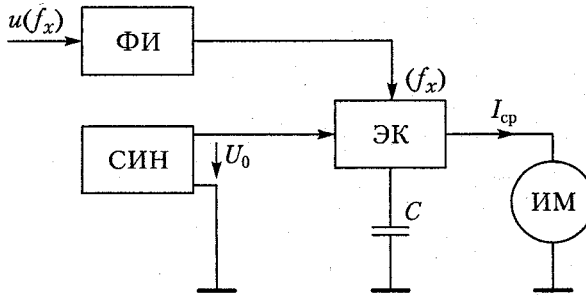


Рис. 9.11. Структурная схема электронного частотомера

Электронные аналоговые частотомеры позволяют измерять частоту электрических сигналов в пределах по крайней мере от 10–20 Гц до единиц мегагерц с приведенной погрешностью порядка 0,5 %.

Электронные фазометры. Измерение угла сдвига фаз φ_x между двумя синусоидальными напряжениями одинаковой частоты осуществляется методом преобразования φ_x во временной интервал с последующим его преобразованием в постоянный ток, который измеряется магнитоэлектрическим измерительным механизмом.

Схема измерения представлена на рис. 9.12, а. Формирователи импульсов ФИ1 и ФИ2 формируют две последовательности импульсов в моменты перехода входных напряжений u_1 и u_2 через нуль из области отрицательных значений в область положительных. При наличии угла сдвига фаз φ_x между напряжениями u_1 и u_2 импульсы одной последовательности будут сдвинуты относительно импульсов другой последовательности на интервал времени Δt , связанный с φ_x соотношением

$$\varphi_x = \frac{\Delta t}{T} 360,$$

где T — период изменения входных напряжений u_1 и u_2 .

Сформированные импульсы управляют электронным ключом ЭК, замыкая цепь стабилизированного источника питания СИН и измерительного механизма ИМ при поступлении импульса от ФИ1 и размыкая ее при поступлении импульса от ФИ2.

Таким образом, в течение интервала времени Δt ключ ЭК замкнут и через измерительный механизм протекает ток амплитудой I_m (рис. 9.12, б). Среднее за период значение тока в цепи ИМ I_{cp} и, следовательно, угол поворота подвижной части ИМ α будут равны, соответственно,

$$I_{cp} = I_m \frac{\Delta t}{T} = I_m \frac{\varphi_x}{360}; \quad \alpha = S_I I_m \frac{\varphi_x}{360}.$$

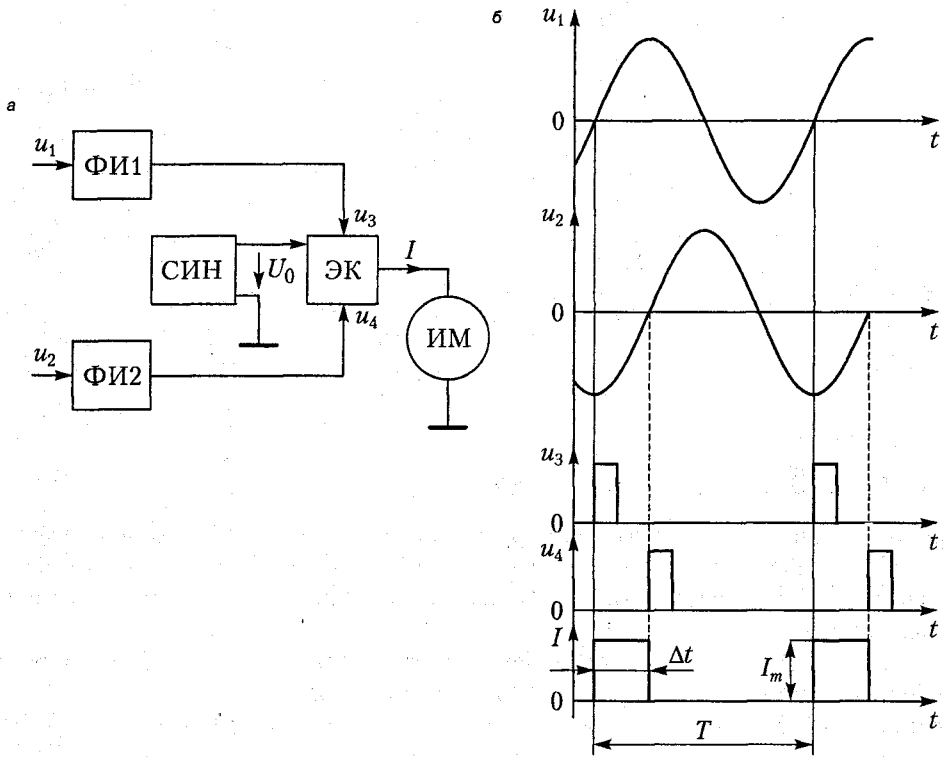


Рис. 9.12. Электронный фазометр: а — структурная схема; б — диаграммы, поясняющие его работу

При постоянных значениях S_f и I_m шкала прибора градуируется в единицах угла сдвига фаз.

ГЛАВА 10 Приборы сравнения

10.1. Общие сведения

Приборы, в которых для измерения размера неизвестной величины используются методы сравнения с мерой, называются *приборами сравнения*. К ним относятся *мосты* и *компенсаторы (потенциометры)*, различающиеся схемами измерительных цепей.

Мосты применяют для измерения сопротивления, индуктивности, емкости, добротности и угла диэлектрических потерь. На основе мостовых схем выпускают приборы для измерения размеров неэлектрических величин (температуры, перемещений, механических напряжений и др.) и различные устройства автоматики и телемеханики.

Для измерения напряжений и токов используют компенсаторы (потенциометры). Они также применяются для измерения размеров других величин при использовании измерительных преобразователей и косвенного способа измерений.

В зависимости от метода, положенного в основу этих приборов, — нулевого или дифференциального, приборы подразделяются на уравновешенные и не уравновешенные. В зависимости от рода тока, питающего мост или компенсатор, различают мосты и компенсаторы постоянного и переменного тока. Кроме того, приборы сравнения могут быть с ручным и автоматическим уравновешиванием. Наконец, в зависимости от вида схемы (числа плеч) мосты бывают четырехплечие (одинарные) и шестиплечие (двойные). По существовавшей классификации типов приборов в названиях мостов и компенсаторов используется буква Р (например, измерительный мост Р4833; правда, буквенное обозначение в названии типа может быть и другим, как у автоматического потенциометра КСП2).

10.2. Общая теория мостовых схем

На рис. 10.1 представлена схема одинарного моста переменного тока. Плечи моста $a - b$, $b - в$, $a - г$ и $г - в$ содержат в общем случае комплексные сопротивления $Z_1 - Z_4$. В диагональ $a - в$ включен источник питания, в диагональ $б - г$, называемую выходной, — нагрузка (например, нуль-индикатор) с сопротивлением Z_0 .

Мост находится в равновесии, если ток $\dot{I}_0 = 0$ (или $\dot{U}_{6-z} = 0$). В соответствии с этим по второму закону Кирхгофа

$$\dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_3 Z_3; \quad \dot{I}_2 Z_2 = \dot{I}_4 Z_4, \quad (10.1)$$

а по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2; \quad \dot{I}_3 = \dot{I}_4. \quad (10.2)$$

Решая уравнения (10.1) с учетом соотношений (10.2), получим условие равновесия моста

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3. \quad (10.3)$$

В алгебраической форме выражения для полных комплексных сопротивлений плеч моста имеют вид

$$Z_1 = R_1 + jX_1; \quad Z_2 = R_2 + jX_2; \quad (10.4)$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3; \quad Z_4 = R_4 + jX_4.$$

Подставляя выражения (10.4) в (10.3), получим два равенства для вещественных и мнимых частей комплексных чисел:

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3; \quad R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2.$$

Наличие двух уравнений равновесия означает, что для достижения равновесия необходимо регулировать не менее двух параметров моста переменного тока. С этой точки зрения для мостов переменного тока важным является понятие сходимости моста. Под *сходимостью моста* понимают возможность достижения состояния равновесия в результате определенного числа поочередных переходов от регулировки одного параметра к регулировке другого.

Условие равновесия моста можно выразить еще одним способом, записав комплексные сопротивления плеч в показательной форме:

$$Z_1 = z_1 e^{j\varphi_1}; \quad Z_2 = z_2 e^{j\varphi_2}; \quad Z_3 = z_3 e^{j\varphi_3}; \quad Z_4 = z_4 e^{j\varphi_4}, \quad (10.5)$$

где z_1, z_2, z_3, z_4 — модули полных сопротивлений плеч; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ — углы сдвига фаз тока относительно напряжения в соответствующих плечах. Подставляя (10.5) в (10.3), получим:

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

откуда

$$z_1 z_4 = z_2 z_3;$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \quad (10.6)$$

Условие (10.6) указывает, при каком характере плеч можно уравновесить схему. Например, если смежные плечи, третье и четвертое, имеют чисто активные сопротивления R_3 и R_4 , то есть $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$, то оба других плеча должны иметь либо индуктивный, либо емкостной характер. Если противоположные плечи чисто активные ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$), то одно из двух других плеч должно быть индуктивным (например, $\varphi_3 > 0$), а другое — емкостным ($\varphi_4 < 0$).

Мосты, в которых измеряемую величину определяют из условия равновесия (10.3), называют *уравновешенными*. Если измеряемую величину определяют по

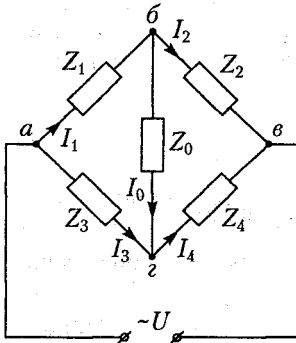


Рис. 10.1. Схема одинарного моста переменного тока

значению тока или напряжения выходной диагонали моста, такие мосты называют *неуравновешенными*.

Важной характеристикой моста является его чувствительность. Приближенно *чувствительность моста* определяют как отношение конечного приращения значения выходного сигнала к приращению измеряемой величины вблизи точки равновесия:

$$\dot{S}_m \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (10.7)$$

Выходной величиной моста могут быть ток, напряжение или мощность. Измеряемая величина — сопротивление, индуктивность и др.

При наличии нуль-индикатора чувствительность моста равна произведению чувствительностей мостовой схемы и нуль-индикатора.

В мостах переменного тока обычно используются электронные нуль-индикаторы, имеющие большое входное сопротивление, так что практически его можно считать равным бесконечности. Поэтому для мостов переменного тока, как правило, определяют относительную чувствительность по напряжению

$$\dot{S}_{mU} = \frac{\dot{U}_{б-з}}{\Delta Z_i / Z_i},$$

где Z_i — полное сопротивление одного из изменяемых плеч моста.

Для мостов постоянного тока, у которых в качестве нуль-индикатора, как правило, используются магнитоэлектрические гальванометры с малым входным сопротивлением, на основании выражения (10.7) можно записать выражения для чувствительностей моста по току, напряжению и мощности

$$S_{mI} = \frac{\Delta I}{\Delta R_i}; \quad S_{mU} = \frac{\Delta U}{\Delta R_i}; \quad S_{mP} = \frac{\Delta P}{\Delta R_i},$$

где ΔI , ΔU , ΔP — приращения тока, напряжения и мощности в диагонали моста при изменении сопротивления плеча на ΔR_i .

Если в качестве нуль-индикатора применяется магнитоэлектрический гальванометр, говорят о комплектной чувствительности моста

$$S_{m.к} = S_{mI} S_I = \frac{\Delta I}{\Delta R_i} \frac{\Delta l}{\Delta I} = \frac{\Delta l}{\Delta R_i},$$

где Δl — отклонение указателя гальванометра, S_I — чувствительность магнитоэлектрического гальванометра по току.

На практике чаще применяют комплектную относительную чувствительность моста постоянного тока

$$S'_{m.к} = \frac{\Delta l}{\Delta R_i / R_i}.$$

10.3. Мосты постоянного тока

Одинарные мосты. Одинарными мостами постоянного тока называют четырехплечие мосты с питанием от источника постоянного тока. Они широко применя-

ются для измерения сопротивлений на постоянном токе. Схема одинарного моста отличается от схемы, изображенной на рис. 10.1, тем, что его плечи $a - б$, $б - в$, $a - г$ и $г - в$ имеют активные сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 соответственно, а в выходную диагональ $б - г$ включен нуль-индикатор постоянного тока, например магнитоэлектрический гальванометр с сопротивлением R_r .

Если мост уравновешен, то ток в диагонали $б - г$ равен нулю. Для этого необходимо выполнение условия равновесия моста (10.3), которое для четырехплечего моста постоянного тока примет вид

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (10.8)$$

Если в одно из плеч моста, например $a - б$, включить резистор с неизвестным сопротивлением R_x и, изменяя одно или пару сопротивлений плеч, добиться отсутствия тока в цепи гальванометра, то на основании выражения (10.8) для $R_1 = R_x$ получим:

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}.$$

Плечо моста R_2 называют плечом сравнения, плечи R_3 и R_4 — плечами отношения. В зависимости от того, сопротивления каких плеч подбираются в процессе уравновешивания, мосты подразделяются на мосты с постоянным и с переменным отношением плеч. В мостах с постоянным отношением плеч в соответствии с предполагаемым значением измеряемого сопротивления устанавливают определенное отношение плеч R_3 и R_4 . Затем подбором сопротивления R_2 , которое представляет собой магазин сопротивлений, добиваются равенства нулю тока, протекающего через гальванометр. Если мост не уравновешивается, изменяют отношение сопротивлений плеч R_3 и R_4 и повторяют процесс балансировки до полного уравновешивания схемы. В мостах с переменным отношением плеч сначала в плече сравнения устанавливают определенное сопротивление R_2 , а при балансировке моста подбирают отношение сопротивлений плеч R_3 и R_4 . Плечо сравнения представляют собой небольшой магазин сопротивлений, с помощью которого устанавливают необходимый диапазон измерения, а плечи отношения —

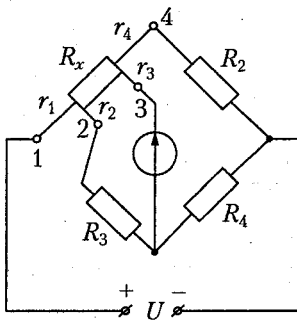


Рис. 10.2. Схема одинарного моста с четырехзажимным подключением измеряемого сопротивления

реохорд (калиброванную манганиновую проволоку или трубку со скользящим контактом, образующим плечи R_3 и R_4).

Одинарные мосты постоянного тока применяют для измерения сопротивлений средних значений ($10 - 10^6$ Ом). Верхний предел измерений ограничивается влиянием сопротивления изоляции элементов конструкции прибора (измеряемые сопротивления приближаются по своему значению к сопротивлению изоляции, что приводит к их шунтированию). Увеличить верхний предел измерений моста позволяет применение мер защиты от влияния токов утечки.

Нижний предел измерений одинарных мостов ограничивается влиянием на результат измерения сопротивлений контактов и соединительных проводов. Для уменьшения этого влияния используют схему

моста с четырехзажимным подключением измеряемого сопротивления R_x (рис. 10.2). В этом случае провода и контакты с сопротивлениями r_1 и r_3 оказываются включенными в диагонали моста и поэтому не влияют на условие равновесия. Влияние r_2 и r_4 исключается, если $R_2 \gg r_4$, а $R_3 \gg r_2$.

При измерении одинарным мостом весьма малых значений сопротивлений возникают существенные погрешности измерения вследствие его недостаточной чувствительности. Повышение последней за счет увеличения тока питания (а значит, и увеличения токов в плечах) ограничено допустимой мощностью рассеяния в плечах моста. От этого недостатка свободны двойные (шестиплечие) мосты.

Двойные мосты. Наиболее широко распространенная схема двойного моста представлена на рис. 10.3. Здесь влияние соединительных проводов $r_1 - r_4$ и контактов сведено к минимуму выбором значений сопротивлений резисторов $R_1 - R_4$ более 10 Ом.

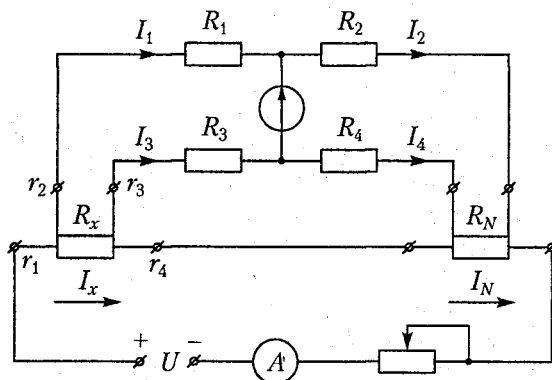


Рис. 10.3. Схема двойного моста постоянного тока

В этом случае при равновесии моста

$$I_1 = I_2; \quad I_3 = I_4; \quad I_x = I_N;$$

$$I_x R_x + I_3 R_3 = I_1 R_1;$$

$$I_4 R_4 + I_N R_N = I_2 R_2;$$

$$I_3 R_3 + I_4 R_4 = (I_x - I_3) R.$$

где R — сопротивление провода, соединяющего R_x и R_N .

Решив эту систему уравнений относительно R_x , получим:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} + R \frac{R_4}{R_3 + R_4 + R} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right).$$

Если при конструировании моста выполнить следующие условия:

- 1) $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ (сопротивления $R_1 - R_2$ и $R_3 - R_4$ изготавливаются в виде единых реохордов или реостатов каждый, по которым одновременно перемещаются подвижные контакты, обеспечивая тем самым указанное соотношение);

2) при подключении R_x и R_N соединительный провод между ними с сопротивлением R выполнить в виде короткого и толстого проводника, стараясь сделать сопротивление R как можно меньшим,

то измеряемое сопротивление R_x будет определяться из существенно более простого равенства

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2}.$$

В качестве нуль-индикаторов в двойных мостах используют магнитоэлектрические гальванометры с малым внешним критическим сопротивлением и как можно большей чувствительностью по напряжению.

Основная допускаемая погрешность определяется классом точности моста, зависящим от поддиапазона измерений. Предел основной допускаемой погрешности (в процентах) нормируется в виде формулы

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{R_k}{R_x} - 1 \right) \right],$$

где c и d — числовые коэффициенты; R_k — конечное значение сопротивления данного поддиапазона измерений; R_x — измеряемое сопротивление.

В настоящее время промышленностью выпускаются одинарные и одинарно-двойные мосты постоянного тока классов точности от 0,005 до 5,0 (например, одинарный мост постоянного тока Р3043 с диапазоном измерений от 0,005 до 999 900 Ом при базовом классе 0,5).

10.4. Мосты переменного тока

Мосты переменного тока применяются для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов, индуктивности и добротности катушек. В соответствии с условием равновесия моста переменного тока (10.3) схемы мостов могут использовать различные варианты включения в плечи измеряемых и эталонных резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов, комбинации соединений которых приведены в табл. 10.1. В качестве нуль-индикаторов в мостах переменного тока в настоящее время применяют электронные милливольтметры переменного тока или электронно-лучевые индикаторы нуля.

Мосты для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов. При измерении емкости конденсатора следует учитывать, что он обладает активными потерями. Реальный конденсатор представляется в виде эквивалентной схемы замещения, состоящей из идеальной емкости и последовательно или параллельно соединенного с ним активного сопротивления, характеризующего эквивалентные потери.

На рис. 10.4 приведены последовательная (а) и параллельная (б) схемы замещения и векторные диаграммы конденсатора с потерями, на которых φ — угол фазового сдвига тока I относительно напряжения U ; δ — угол диэлектрических потерь, дополняющий угол φ до 90° ; $\frac{I}{\omega C}$ и IR — падения напряжения на емкости C

Таблица 10.1. Различные варианты плеч мостов переменного тока в зависимости от назначения

№ схемы	Назначение моста	Плечи моста				Примечание
		Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	
1	Измерение емкости и угла потерь конденсатора с малыми потерями					—
2	Измерение емкости и угла потерь конденсатора с большими потерями					—
3	Измерение угла потерь изоляционных материалов при высоком напряжении					Точка соединения в (рис. 10.1) заземляется
4	Измерение индуктивности с использованием образцовой индуктивности					$R_x < R_N$
5	Измерение индуктивности с использованием образцовой индуктивности					$R_x > R_N$
6	Измерение индуктивности с использованием образцовой емкости					—

и активном сопротивлении R для схемы, изображенной на рис. 10.4, а; $U\omega C$ и $\frac{U}{R}$ — токи через емкость C и активное сопротивление R для схемы, изображенной на рис. 10.4, б. Из векторных диаграмм следует, что для схемы на рис. 10.4, а тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = \omega RC$, а для схемы на рис. 10.4, б — $\text{tg}\delta = 1/\omega RC$.

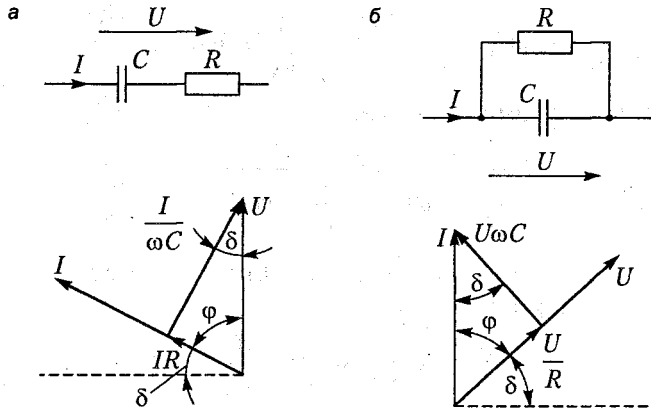


Рис. 10.4. Схемы замещения конденсатора с потерями: а — последовательная; б — параллельная — и векторные диаграммы для них

Для измерения емкости конденсаторов с малыми потерями применяется мост с последовательным соединением сопротивления R_N и емкости C_N (табл. 10.1, схема № 1), схема которого приведена на рис. 10.5. В этом случае для анализа будем использовать последовательную эквивалентную схему, изображенную на рис. 10.4, а.

Полные комплексные сопротивления плеч рассматриваемой схемы равны:

$$Z_1 = R_x - j \frac{1}{\omega C_x}; \quad Z_2 = R_1; \quad Z_3 = R_N - j \frac{1}{\omega C_N}; \quad Z_4 = R_2. \quad (10.9)$$

Подставим выражения (10.9) в формулу равновесия моста (10.3):

$$\left(R_x - j \frac{1}{\omega C_x} \right) R_2 = \left(R_N - j \frac{1}{\omega C_N} \right) R_1.$$

Используя условие равенства комплексных чисел, для R_x и C_x получим:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2}; \quad C_x = C_N \frac{R_2}{R_1}. \quad (10.10)$$

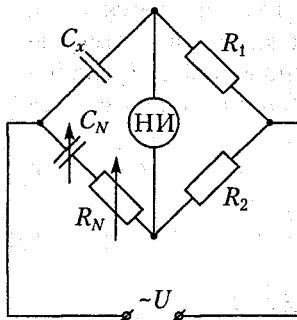


Рис. 10.5. Схема моста для измерения параметров конденсатора с малыми потерями

Тангенс угла диэлектрических потерь определяется в соответствии с векторной диаграммой, изображенной на рис. 10.4, а:

$$\text{tg}\delta = \omega R_x C_x = \omega R_N C_N.$$

Для измерения емкости конденсаторов с большими потерями применяется мост с параллельным включением сопротивления R_N и емкости C_N (табл. 10.1, схема № 2). При этом для анализа используем параллельную эквивалентную схему, приведенную на рис. 10.4, б.

Полные сопротивления плеч моста

$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x}; \quad Z_2 = R_1; \quad Z_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_N} + j\omega C_N}; \quad Z_4 = R_2.$$

При равновесии получим соотношение

$$\frac{R_2}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x} = \frac{R_1}{\frac{1}{R_N} + j\omega C_N},$$

откуда для R_x и C_x имеем те же соотношения (10.10), что и в случае моста для измерения емкости с малыми потерями:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2}; \quad C_x = C_N \frac{R_2}{R_1}.$$

Однако тангенс угла диэлектрических потерь будет определяться в соответствии с векторной диаграммой, приведенной на рис. 10.4, б:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_x C_x} = \frac{1}{\omega R_N C_N}.$$

Для определения потерь в диэлектриках, например в кабелях высокого напряжения, применяется мост, составленный по схеме № 3 (табл. 10.1), которая дает возможность уравновесить активные и реактивные составляющие моста независимо друг от друга. Заземление точки e (см. рис. 10.1) обеспечивает безопасность работы при подключении питания от источника высокого напряжения.

Мосты для измерения индуктивности и добротности катушек. Для измерения индуктивности собираются мосты, составленные по схемам № 4 или 5 (табл. 10.1).

Эти мосты практически одинаковы. Единственное различие заключается в том, что в схеме № 4 резистор R включается последовательно с катушкой с измеряемой индуктивностью, а в схеме № 5 — последовательно с эталонной катушкой в зависимости от соотношения сопротивлений R_x и R_N (см. примечания к схемам № 4 и 5 в табл. 10.1). Таким образом, можно, вообще говоря, собрать одну схему, осуществляя перевод резистора R из одного плеча в другое с помощью специального переключателя.

Последовательное соединение резистора R с катушкой L_x дает следующие сопротивления плеч моста:

$$Z_1 = R + R_x + j\omega L_x; \quad Z_2 = R_1; \quad Z_3 = R_N + j\omega L_x; \quad Z_4 = R_2.$$

С учетом условия равновесия моста (10.3) это дает соотношения

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} - R; \quad L_x = L_N \frac{R_1}{R_2}.$$

Если резистор R необходимо включить последовательно с эталонной катушкой (L_N, R_N), в этом случае условия равновесия примут вид

$$R_x = (R_N + R) \frac{R_1}{R_2}; \quad L_x = L_N \frac{R_1}{R_2}.$$

Для измерения индуктивности используют также эталонный конденсатор C с параллельно подсоединенным к нему эталонным резистором R , которые включаются в плечо, противоположное плечу с измеряемой индуктивностью L_x (табл. 10.1, схема № 6). В остальные два плеча включают магазины сопротивлений.

Полные комплексные сопротивления плеч моста таковы:

$$Z_1 = R_x + j\omega L_x; \quad Z_2 = R_1; \quad Z_3 = R_2; \quad Z_4 = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}.$$

Тогда из условия равновесия для L_x и R_x получаем:

$$L_x = CR_1R_2; \quad R_x = \frac{R_1R_2}{R}.$$

Добротность катушки Q определяется как

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega CR.$$

Применение эталонного конденсатора дает удобные прямые отсчеты значений измеряемых индуктивности и добротности катушек. Однако этот мост обладает плохой сходимостью при малых значениях добротности. Процесс уравнивания становится затруднительным при $Q = 1$, а при $Q < 0,5$ состояние равновесия практически недостижимо.

При измерении малых значений добротности хорошую сходимость имеют шестиплечие мосты (рис. 10.6). Если заменить схему соединения треугольником abd эквивалентной схемой соединения звездой с сопротивлениями Z_A, Z_B и Z_C , шестиплечий мост будет преобразован в четырехплечий, условия равновесия которого имеют вид

$$L_x = C \frac{R_2}{R_4} [R_3 R_4 + R_5 (R_3 + R_4)]; \quad (10.11)$$

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (10.12)$$

Хорошая сходимость моста объясняется независимостью условия равновесия (10.12) от регулировки резистором R_5 , необходимой для выполнения условия (10.11).

Промышленностью выпускаются мосты переменного тока классов точности от 0,1 (например, P5026M). Присущая таким мостам большая, чем у мостов постоянного тока, погрешность измерения связана с тем, они сильнее подвержены влиянию внешних помех и емкостных паразитных связей относительно земли.

Универсальные мосты. Для измерения сопротивлений, емкости и угла диэлектрических потерь конденсаторов, индуктивности и добротности катушек

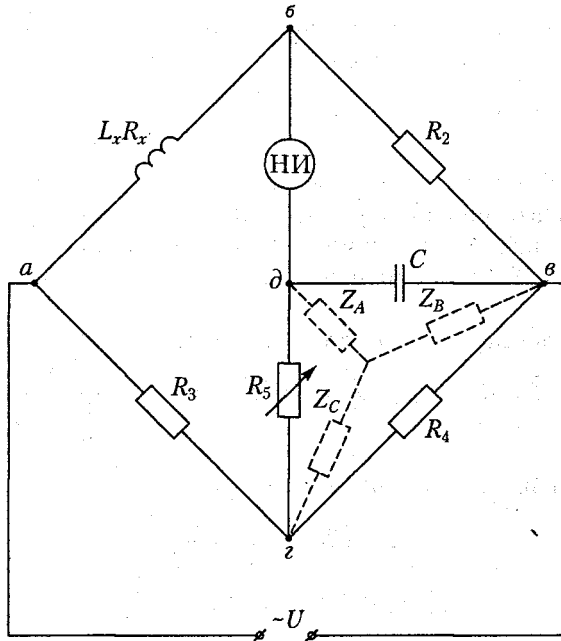


Рис. 10.6. Схема шестиплевого моста для измерения параметров катушек

промышленностью выпускаются универсальные мосты. Эти мосты содержат набор эталонных резисторов, конденсаторов и катушек индуктивностей постоянного и переменного значения. С помощью переключателя выбирается одна из рассмотренных ранее схем. Универсальные мосты предназначены для измерения указанных параметров в широких пределах. Например, универсальный измеритель L, C, R E7-11 класса точности 1,0, в основе работы которого лежит мостовой метод измерения, позволяет измерять индуктивность в диапазоне от 0,3 мкГн до 1 кГн, емкость — от 0,5 пФ до 1 Ф, электрическое сопротивление — от 0,1 Ом до 10 МОм, а также тангенс угла диэлектрических потерь в интервале 0,005–0,1 и добротность от 0,1 до 30. Погрешность измерения зависит от выбранного поддиапазона измеряемой величины. Измерения параметров конденсаторов и катушек индуктивности обычно производятся на частотах 100 и 1000 Гц, но иногда и на более высоких частотах (например, в мосте E7-14 предусмотрено измерение на частоте 10 000 Гц, а в мосте E7-12 — 1 МГц).

Автоматические мосты. Мосты с автоматизированным процессом уравнивания называются автоматическими. Они применяются для измерения параметров электрических цепей в автоматическом режиме, измерения и регистрации меняющихся во времени величин. Автоматические мосты с дополнительным регулирующим устройством применяются для автоматического управления производственными процессами. В настоящее время получили распространение автоматические мосты для измерения, регистрации и регулирования температуры различных объектов. В качестве измерительного преобразователя температуры в электрическое сопротивление в этих мостах применяют терморезисторы.

Приборостроительная промышленность выпускает различные типы автоматических мостов, погрешность которых не превышает $\pm 0,5\%$, а в некоторых случаях и $\pm 0,1\%$ предела измерения. В качестве примера назовем автоматический высоковольтный мост переменного тока СА7100-2.

10.5. Измерительные компенсаторы

Компенсаторы применяются для измерения напряжения прямым способом, а также тока, сопротивления, магнитного потока и других величин косвенным способом. В зависимости от рода тока, питающего компенсатор, различают компенсаторы постоянного и переменного тока.

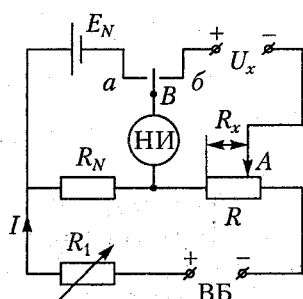


Рис. 10.7. Упрощенная схема компенсатора постоянного тока

Упрощенная схема компенсатора постоянного тока приведена на рис. 10.7. Здесь E_N — нормальный элемент с известным значением ЭДС, U_x — измеряемое напряжение, НИ — нуль-индикатор (как правило, магнитоэлектрический гальванометр), R_N — эталонный резистор, сопротивление которого выбирается в зависимости от значения рабочего тока I и значения ЭДС нормального элемента, R — резистор с известным регулируемым сопротивлением, R_1 — реостат, ВБ — вспомогательный источник питания.

Измерение U_x проводится в два этапа. На первом этапе устанавливается значение рабочего тока. Для этого переключатель B ставят в положение a и сопротивлением R_1 изменяют ток I до тех пор, пока показание гальванометра не станет равным нулю. Это будет при $IR_N = E_N$. На втором этапе переключатель B переводят в положение b и при том же токе перемещением контакта A резистора R вновь добиваются отсутствия тока в гальванометре. Это будет достигнуто при некотором значении сопротивления R_x , при этом $IR_x = U_x$, где I — установленное на первом этапе значение тока. Таким образом,

$$U_x = R_x \frac{E_N}{R_N},$$

и при постоянных E_N и R_N резистор R может быть непосредственно градуирован в вольтах.

Высокая точность измерения достигается высокой чувствительностью применяемого гальванометра или микровольтметра, наличием высокоточной меры постоянной ЭДС (нормального элемента, среднее значение ЭДС которого известно с точностью до шестого-седьмого знака), высокой точностью резисторов, а также высокой стабильностью источника питания. Например, компаратор Р3017 (по принципу действия — компенсатор без вспомогательного источника питания) имеет класс точности 0,0001 и позволяет измерять постоянные напряжения в диапазоне от единиц нановольт до 10 В.

При измерении напряжений, превышающих предел измерения компенсатора, измеряемая величина подается на вход компенсатора через делитель напряжения.

Компенсаторы постоянного тока применяют также для точного измерения тока и сопротивления косвенным способом. Постоянные токи измеряют с использованием мер электрического сопротивления.

При измерении сопротивления компенсатором последовательно измеряют падения напряжения на эталонном R_0 и измеряемом R_x сопротивлениях при одном и том же токе (R_0 и R_x включаются последовательно). Очевидно, что $R_x = R_0 U_x / U_0$. Достоинствами такого метода являются относительно невысокие требования к стабильности источника питания и возможность точных измерений при использовании высокоточных резисторов R_0 .

В компенсаторе переменного тока измеряемое напряжение уравнивается известным напряжением, создаваемым рабочим током на участке рабочей цепи. Для уравнивания двух переменных напряжений необходимо выполнение четырех условий:

- равенство напряжений по модулю;
- равенство частот;
- противоположность по фазе;
- идентичность формы кривых.

Первые три условия обеспечиваются выбором принципиальной схемы компенсатора, а также питанием исследуемой цепи и компенсатора от одного источника. Последнее условие обеспечивается дополнительными мерами.

В качестве нуль-индикаторов обычно применяют электронно-лучевые индикаторы нуля.

Компенсаторы переменного тока позволяют непосредственно измерять переменные напряжения и косвенно — ток, сопротивление, магнитный поток и другие величины (определяя при этом не только модули измеряемых величин, но и их фазы).

В зависимости от того, как производится уравнивание по модулю и фазе известной и измеряемой величин и в каких координатах выполняется отсчет измеряемой величины, компенсаторы делятся на две группы:

1. *Полярно-координатные компенсаторы* имеют фазорегулятор, который позволяет изменять фазу компенсирующего напряжения до момента компенсации. Схема такого компенсатора, измеряющего U_x в полярной системе координат, приведена на рис. 10.8. Значение ЭДС определяется по положению подвижных контактов движков Дв1 и Дв2 на шкалах калиброванной проволоки $a - б$ и магазина сопротивлений $б - в$. Сдвиг фазы напряжений регулируется фазорегулятором ФР до полного отсутствия тока в нуль-индикаторе НИ и определяется по шкале фазорегулятора. Значение рабочего тока устанавливается по амперметру А при помощи реостата R.

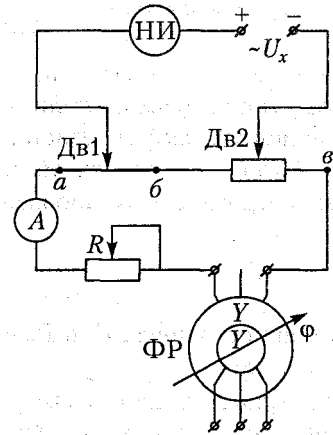


Рис. 10.8. Схема полярно-координатного компенсатора переменного тока

2. Прямоугольно-координатные компенсаторы (рис. 10.9, а) имеют две рабочие цепи (А и Б), рабочие токи в которых сдвинуты по фазе друг относительно друга на 90° (при незначительном индуктивном сопротивлении вторичной цепи воздушного трансформатора $\text{Тр}_в$ ток I_2 в ней будет определяться активным сопротивлением R_2 второй рабочей цепи Б и практически совпадать по фазе с ЭДС E_2 и отставать на 90° от тока I_1). Измеряемое напряжение уравнивается напряжением, определяемым составляющими падений напряжений на участках рабочих цепей: U_{a-b} , создаваемым током I_1 на калиброванной проволоке $a-b$ рабочей цепи А, и $U_{в-г}$, создаваемым током I_2 на калиброванной проволоке $в-г$ рабочей цепи Б. Так как сопротивления R_{a-b} и $R_{в-г}$ проволок чисто активные, напряжения U_{a-b} и $U_{в-г}$ будут сдвинуты друг относительно друга на угол 90° (как токи I_1 и I_2). Ток I_2 при неизменном значении тока I_1 зависит от частоты, так как

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2} = \frac{\omega M}{R_2} I_1, \quad (10.13)$$

где ω — угловая частота тока; M — коэффициент взаимной индукции воздушного трансформатора $\text{Тр}_в$.

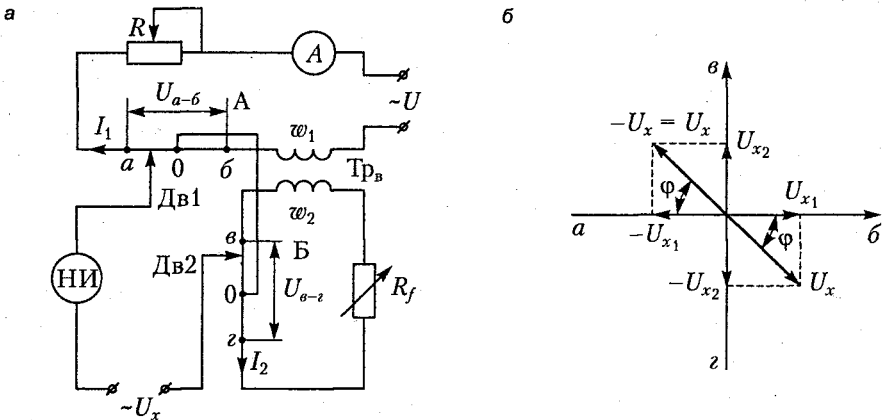


Рис. 10.9. Прямоугольно-координатный компенсатор переменного тока: а — схема; б — векторная диаграмма

Из выражения (10.13) следует, что изменение частоты приведет к изменению тока I_2 и, следовательно, к изменению градуировки шкалы проволоки $в-г$. Чтобы этого избежать, необходимо изменять сопротивление R_2 так, чтобы отношение $\omega M/R_2$ оставалось неизменным при всех частотах в пределах заданных значений. Для этой цели в рабочую цепь Б включен магазин сопротивлений R_f , значение сопротивления которого должно изменяться в зависимости от частоты источника питания.

Входная цепь компенсатора состоит из источника измеряемого напряжения U_x , нуль-индикатора НИ и участков калиброванных проволок Дв1 — 0 и Дв2 — 0.

На рис. 10.9, б показаны координатные оси $a-b$ и $в-г$, на которых отложены падения напряжений на участках Дв1 — 0 и Дв2 — 0. В момент компенсации,

когда ток, протекающий через нуль-индикатор, равен нулю, геометрическая сумма этих падений напряжений равна по модулю измеряемому напряжению U_x и сдвинута по отношению к нему на угол 180° .

Таким образом, модуль и фазу U_x можно найти по составляющим

$$U_x = \sqrt{U_{x_1}^2 + U_{x_2}^2}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{U_{x_2}}{U_{x_1}},$$

где U_{x_1} и U_{x_2} — составляющие вектора измеряемого напряжения U_x , отсчитанные по шкалам калиброванных проволок $a - б$ и $в - г$ соответственно; φ — угол между вектором U_x и составляющей U_{x_1} , который представляет собой сдвиг фазы измеряемого напряжения относительно напряжения питания.

Компенсаторы переменного тока по точности измерений значительно уступают компенсаторам постоянного тока, что объясняется в первую очередь отсутствием меры переменной ЭДС, аналогичной нормальному элементу. Вследствие этого рабочий ток устанавливается либо по приборам ограниченной точности (в лучшем случае класса точности 0,1 или 0,05), либо по нормальному элементу с использованием промежуточного термопреобразователя, что позволяет несколько повысить точность установки рабочего тока примерно до 0,02 %.

ГЛАВА 11 Приборы для измерения и регистрации изменяющихся во времени величин

11.1. Назначение и классификация средств регистрирующей техники

В процессе научно-исследовательской и производственной деятельности часто возникает необходимость не только в измерении тех или иных физических величин, но и в автоматической регистрации их значений. По результатам регистрации можно определять необходимые текущие значения измеряемой величины, анализировать характер изменения этой величины, устанавливать функциональные связи между измеряемыми параметрами и т. д. Для этой цели служат регистрирующие приборы.

В зависимости от числа одновременно регистрируемых величин различают одноканальные и многоканальные регистрирующие приборы.

В зависимости от формы записи различают самопишущие (запись в виде диаграмм) и печатающие (показания печатаются в цифровой форме) измерительные приборы. Запись может быть непрерывной (сплошная линия на диаграмме) и точечной (отдельные точки, располагающиеся на некотором расстоянии друг от друга).

К наиболее широко распространенным регистрирующим приборам относятся ленточные самописцы, записывающие пером кривую изменения величины на диаграммной бумажной ленте, аналоговые электронно-лучевые осциллографы, развертывающие кривую исследуемого сигнала на экране электронно-лучевой трубки, и цифровые осциллографы, способные запоминать и оцифровывать параметры исследуемого сигнала (см. раздел 12.6).

Важной характеристикой регистрирующих приборов является их быстродействие. Ленточные самописцы лучше всего подходят для регистрации медленных сигналов, изменяющихся за секунды, минуты и более длительные промежутки

времени. Электронно-лучевые осциллографы способны регистрировать сигналы, изменяющиеся за время от миллионных долей секунды до нескольких секунд.

11.2. Ленточные самописцы

В ленточных самописцах применяются устройства регистрации показаний в форме диаграммы. Запись осуществляется чернилами с помощью специального регистрирующего органа (пера особой конструкции), фиксирующего изменения измеряемой величины в функции времени на движущемся носителе (диаграммной бумаге).

Диаграммная бумага для самопишущих приборов выпускается в виде специальной ленты с перфорацией. Перфорация необходима для сообщения бумаге поступательного движения с помощью штифтов вращающегося валика лентопротяжного механизма. Скорость перемещения бумаги устанавливается пропорционально скорости изменения измеряемой величины. Такие диаграммы применяются при длительных наблюдениях измеряемых величин.

Координатная сетка диаграммной бумаги выполняется либо в прямоугольных координатах (когда регистрирующий орган совершает прямолинейное перемещение), либо в криволинейных координатах (при угловом перемещении пера). Запись в прямоугольных координатах более удобна при обработке диаграмм, но требует применения устройства для спрямления записи, поскольку указатель и перо электромеханического измерительного механизма движутся по дуге.

Для одновременной регистрации нескольких измеряемых величин применяются многоканальные самопишущие приборы, состоящие из нескольких измерительных механизмов и регистрирующих органов и одного общего лентопротяжного механизма.

Выпускаемые промышленностью самопишущие приборы имеют класс точности в пределах от 0,1 до 1,5. Погрешность регистрации времени составляет $\pm 0,5\%$. Время установления показаний, как правило, не превышает 2 с. Частотный диапазон не нормируется. В качестве примера приведем многоканальный (до 12 каналов) прибор измерения и регистрации А550М и самопишущий контактный прибор Н3022К.

11.3. Электронно-лучевые осциллографы

Электронно-лучевые (электронные) осциллографы предназначены для визуального наблюдения, измерения и регистрации электрических сигналов. Основными достоинствами электронно-лучевых осциллографов являются возможность исследования высокочастотных периодических и кратковременных однократно протекающих процессов. В числе других важных достоинств электронных осциллографов следует отметить также широкий частотный диапазон, высокую чувствительность, большое входное сопротивление и, как следствие, незначительное потребление мощности от исследуемого объекта.

В настоящее время выпускается множество осциллографов различного назначения и с различными характеристиками. Большое распространение получи-

ли универсальные осциллографы, предназначенные для наблюдения и измерения периодических и непериодических сигналов непрерывного и импульсного характера в широком (до 500 МГц, как, например, у осциллографа С1-104) диапазоне частот. Выпускаются осциллографы специального назначения: импульсные — для исследования периодических импульсных сигналов, стробоскопические — для исследования высокочастотных процессов, многофункциональные со сменными входными блоками, многоканальные — для одновременного наблюдения нескольких сигналов (в основном двухканальные). Имеются также специальные регистрирующие осциллографы, сочетающие в себе электронно-лучевую трубку с устройством механической временной развертки. Запоминающие осциллографы сохраняют изображение длительное время и поэтому удобны для регистрации одиночных и редко повторяющихся импульсов. Свойствами «памяти» в них обладают запоминающие электронно-лучевые трубки, которые могут сохранять изображение даже при выключенном осциллографе в течение нескольких суток.

В основе работы любого электронного осциллографа лежит преобразование исследуемых сигналов в видимое изображение, получаемое на экране электронно-лучевой трубки. Это преобразование осуществляется путем управления движением пучка электронов исследуемым напряжением.

Электронно-лучевая трубка. Простейшая электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух и в котором расположен ряд электродов (рис. 11.1): подогреваемый катод К, модулятор (сетка) М, фокусирующий анод А1, ускоряющий анод А2 (совокупность перечисленных электродов называют электронной пушкой), взаимно перпендикулярные горизонтальные (ОП_х) и вертикальные (ОП_у) отклоняющие пластины. Внутренняя поверхность экрана Э покрыта специальным составом — люминофором, способным светиться под действием бомбардирующих его электронов. Электронная пушка излучает узкий пучок электронов — электронный луч, для чего на электроды пушки подают напряжение. Интенсивность электронного луча регулируется изменением отрицательного относительно катода напряжения на модуляторе, что приводит к изменению яркости изображения на экране. Напряжение на первом аноде фокусирует поток электронов в узкий луч, позволяющий получить на экране светящееся пятно малого размера. На второй анод подается

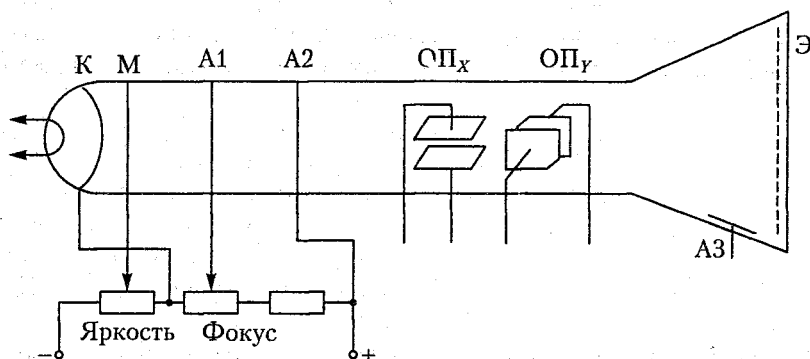


Рис. 11.1. Упрощенное устройство электронно-лучевой трубки

высокое положительное напряжение, ускоряющее электроны до скорости, необходимой для обеспечения свечения люминофора. Сформированный электронный луч проходит систему отклоняющих пластин ОП_х и ОП_у, отклоняется под действием напряжений, приложенных к этим пластинам, по осям координат X и Y соответственно и бомбардирует внутреннюю поверхность экрана. Ускоренные до необходимой скорости электроны выбивают из люминофорного покрытия фотоны, что воспринимается наблюдателем как световое изображение.

При исследовании быстро протекающих процессов с малой частотой повторения или однократных импульсов яркость свечения может оказаться недостаточной. Для ее увеличения при относительно высокой чувствительности после отклонения электронов пластинами производится их ускорение. Для этой цели на внутреннюю поверхность баллона между отклоняющими пластинами и экраном помещают анод АЗ, на который подается большое положительное напряжение, в несколько раз превышающее напряжение анода А2.

Основными характеристиками электронно-лучевой трубки являются чувствительность ЭЛТ, полоса пропускания, длительность послесвечения, рабочая площадь экрана и цвет свечения люминофора.

Чувствительность трубки определяется как $S_T = \frac{l_T}{U_T}$, где l_T — отклонение луча

на экране ЭЛТ, вызванное напряжением U_T , приложенным к отклоняющим пластинам. Обычно $S_T = 0,5 \dots 5$ мм/В. С увеличением частоты напряжения U_T чувствительность трубки уменьшается. За верхнюю частоту полосы пропускания ЭЛТ принимается частота, при которой чувствительность уменьшается до значения $0,707S_{T0}$ (S_{T0} — чувствительность на малых частотах). У рассматриваемых электронно-лучевых трубок верхняя частота лежит в пределах 350–500 МГц.

Длительность послесвечения экрана определяется интервалом времени от момента прекращения действия электронного луча до момента, когда яркость изображения составит 1 % от первоначальной. Обычно длительность послесвечения составляет порядка 0,1 с. Для наблюдения непериодических и медленно меняющихся сигналов используют трубки с длительным послесвечением. Специальные запоминающие трубки позволяют сохранять изображение сигнала до нескольких суток.

Рабочая площадь экрана определяется диаметром трубки (если экран круглый) или длиной диагонали (если экран прямоугольный). Тип люминофора определяет цвет свечения. Обычно применяют ЭЛТ с зеленым цветом свечения, однако для фотографирования с экрана осциллографа предпочтительнее трубки с голубым свечением экрана.

В современных осциллографах применяют и более сложные, в частности многолучевые, трубки для наблюдения сразу двух и более сигналов и т. д.

Осциллограф. Упрощенная функциональная схема электронно-лучевого осциллографа показана на рис. 11.2, где ВД — входной делитель напряжения, УВО — усилитель вертикального отклонения, состоящий из предварительного усилителя ПУ, линии задержки ЛЗ и выходного усилителя ВУ, КА и КД — калибраторы амплитуды и длительности соответственно, БС — блок синхронизации, ГР — генератор развертки, УГО — усилитель горизонтального отклонения, ЭЛТ — электронно-лучевая трубка, М — модулятор ЭЛТ, ОП_х и ОП_у — гори-

горизонтальные и вертикальные отклоняющие пластины соответственно, V_1 — переключатель, подключающий к входу ВД либо вход Y , либо выход калибраторов КА и КД, V_2 — переключатель, подключающий ко входу БС либо внешнюю, либо внутреннюю синхронизацию.

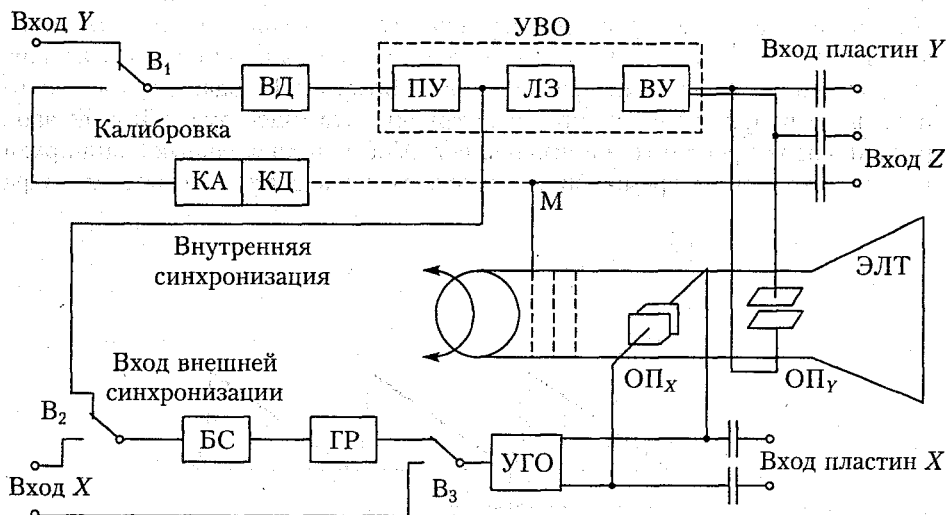


Рис. 11.2. Функциональная схема электронно-лучевого осциллографа

Исследуемый сигнал подается на вход Y канала вертикального отклонения, который может быть «открытым» или «закрытым» (переключение осуществляется с помощью специального переключателя, не показанного на схеме). При «закрытом» входе Y исследуемый сигнал проходит через конденсатор, отсекая при этом постоянную составляющую, и на входной делитель напряжения ВД поступает только переменная составляющая исследуемого напряжения (входная емкость составляет порядка десятков пикофард). При «открытом» входе Y на делитель проходит весь сигнал. Входной делитель реализует большое входное сопротивление осциллографа и расширение пределов измерения напряжений в сторону больших значений. Предварительный усилитель ПУ обеспечивает основное усиление исследуемого сигнала (а также запуск блока синхронизации БС в ждущем режиме работы осциллографа при внутренней синхронизации). Выходной усилитель ВУ служит для преобразования сигнала в напряжение, подаваемое на вертикальные отклоняющие пластины ОП $_Y$ и, в соответствии с чувствительностью трубки, достаточное для управления отклонением электронного луча ЭЛТ по оси Y с точки зрения получения удобного для визуального наблюдения изображения. Последовательное включение делителя напряжения и усилителя вертикального отклонения обеспечивает значительный диапазон исследуемых напряжений. В УВО входит также линия задержки ЛЗ, осуществляющая временную задержку исследуемого сигнала, необходимую для исследования без искажений импульсных сигналов малой длительности.

Одним из важнейших узлов электронного осциллографа является генератор линейной развертки ГР, обеспечивающий получение развернутого во времени

изображения исследуемого сигнала. Для этого электронный луч смещается по оси X с равномерной скоростью, что осуществляется подачей на горизонтальные отклоняющие пластины ОП_х линейно нарастающего пилообразного напряжения, формируемого генератором ГР. Реальная кривая этого напряжения развертки $u_{ГР}$ показана на рис. 11.3, на котором $t_{пр}$ — время прямого хода, $t_{обр}$ — время обратного хода, за которое луч возвращается в исходное положение. Для того чтобы за $t_{ГР}$ электронный луч не накладывался на экране осциллографа на исследуемый сигнал, в этом интервале на модулятор ЭЛТ подается большое отрицательное напряжение, запирающее трубку и гасящее луч. (Другой вариант решения этой проблемы — применение в ЭЛТ дополнительных бланкирующих пластин, которые на время обратного хода луча смещают его за пределы экрана.)

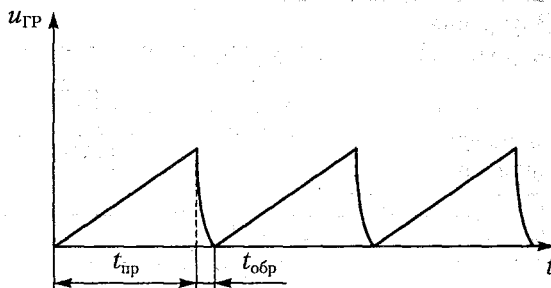


Рис. 11.3. Временная диаграмма напряжения линейной развертки

Принцип развертки показан на рис. 11.4, на котором представлены кривые напряжений u_y и $u_x = u_{ГР}$, подаваемых на пластины ОП_у и ОП_х, и получающееся при этом на экране осциллографа изображение. Пилообразное напряжение u_x показано в идеализированном виде ($t_{обр} = 0$). Цифрами 1–4 и 1'–4' обозначены точки кривых в соответствующие моменты времени. Из рисунка видно, что при равенстве периодов напряжений u_y и u_x на экране получится изображение одного периода исследуемого сигнала. При изменении периода пилообразного напряжения u_x в определенное количество раз на экране появится соответствующее число периодов исследуемого сигнала.

Исследование сигналов в широком диапазоне частот обеспечивается переключением частоты пилообразного напряжения, предусмотренным в генераторе развертки. Это позволяет наблюдать исследуемые сигналы в нужном масштабе времени. Выходное напряжение генератора ГР усиливается с помощью усилителя горизонтального отклонения УГО до значения, необходимого для управления электронным лучом в ЭЛТ и получения изображения требуемого размера.

Для получения устойчивого изображения на экране осциллографа частота линейно нарастающего пилообразного напряжения развертки должна быть кратна частоте исследуемого сигнала. Настройка осуществляется двумя ступенями — грубой и точной. Выдержать точно кратность частот напряжений u_y и u_x на практике не удастся вследствие самопроизвольного (хоть и незначительного) изменения частот генератора ГР и исследуемого сигнала, что приводит к неустойчивости изображения на экране осциллографа. Для поддержания устойчивости изображения в осциллографе предусмотрен блок синхронизации БС (рис. 11.2),

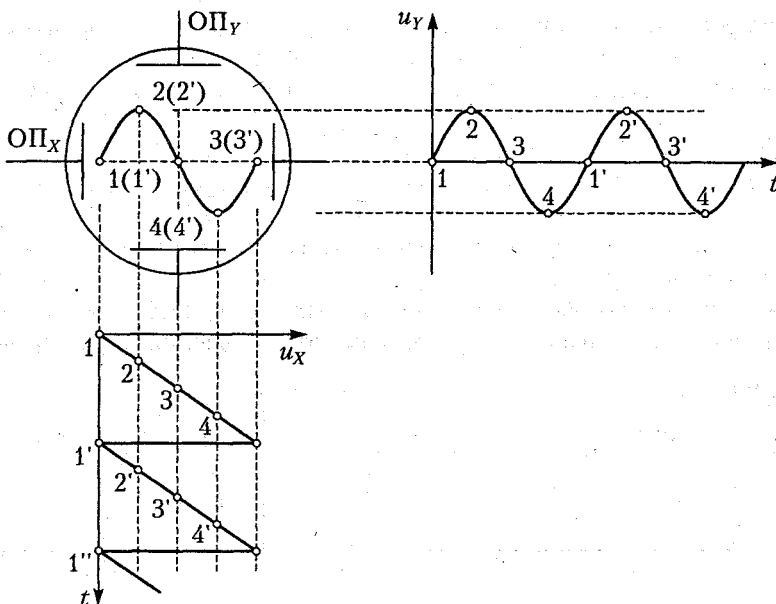


Рис. 11.4. Принцип получения изображения на экране осциллографа при линейной развертке

который в некоторых пределах изменяет частоту генератора ГР в соответствии с частотой исследуемого напряжения. Для этого с выхода предварительного усилителя ПУ канала вертикального отклонения подается сигнал на вход блока синхронизации, который формирует импульсы управления генератором развертки, принудительно заставляя его работать с частотой, кратной частоте исследуемого сигнала. Такой режим работы генератора развертки и всего осциллографа в целом называется *непрерывным*. Он применяется при наблюдении периодических сигналов.

При исследовании непериодической последовательности импульсов, одиночных импульсов или импульсов с большим периодом следования используют *ждущий* режим работы, при котором генератор развертки ГР вырабатывает пилообразный импульс $u_{ГР}$ только с приходом исследуемого импульса u_Y (рис. 11.5, а), что обеспечивает устойчивость изображения на экране осциллографа (рис. 11.5, б).

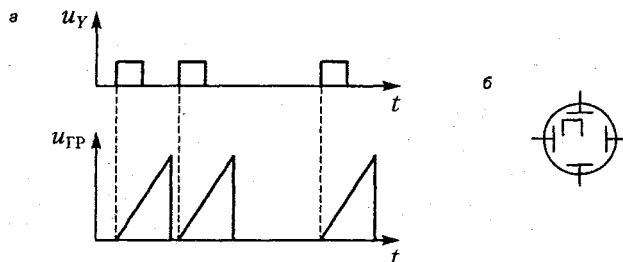


Рис. 11.5. Осциллограммы, поясняющие ждущий режим работы осциллографа

Такая синхронизация называется внутренней. Посредством переключателя В2 (см. рис. 11.2) вместо внутренней можно производить внешнюю синхронизацию, при которой к БС (и далее к ГР) подключается внешнее синхронизирующее напряжение. Как правило, это напряжение одновременно синхронизирует работу осциллографа и источника последовательности исследуемых импульсов.

При исследовании весьма коротких по длительности импульсов начинает проявляться инерционность генератора развертки, который вырабатывает пилообразное напряжение с некоторым запаздыванием $t_{ГР}$ по отношению к запускающему импульсу (рис. 11.6, а).

При этом начальная часть исследуемого импульса не разворачивается во времени и не видна на экране. Для устранения этого явления в усилителе верти-

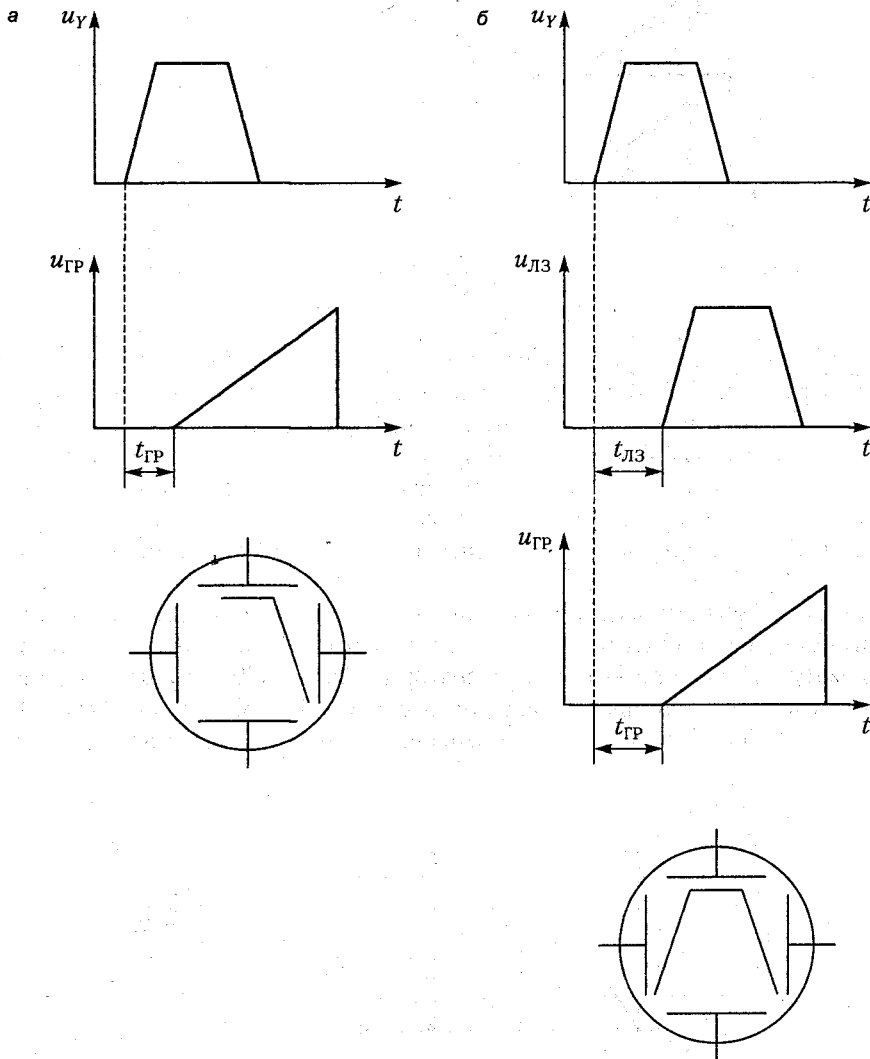


Рис. 11.6. Осциллограммы, поясняющие назначение линии задержки

кального отклонения предусмотрена линия задержки ЛЗ, которая задерживает сигнал, подаваемый на пластины ОП_у, на некоторое время $t_{лз} > t_{гр}$ (рис. 11.6, б, где $u_{лз}$ — напряжение на выходе ЛЗ). Такая задержка позволяет получить на экране осциллографа изображение всего импульса, включая его начальную часть.

Для расширения функциональных возможностей осциллограф имеет ряд входов, позволяющих осуществлять дополнительное управление электронным лучом (см. рис. 11.2). Так, вход X позволяет управлять отклонением луча по оси X посредством подачи внешнего напряжения. В этом случае переключатель В₃ устанавливается в нижнее (на схеме) положение. Предусмотрены специальные входы, позволяющие в случае необходимости подавать внешнее напряжение непосредственно на отклоняющие пластины ЭЛТ (например, если частота исследуемого напряжения находится вне пределов рабочего участка частотной характеристики усилителя). Вход Z соединен с модулятором М трубки. Подавая импульсы напряжения на этот вход в необходимые моменты времени, можно изменять яркость свечения изображения на экране, отмечая характерные точки на нем.

Для проверки и установки правильных масштабов по осям Y и X в осциллографе предусмотрены калибраторы амплитуды КА и длительности КД (см. рис. 11.2), которые с помощью переключателя В₁ подключаются на вход усилителя вертикального отклонения. Калибраторы, как правило, представляют собой генераторы прямоугольных импульсов с известными амплитудой и частотой. Меняя усиление УВО, добиваются нормированного отклонения луча на экране, что приводит к установке соответствующего коэффициента отклонения (см. основные характеристики осциллографа). По периоду калибровочного импульса можно проверить и установить нормированное значение коэффициента развертки.

Рассмотрим основные характеристики осциллографа. Коэффициент отклонения m_v — это отношение напряжения входного сигнала к отклонению луча по вертикали (в делениях шкалы, нанесенной на внешнюю поверхность экрана электронно-лучевой трубки), вызванному этим напряжением. У наиболее широко распространенных осциллографов m_v находится в пределах 50 мкВ/дел. — 20 В/дел. Величина, обратная коэффициенту отклонения, называется чувствительностью осциллографа по напряжению: $S_v = 1/m_v$.

Коэффициент развертки m_t — отношение времени Δt к отклонению луча по горизонтали (в делениях шкалы, нанесенной на внешнюю поверхность экрана электронно-лучевой трубки), вызванному напряжением развертки за это время. Обычно диапазон изменения m_t достаточно широк и, например, для осциллографа С1-65 лежит в пределах 0,01 мкс/дел. — 0,05 с/дел. Величина, обратная коэффициенту развертки, — это скорость перемещения луча по оси X.

Полоса пропускания — диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения изменяется не более чем на 3 дБ (примерно 30 %) от его значения на некоторой опорной частоте. Для универсальных осциллографов верхняя граница полосы пропускания достигает 350–500 МГц.

Погрешность измерения нормируется при подаче на вход осциллографа стандартного сигнала синусоидальной или прямоугольной формы. В зависимости от значений этих погрешностей различают четыре класса точности — 1, 2, 3, 4, при которых основные погрешности измерений не превышают 3, 5, 10 и 12 % соответ-

ственно. Часто нормируют отдельно основные погрешности коэффициента отклонения и коэффициента развертки, а также нелинейность отклонения и развертки.

Параметры входов осциллографа определяются входным активным сопротивлением $R_{\text{вх}}$ и входной емкостью $C_{\text{вх}}$. Обычно $R_{\text{вх}} > 1$ МОм, а $C_{\text{вх}}$ составляет десятки пикофарад. У высокочастотных осциллографов $C_{\text{вх}}$ составляет единицы пикофарад.

Осциллографы характеризуются и другими параметрами, такими как параметры переходной характеристики (время нарастания и максимальный выброс), максимально допустимое входное напряжение, потребляемая мощность, габариты, масса и др.

Электронно-лучевой осциллограф является универсальным измерительным прибором. Он широко применяется для наблюдения и регистрации (с помощью фотографирования) формы кривой напряжения и тока в цепях низких и высоких частот, при исследовании кратковременных и импульсных явлений, происходящих, например, в измерительно-вычислительных комплексах, в радиотехнических системах связи и т. д.

Осциллограф позволяет проводить непосредственное измерение напряжения, косвенное (по падению напряжения на шунте) измерение тока, измерение временных интервалов, частоты исследуемого сигнала, а также угла фазового сдвига между двумя исследуемыми сигналами.

При измерении амплитуды исследуемое переменное напряжение подается на вход канала Y . Затем по вертикали измеряют удвоенную амплитуду $2A_m$ (расстояние от минимального до максимального за период значений) в делениях шкалы, нанесенной на внешнюю поверхность экрана осциллографа. Зная масштаб (коэффициент отклонения m_U), можно найти $U_m = \frac{2A_m}{2} m_U$. Однако таким

способом можно измерить амплитуду только симметричного (например, синусоидального) напряжения. Если напряжение несимметричное (как, например, при наличии постоянной составляющей), то поступают следующим образом. Сначала определяют положение линии нулевого потенциала. Для этого осциллограф переводят в непрерывный режим работы, а вход Y заземляют. В этом случае электронный луч будет вычерчивать на экране горизонтальную линию, соответствующую нулевому потенциалу. Ее совмещают с одной из горизонтальных рисок шкалы, нанесенной на внешнюю поверхность экрана. Далее на вход Y подают исследуемое напряжение, амплитуду которого A_m измеряют в делениях шкалы по вертикали относительно линии нулевого потенциала. Значение амплитуды в вольтах определяют, используя коэффициент отклонения $U_m = A_m m_U$. Точно так же измеряется любое мгновенное значение напряжения (значение напряжения в какой-либо момент времени).

Измерение постоянной составляющей несимметричного периодического напряжения можно произвести, используя «открытый» и «закрытый» входы осциллографа. При «открытом» входе на экране появится изображение всего исследуемого сигнала (например, $u_{\text{откр}} = U_0 + U_m \sin \omega t$), а при «закрытом» — только его переменной составляющей ($u_{\text{закр}} = U_m \sin \omega t$). Разность ординат любой точки исследуемой кривой при «открытом» и «закрытом» входах даст постоянную составляющую ($U_0 = u_{\text{откр}} - u_{\text{закр}}$).

Измерение тока осуществляется косвенным методом по падению напряжения на шунте.

Точность измерения напряжений и токов с помощью осциллографа невелика (как правило, погрешность составляет 5–10 %), что объясняется влиянием нестабильности коэффициента усиления УВО и нелинейностью его амплитудной характеристики, ограниченной точностью калибровки коэффициента отклонения, конечными размерами линий на экране, изменением чувствительности электронно-лучевой трубки. Однако зачастую осциллограф оказывается единственным прибором, способным измерить необходимое напряжение или ток. Это относится к измерению мгновенных значений напряжения или тока, оценке максимального напряжения переднего или заднего фронтов импульса и т. д.

Временные интервалы с помощью осциллографа измеряют, либо используя метки времени калибратора с периодом длительности T_m , либо учитывая коэффициент развертки m_t . В первом случае результат измерения определяется по формуле $t_x = nT_m$, где n — число меток, находящихся в пределах измеряемого временного промежутка. Во втором случае определяют временной интервал в делениях шкалы по горизонтали l_x и результат рассчитывают по формуле $t_x = m_t l_x$. Погрешность измерения в этом случае находится в пределах 5–10 %.

Для измерения временных интервалов, а также однократно протекающих импульсных процессов необходимо применять запоминающие осциллографы. Для измерения временных интервалов очень малой длительности импульсов (10^{-9} – 10^{-10} с) используют стробоскопические осциллографы, принцип действия которых состоит в измерении мгновенных значений повторяющихся сигналов с помощью коротких, так называемых стробирующих, импульсов напряжения.

При использовании осциллографа частота в общем случае измеряется методом сравнения исследуемых колебаний с колебаниями известной частоты. Этот метод отличается относительной простотой, сравнительно высокой точностью и пригодностью для использования в широком диапазоне частот. Измерение можно проводить при трех видах развертки осциллографа: линейной, синусоидальной и круговой.

При линейной развертке период сигнала измеряемой частоты f_x сравнивается либо с периодом напряжения развертки, либо с периодом меток времени калибратора длительности T_m , либо с периодом колебаний известной частоты. В первом случае период сигнала неизвестной частоты T_x определяется в делениях шкалы на экране осциллографа, а затем частота f_x вычисляется по формуле $f_x = 1/(m_t T_x)$, где m_t — коэффициент развертки. Во втором случае период меток T_m регулируют до тех пор, пока в пределах одного периода исследуемого напряжения не уложится их целое число n . Тогда измеряемая частота $f_x = 1/(nT_m)$. В третьем варианте на экране двухлучевого осциллографа одновременно наблюдают исследуемые колебания и колебания известной частоты. Изменяя известную частоту, добиваются визуального равенства периодов, что свидетельствует о равенстве частот. Преимуществом этих способов является возможность измерения частоты периодического сигнала любой формы, недостатком — большая погрешность, которая может достигать $\pm(5-10)$ %.

Более точные результаты получаются при сравнении двух колебаний синусоидальной формы методом фигур Лиссажу. При реализации этого способа на

одну пару отклоняющих пластин осциллографа подают синусоидальное напряжение известной частоты, а на другую — исследуемое напряжение. Поскольку сам осциллограф синусоидальное напряжение не вырабатывает, на горизонтальные отклоняющие пластины ОП_х подают напряжение со входа X от внешнего источника, для чего переключатель В₃ ставится в соответствующее положение (см. рис. 11.2). Изменяя известную частоту, добиваются получения на экране неподвижной или медленно меняющейся фигуры Лиссажу. По виду фигуры Лиссажу можно судить о частоте и угле сдвига фазы неизвестного напряжения. На рис. 11.7 показаны фигуры Лиссажу для нескольких простых случаев соотношения частот и углов сдвига фаз. Кратность частот определяют по числу пересече-

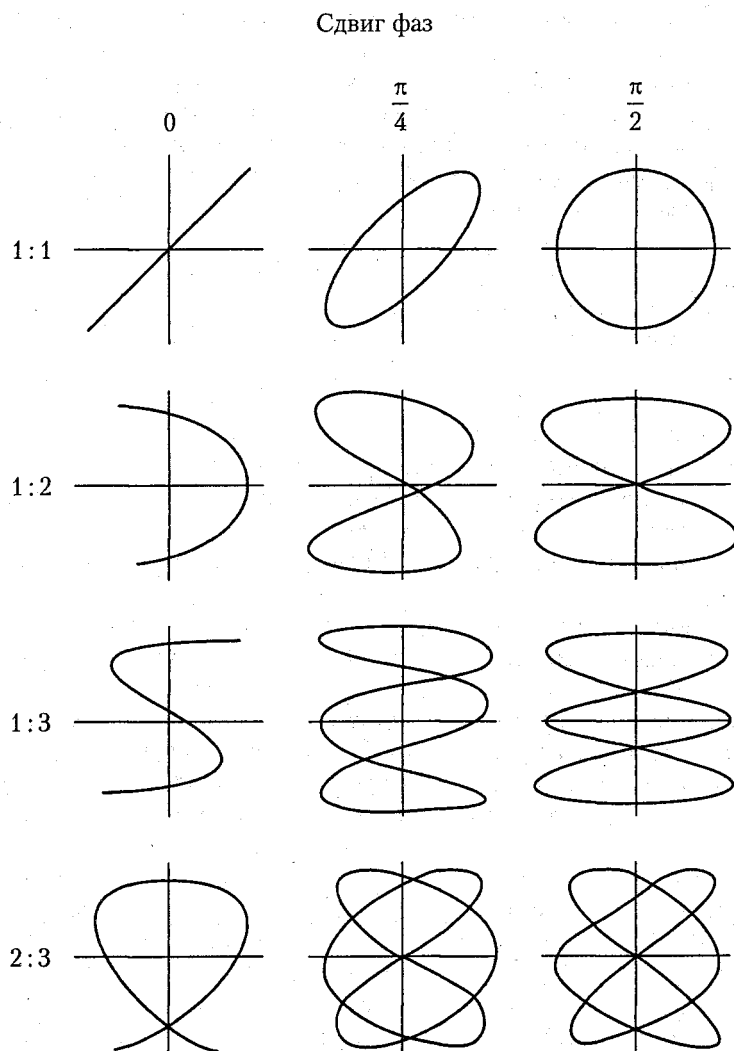


Рис. 11.7. Фигуры Лиссажу для нескольких простых случаев соотношения частот и углов сдвига фаз

ний неподвижного изображения фигуры с горизонтальной n_x и вертикальной n_y линиями. Отношение $n_x/n_y = f_y/f_x$, где f_y и f_x — частоты напряжений, поданных на вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины соответственно. Если напряжение измеряемой частоты f_x подано на вертикальные отклоняющие пластины (вход Y), а напряжение известной частоты f_0 — на горизонтальные отклоняющие пластины (вход X), то $f_x = f_0 \frac{n_y}{n_x}$. Метод фигур Лиссажу применяют при

относительно небольшой кратности частот (не более 10), так как в противном случае фигуры становятся запутанными и с трудом поддаются расшифровке.

При большей кратности сравниваемых частот предпочтительным оказывается метод круговой развертки. Круговая развертка получается при подаче на входы осциллографа X и Y двух равных по величине синусоидальных напряжений U_x и U_y с более низкой известной частотой f_0 и фазовым сдвигом друг относительно друга на 90° , что обеспечивается фазосдвигающей RC-цепью (рис. 11.8). Напряжение измеряемой более высокой частоты f_x подают на вход Z, соединенный с модулятором электронно-лучевой трубки, меняя, таким образом, яркость луча с частотой f_x . На экране получится изображение окружности штриховой линией. Число темных или светлых штрихов n равно отношению частот f_x/f_0 , откуда $f_x = n f_0$. (Отметим, что если $f_0 > f_x$, то напряжение с частотой f_x можно подать на входы X и Y, а напряжение с частотой f_0 — на вход Z.) При круговой развертке сравнивать частоты можно до кратности 50, а при фотографировании — до нескольких сотен. Погрешность измерения определяется главным образом погрешностью определения f_0 и может быть доведена до 10^{-4} – 10^{-6} %.

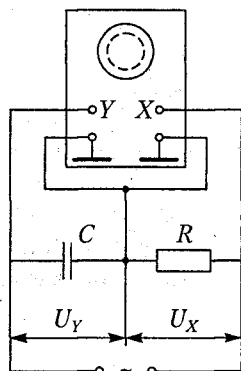


Рис. 11.8. Схема получения круговой развертки луча на экране электронно-лучевой трубки

Измерение угла фазового сдвига также можно выполнить при линейной, синусоидальной и круговой развертках. Проще всего это сделать с помощью двухканального осциллографа. В этом случае на экране получают изображение двух напряжений (одной и той же частоты), что дает возможность измерить временной сдвиг t_x между ними и период T_x . Расчет угла фазового сдвига (в градусах) осуществляется по формуле $\varphi_x = 360t_x/T_x$. Погрешность измерения φ_x определяется погрешностью измерения t_x и T_x и может достигать $\pm(5-10)$ %.

Фазовый сдвиг также можно измерить с помощью фигур Лиссажу (синусоидальная развертка). На рис. 11.9 показаны фигуры Лиссажу, получающиеся при подаче на входы осциллографа X и Y двух синусоидальных напряжений одинаковой частоты при разных фазовых углах сдвига. φ_x определяется как $\arcsin(B/A)$, где A и B — отрезки осей координат, определяемые согласно рис. 11.9. Погрешность измерения и в этом случае составляет $\pm(5-10)$ %. Способ синусоидальной развертки не позволяет однозначно определить величину фазового сдвига (сравните, например, фигуры Лиссажу, изображенные на рис. 11.9, при $\varphi_x = \pi/4$ и $\varphi_x = 7\pi/4$).

Более высокую точность измерения можно получить, включая регулируемое фазовращающее устройство между источником одного из напряжений и соот-

ответствующим входом осциллографа. Фазовый сдвиг регулируется этим устройством до тех пор, пока эллипс на экране осциллографа не превратится в прямую линию (чему соответствует $\varphi = 0$). Измеряемая разность фаз отсчитывается непосредственно по шкале фазовращателя.

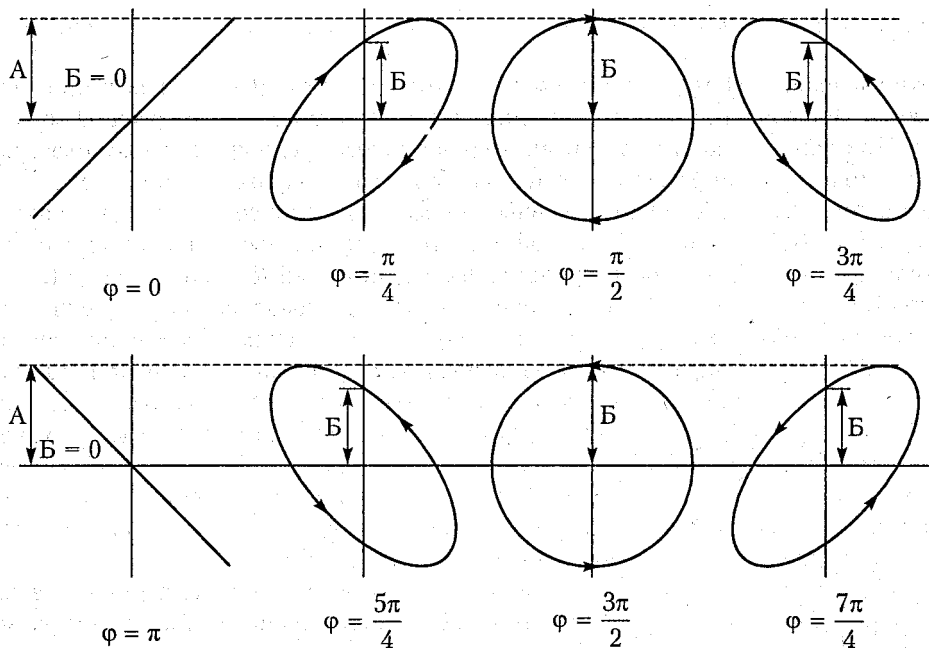


Рис. 11.9. Определение угла фазового сдвига по фигурам Лиссажу

При круговой развертке одно из напряжений используется для ее получения. Затем оба напряжения с помощью формирующего устройства преобразуются в серию кратковременных импульсов, соответствующих обычно моменту перехода функции через ноль с минуса на плюс. Эти импульсы подаются через вход Z на модулирующий электрод трубки, образуя на осциллограмме затемненные метки, расстояние между которыми соответствует искомой разности фаз.

ГЛАВА 12 Цифровые измерительные преобразователи и приборы

12.1. Общие сведения

Цифровые измерительные приборы (ЦИП) — это приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представляются в цифровой форме. В ЦИП в соответствии со значением измеряемой величины образуется код, а затем в соответствии с кодом измеряемая величина представляется на отсчетном устройстве в цифровой форме.

Цифровой прибор включает в себя два обязательных функциональных узла: *аналого-цифровой преобразователь* (АЦП) и *цифровое отсчетное устройство*. АЦП выдает код в соответствии со значением измеряемой величины, а отсчетное устройство отражает это значение в цифровой форме.

АЦП являются не только составной частью ЦИП. Они используются также в измерительных информационных, управляющих и других системах. АЦП выпускаются промышленностью и в качестве автономных устройств, которые отличаются от ЦИП отсутствием десятичного отсчетного устройства (на выходе они дают только код). Как правило, они выпускаются более быстродействующими и работающими в одном диапазоне для одной измеряемой величины.

Кроме АЦП к цифровым преобразователям относятся *цифроаналоговые преобразователи* (ЦАП), предназначенные для преобразования кода в дискретную аналоговую величину. ЦАП также выпускаются не только как составная часть ЦИП, но и как автономные устройства. В настоящее время АЦП и ЦАП выпускаются в виде интегральных микросхем.

Для образования кода непрерывная измеряемая величина в ЦИП дискретизируется во времени и квантуется по уровню.

Дискретизацией непрерывной во времени величины $x(t)$ называется операция ее преобразования в прерывную во времени величину, то есть в величину, значения которой отличны от нуля и совпадают с соответствующими значениями $x(t)$ только в определенные моменты времени. Промежуток между двумя со-

седними моментами дискретизации называется шагом дискретизации, который может быть постоянным или переменным.

Квантованием по уровню непрерывной по уровню величины $x(t)$ называется операция ее преобразования в квантованную величину $x_k(t)$, которая может принимать в заданном диапазоне определенное конечное число фиксированных значений — уровней квантования. Разность между ближайшими уровнями называется ступенью, или шагом квантования, или квантом.

Код в ЦИП вырабатывается в соответствии с отождествляемым измеряемому значению уровнем квантования. Отождествление может осуществляться либо с ближайшим большим или равным, либо с ближайшим меньшим или равным, либо с ближайшим уровнем квантования. Число возможных уровней квантования определяется устройством ЦИП. От числа уровней квантования зависит емкость (число возможных отсчетов) отсчетного устройства.

В результате квантования измеряемой величины по уровню возникает *погрешность дискретности*, обусловленная тем, что бесконечное множество значений измеряемой величины отражается конечным числом кодовых комбинаций. Возникновение погрешности дискретности иллюстрирует рис. 12.1, где $x(t)$ — график изменения измеряемой величины; $x_k(t)$ — график изменения квантованной величины при отождествлении с ближайшим уровнем квантования; t_1, t_2, \dots, t_n — моменты времени измерений; $x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}$ — уровни квантования; A_1, A_2, \dots, A_n — ординаты, соответствующие показаниям ЦИП при измерении $x(t)$ в моменты t_1, t_2, \dots, t_n . Как видно из рисунка, в большинстве случаев измерений имеется разность между показаниями ЦИП и значениями измеряемой величины в моменты измерений. Эта разность есть абсолютная погрешность дискретности Δx_d .

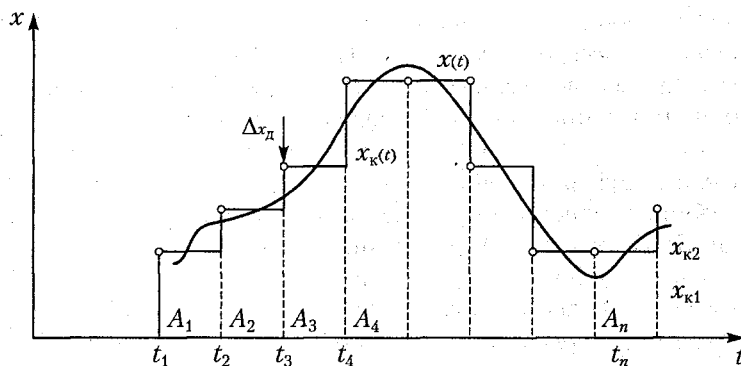


Рис. 12.1. Временная диаграмма измеряемой величины $x(t)$, иллюстрирующая возникновение погрешности дискретности

Погрешность дискретности присуща ЦИП и отсутствует у аналоговых приборов. Однако она не является препятствием для увеличения точности ЦИП, так как погрешность дискретности можно сделать достаточно малой выбором числа уровней квантования.

В ЦИП кодирование производится по определенному правилу — например, с использованием системы счисления.

В десятичной системе счисления любое целое число N можно представить в виде

$$N = \sum_{i=1}^{i=n} k_i 10^{i-1},$$

где n — число разрядов; k_i — коэффициент, принимающий значения 0, 1, 2, ..., 9 (используется 10 различных символов). Например, число 273 можно представить в виде суммы: $2 \cdot 10^2 + 7 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0$. Для упрощения записи обычно пишут только значения коэффициентов (символов) k_i , располагая их слева направо по убывающим номерам. При такой записи положение коэффициента определяет его принадлежность к соответствующему разряду.

В двоичной системе счисления любое целое число N можно представить в виде

$$N = \sum_{i=1}^{i=n} k_i 2^{i-1},$$

где n — число разрядов; k_i — коэффициент, принимающий значения 0 и 1 (используются два символа). Например, то же число 273 в двоичной системе равно $1 \cdot 2^8 + 0 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$. Для упрощения записи указывают только коэффициенты k_i , располагаемые в соответствии с порядком следования разрядов, то есть в двоичной системе число 273 равно 100010001.

Наиболее простая система счисления — единичная, основанная на одном символе (цифра 1), при помощи которого можно выразить любое число: например, в единичной системе число 9 равно 111111111.

Кроме того, находят применение комбинации систем счисления. Например, двоично-десятичная система строится на сочетании признаков двоичной и десятичной систем. Принимается расположение десятичных разрядов, но цифра каждого десятичного разряда изображается в двоичной системе. Так, число 273 в двоично-десятичной системе будет равно 0010 0111 0011.

Коды могут образовываться и без систем счисления — например, с помощью комбинации целых положительных чисел $A_1-A_2-A_3-A_4$. Эти числа выбираются так, чтобы их линейная комбинация $k_1A_1 + k_2A_2 + k_3A_3 + k_4A_4$ могла принимать вид любого целого числа от 0 до 9 при k_1, k_2, k_3, k_4 , равных 0 или 1. Например, A_1-A_4 можно выбрать такими: 5-2-1-1 или 1-2-4-8 и т. д.

При реализации кодов каждому символу используемого метода (системы счисления или комбинации чисел) должен соответствовать свой элемент кода. В зависимости от очередности передачи элементов кода все коды можно разделить на последовательные и параллельные. У *последовательного кода* элементы передаются последовательно во времени (причем могут передаваться по одному каналу). У *параллельного кода* элементы передаются одновременно по различным каналам.

При образовании последовательного кода импульсами постоянного тока, если считать, что символу 1 двоичной системы счисления соответствует наличие импульса, а символу 0 — отсутствие, число 273 в двоичной системе будет иметь код, показанный на рис. 12.2, а. Каждый импульс кода в зависимости от места во времени имеет определенную значимость — вес. Построенный таким образом код называется *двоичным кодом*.

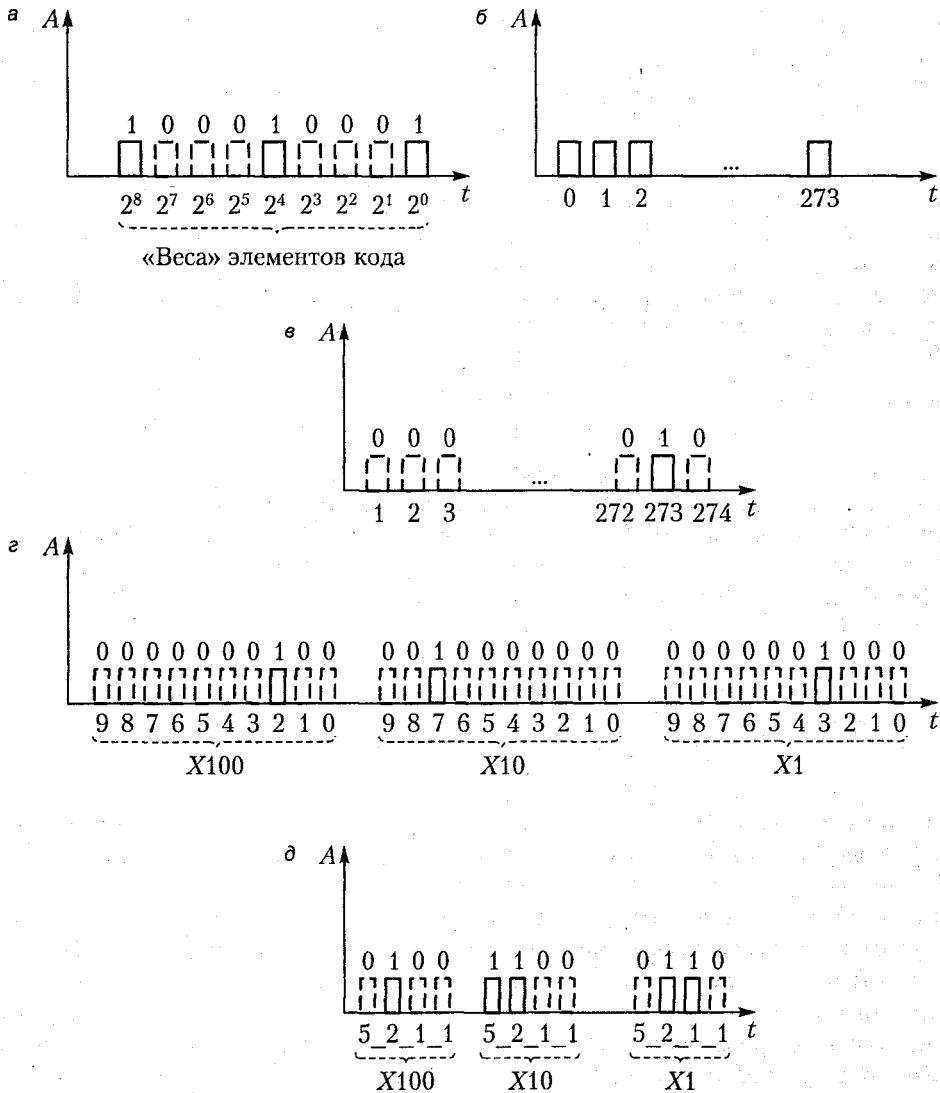


Рис. 12.2. Коды числа 273: а — двоичный; б — единичный; в — единичный позиционный; г — единично-десятичный; д — последовательный тетрадно-десятичный с весами элементов кода, равными 5-2-1-1

На рис. 12.2, б показан последовательный код, построенный на единичной системе счисления. Такой код называется *единичным*. Он более громоздок, чем двоичный, но его основное достоинство заключается в простоте суммирования импульсов кода с помощью пересчетных устройств.

При *единичном позиционном коде* число выражается положением (порядковым номером) элемента кода во времени (последовательный код) или номером канала с элементом кода (параллельный код). На рис. 12.2, в представлен последовательный единичный позиционный код числа 273.

При использовании десятичной системы счисления в практике нашел применение *единично-десятичный код*, в котором для передачи значения десятичного разряда требуется десять элементов кода (десять мест расположения импульса) с весами 0, 1, 2, ..., 9 (рис. 12.2, г).

В ЦИП находят применение *двоично-десятичный код* с весами элементов кода одного десятичного разряда, равными 8-4-2-1, а также *тетрадно-десятичные коды* с «весами» 2-4-2-1, 4-2-2-1, 5-2-1-1 и др. Эти коды более удобны в управлении десятичным отсчетным устройством, чем двоичный код, и мало отличаются от двоичного по числу элементов. На рис. 12.2, д показан последовательный тетрадно-десятичный код числа 273 с весами элементов кода, равными 5-2-1-1.

Рассмотрим основные методы преобразования значений непрерывных измеряемых величин в коды.

Метод последовательного счета. При этом методе (рис. 12.3, а) происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины x с известной величиной x_k , ступенчато возрастающей (или убывающей) с шагом (ступенью) квантования по уровню. Число ступеней, при котором наступает равенство $x_k(t_n) = x$, равно номеру отождествляемого уровня квантования, в соответствии с которым вырабатывается код, поступающий на отсчетное устройство.

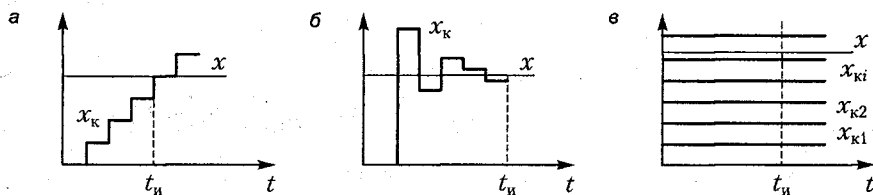


Рис. 12.3. Методы преобразования значений непрерывных измеряемых величин в коды: а — последовательного счета; б — последовательного приближения; в — считывания

Метод последовательного приближения (поразрядного уравнивания). При этом методе (рис. 12.3, б) происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины x с известной величиной x_k , изменяющейся скачками по определенному правилу (исключая единичную систему счисления). Значение известной величины, при котором наступает равенство $x_k(t_n) = x$, равно номеру отождествляемого уровня квантования, в соответствии с которым вырабатывается код, поступающий на отсчетное устройство.

Метод считывания. При этом методе (рис. 12.3, в) происходит одновременное сравнение измеряемой величины x со всеми известными величинами x_{k1} , x_{k2} , ..., x_{ki} , значения которых равны уровням квантования. Известная величина, равная измеряемой $x_k(t_n) = x$, дает номер отождествляемого уровня квантования, в соответствии с которым образуется код.

Метод считывания обладает наибольшим быстродействием и в настоящее время находит применение в сверхбыстродействующих параллельных и смешанных (параллельно-последовательных) АЦП, являясь основой современных измерительных приборов, таких как цифровые осциллографы и приборы для контроля качества электроэнергии и измерений электроэнергетических величин (см. азел 12.6).

В зависимости от способа преобразования непрерывной величины в код различают три группы ЦИП:

- ЦИП *последовательного счета* — основаны на использовании метода последовательного счета;
- ЦИП *последовательного приближения* (поразрядного уравнивания, кодово-импульсные) — основаны на использовании метода последовательного приближения;
- ЦИП *считывания* — строятся с использованием метода считывания.

В соответствии с измеряемой величиной ЦИП разделяются на вольтметры, частотомеры, фазометры, омметры и др. В зависимости от степени усреднения значений измеряемой величины ЦИП делятся на приборы, измеряющие мгновенное значение, и приборы, измеряющие среднее за определенный интервал времени значение (интегрирующие). Все ЦИП делятся на группы по точности и быстродействию. По режиму работы цифровые приборы подразделяются на циклические и следящие.

В циклических приборах процесс преобразования всегда протекает независимо от значения измеряемой величины по заданной программе от начала до конца. В следящих ЦИП процесс преобразования начинается только при отклонении измеряемой величины от ранее измеренного значения на определенное приращение.

12.2. Основные характеристики ЦИП

Статическая характеристика преобразования. На рис. 12.4 показана статическая характеристика преобразования идеального ЦИП, где x — измеряемая величина, N — выходной код, $x_{к1}, \dots, x_{к5}$ — уровни квантования, Δx_k — шаг квантования. Под идеальным ЦИП понимают прибор, имеющий только одну погрешность — погрешность дискретности.

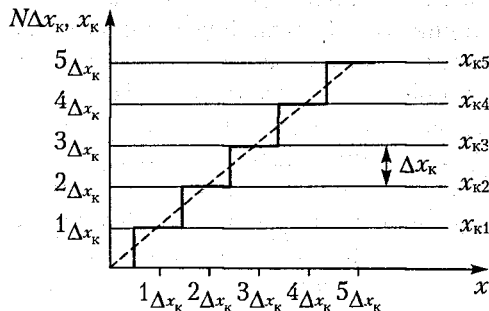


Рис. 12.4. Статическая характеристика преобразования идеального ЦИП

Статические погрешности. Основная погрешность ЦИП складывается обычно из четырех составляющих:

- погрешности дискретности Δx_k ;

- погрешности реализации уровней квантования Δx_p , возникающей из-за несоответствия принятых значений уровней квантования их реальным значениям;
- погрешности от наличия порога чувствительности Δx_q (или его нестабильности) сравнивающего устройства, возникающей при сравнении неизвестной величины x с известной x_k ;
- погрешности Δx_n от действия помех на ЦИП.

Пусть определение отождествляемого уровня в ЦИП (для примера рассматриваем ЦИП последовательного счета) происходит при выполнении условия $x_k \geq x$, то есть отождествление происходит с ближайшим большим или равным уровнем квантования (рис. 12.5). Таким образом, в момент времени t_2 для погрешности ЦИП имеет место равенство $\Delta x = x_{ki} - x = \alpha \Delta x_k$, где α — коэффициент, принимающий значения в пределах от 0 до 1. Если для упрощения анализа принять составляющие инструментальной погрешности равными нулю ($\Delta x_p = \Delta x_q = \Delta x_n = 0$), то Δx есть погрешность дискретности Δx_d , принимающая значения в пределах от 0 до Δx_k . Поскольку α зависит от измеряемой величины x , которая является случайной величиной, то погрешность дискретности также имеет случайный характер. В силу равной вероятности появления любого значения измеряемой величины в пределах одного шага квантования дифференциальный закон распределения погрешности дискретности принимается равномерным.

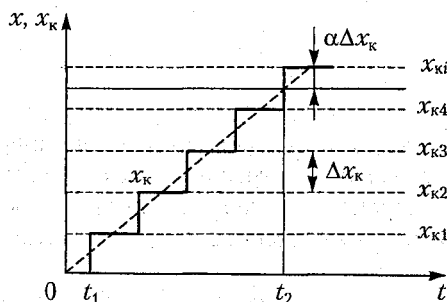


Рис. 12.5. Диаграмма, иллюстрирующая отождествление измеряемой величины x с ближайшим большим или равным уровнем квантования

При отождествлении неизвестного размера величины x с ближайшим меньшим или равным уровнем квантования ($x_k \leq x$) погрешность дискретности изменяется в пределах от 0 до $-\Delta x_k$.

При отождествлении неизвестного размера величины x с ближайшим уровнем квантования вследствие равной вероятности появления значений x в пределах одного кванта погрешность Δx_d находится в диапазоне от $-\Delta x_k/2$ до $+\Delta x_k/2$.

Расчет числовых характеристик законов распределения показал, что способ отождествления влияет на систематическую составляющую погрешности дискретности (которая для последнего способа отождествления равна нулю) и не оказывает влияния на дисперсию и среднее квадратическое значение этой погрешности. На рис. 12.6 показаны графики зависимости Δx_d от x при указанных трех способах отождествления, подтверждающие приведенные выше выводы.

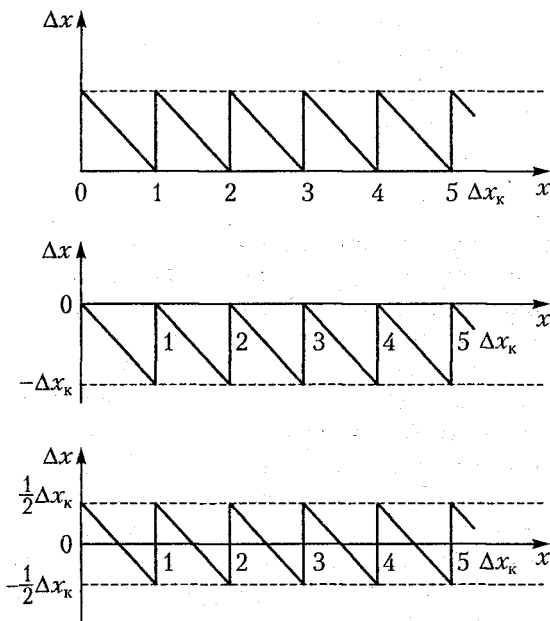


Рис. 12.6. Графики зависимости Δx_d от x при различных способах отождествления

Погрешность реализации уровней квантования рассмотрим для первого способа отождествления при смещении всех уровней квантования на $x_{см}$. В момент установления равенства x и x_k примем $(x_{ki} + x_{см}) - x = \alpha \Delta x_k$. Тогда погрешность ЦИП $\Delta x = x_{ki} - x = \alpha \Delta x_k - x_{см}$, то есть появляется составляющая погрешности, связанная со смещением уровней, — погрешность реализации уровней ($\Delta x_p = x_{см}$). Если смещение уровней зависит от номера уровня, то погрешность Δx_p зависит от x . Погрешность Δx_p также может иметь систематическую и случайную составляющие.

Для определения влияния порога чувствительности $x_{сп}$ сравнивающего устройства (СУ) примем $\Delta x_p = \Delta x_{и} = 0$ и рассмотрим ЦИП последовательного счета, у которого срабатывание СУ происходит при $x_k \geq x + x_{сп}$ (рис. 12.7). В этом случае погрешность ЦИП $\Delta x = x_{ki} - x = \alpha \Delta x_k + x_{сп}$ и вторая составляющая — погреш-

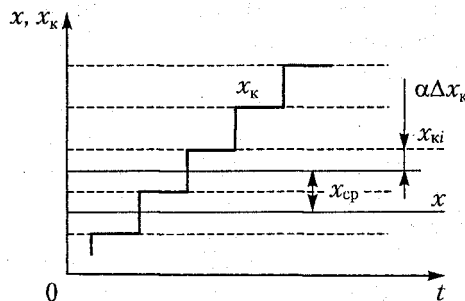


Рис. 12.7. Диаграмма, характеризующая порог чувствительности сравнивающего устройства

ность от наличия порога срабатывания СУ, то есть $\Delta x_q = x_{cp}$. Погрешность Δx_q может иметь систематическую и случайную составляющие.

Рассмотрим погрешности, возникающие в ЦИП при квантовании временного интервала. Временной интервал t_x измеряется путем счета квантовых импульсов стабильной частоты $f_0 = 1/T_0$, прошедших в счетчик импульсов за время t_x (рис. 12.8). В общем случае t_x не кратно T_0 , и поэтому возникает погрешность $\Delta t = t - t_x$, где $t = NT_0$ (N — число импульсов, зарегистрированных счетчиком импульсов). Эта погрешность зависит от временного сдвига старт- и стоп-импульсов относительно квантовых импульсов и имеет две составляющие Δt_1 и Δt_2 , то есть $\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2$.

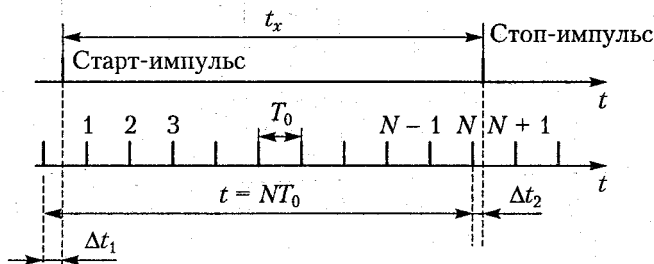


Рис. 12.8. Погрешности, возникающие в ЦИП при квантовании временного интервала

Первая составляющая Δt_1 является погрешностью от случайного расположения начала шкалы (погрешностью синхронизации). Она лежит в пределах $0 \dots T_0$ и имеет равномерный дифференциальный закон распределения, поскольку появление старт-импульса между квантуемыми импульсами равновероятно. Вторая составляющая погрешности Δt_2 вызвана случайным расположением стоп-импульса относительно квантовых импульсов. Дифференциальный закон распределения этой погрешности также равномерный в пределах от $-T_0$ до 0 .

Результирующая предельная погрешность $\Delta t_m = \pm T_0$. Закон распределения результирующей погрешности является распределением Симпсона (треугольным) в пределах от $-T_0$ до T_0 .

Предельные значения и среднее квадратическое отклонение результирующей погрешности (математическое ожидание равно нулю) снижаются синхронизацией стартового и квантующего импульсов со сдвигом $T_0/2$, то есть расположением стартового импульса в середине между двумя соседними квантуемыми импульсами.

Дополнительные погрешности ЦИП, так же как и в аналоговых приборах, возникают при изменении внешних факторов (температуры, давления и т. д.).

Нормирование пределов основной и дополнительных погрешностей ЦИП производят в соответствии с требованиями существующих нормативных документов. Анализ показывает, что погрешность ЦИП имеет аддитивную и мультипликативную составляющие, а предел основной допускаемой погрешности (в процентах) выражается формулой вида

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{x_k}{x} - 1 \right) \right],$$

где c, d — постоянные числа; x_k — номинальный предел измерений.

Динамические погрешности. Динамические погрешности бывают первого и второго рода. Погрешности первого рода обусловлены инерционностью элементов измерительной части прибора и влияют на динамические свойства ЦИП. Погрешности второго рода возникают из-за того, что измерение производится в один момент времени, а результат измерения приписывается либо началу цикла преобразования, либо его концу. Анализ показывает, что обе погрешности ограничивают допустимую скорость изменения (частоту) измеряемой величины при заданной длительности цикла.

Диапазон измерений. Для ЦИП указывают диапазон или пределы измерений (если прибор многопредельный). При переходе с одного предела на другой относительная погрешность изменяется, что объясняется изменением погрешности дискретности и других составляющих основной погрешности. Переход с одного предела измерений на другой в ЦИП выполняется вручную или автоматически.

Значение единицы младшего разряда. Предел измерений и число разрядов кода определяют значение единицы младшего разряда кода ЦИП.

Разрешающая способность. Характеристикой ЦИП является разрешающая способность, определяемая равной числу уровней квантования.

Входное сопротивление ЦИП влияет на потребляемую от исследуемого объекта мощность и в конечном итоге — на результат измерения. Чтобы влияние было минимальным, входное сопротивление прибора, например вольтметра, делают как можно большим. У современных цифровых вольтметров постоянного тока на некоторых поддиапазонах входное сопротивление достигает 10^{10} Ом и более.

Помехозащищенность. Помехи, действующие на ЦИП, делятся на помехи нормального вида и помехи общего вида. *Помехи нормального вида* — это помехи, эквивалентный генератор которых включается последовательно с источником измеряемого напряжения. *Помеха общего вида* возникает из-за разности потенциалов между источником измеряемого напряжения и точкой заземления прибора.

Для уменьшения действия помех нормального вида в виде переменного напряжения (главным образом частотой 50 Гц) применяют фильтры или ЦИП с интегрированием входного сигнала.

Для борьбы с помехами общего вида схему прибора и его конструкцию выбирают такими, чтобы сопротивление контура для тока помехи было максимальным. Это достигается, например, изолированием входной цепи прибора от его корпуса.

12.3. Основные компоненты цифровых измерительных приборов

Все компоненты ЦИП выполняются на элементах микроэлектроники — интегральных микросхемах.

Сравнивающие устройства (СУ). Эти устройства предназначены для сравнения значений известной (x_1) и неизвестной (x_2) величин и формирования выходного сигнала в зависимости от результатов сравнения. В ЦИП применяют СУ, фиксирующие следующие соотношения между x_1 и x_2 :

1. СУ имеет два входа (на которые подаются известная и неизвестная величины) и один выход. При $x_1 < x_2$ выходной сигнал имеет одно фиксированное значение, при $x_1 \geq x_2$ — другое. Такое сравнивающее устройство называется *компаратором*. Компаратор является элементом аналого-цифрового преобразователя и может рассматриваться как простейший (одноуровневый) АЦП, если на один его вход подать заданный уровень компарирования x_1 , а на другой — измеряемый сигнал x_2 .
2. СУ имеет два входа и два выхода. При $x_1 < x_2$ появляется сигнал на одном выходе, при $x_1 > x_2$ — на втором, при $x_1 = x_2$ на обоих выходах сигналы равны 0.

На самом деле выходной сигнал реальных СУ изменяет свое значение не в момент, когда $x_1 = x_2$, а при некоторой разности $x_1 - x_2 = x_{\text{ср}}$, называемой порогом чувствительности или порогом срабатывания СУ. Наличие $x_{\text{ср}}$ приводит к появлению погрешности.

Важными характеристиками СУ являются входное сопротивление и быстродействие, которые зачастую определяют входное сопротивление и быстродействие ЦИП в целом.

Пересчетные устройства (ПУ). Эти устройства применяют для деления частоты импульсов и для преобразования единичного кода в двоичный или двоично-десятичный и т. д.

Компаратор со счетным входом является ПУ с коэффициентом деления, равным 2, так как частота импульсов на выходе компаратора в два раза ниже частоты импульсов на его счетном входе. Если соединить последовательно n компараторов, то получим ПУ с коэффициентом деления $2n$.

Вводя дополнительные связи в ПУ из четырех компараторов Кп1 — Кп4, можно сократить число их состояний с 16 до 10 и получить ПУ с коэффициентом деления, равным 10.

Известны различные способы введения дополнительных связей, один из которых иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 12.9. Эта схема работает в соответствии с кодом 1–2–4–2, то есть преобразует единичный код в пределах одного десятичного разряда в указанный код.

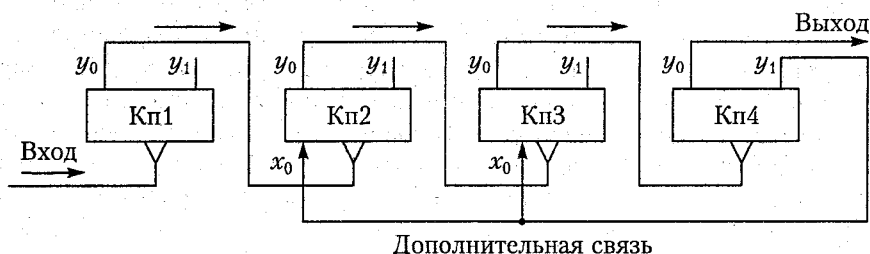


Рис. 12.9. Схема пересчетного устройства с дополнительными связями

Соединяя последовательно десятичные ПУ, можно получить ПУ с коэффициентом пересчета $10m$, где m — число десятичных ПУ. Такие ПУ применяются в качестве делителей частоты импульсов, преобразователей единичного кода в двоично-десятичный код и др.

Пересчетные устройства, снабженные цифровым отсчетным устройством для отображения номера состояния схемы, могут использоваться для счета поступающих на вход ПУ импульсов и поэтому называются счетчиками импульсов.

В ЦИП находят применение реверсивные ПУ, которые не только суммируют, но и вычитают импульсы в двоичном или двоично-десятичном кодах.

Логические элементы. В ЦИП широко применяют логические элементы, реализующие логические функции. Входными и выходными сигналами этих элементов являются переменные, принимающие только два значения: 1 (высокий потенциал) и 0 (низкий потенциал). Основными логическими элементами ЦИП являются:

1. Логический элемент ИЛИ, реализующий функцию логического сложения. Он имеет несколько входов и один выход. Выходная переменная принимает значение 1, если хотя бы одна входная переменная принимает значение 1. Выходная переменная принимает значение 0, если все входные переменные равны 0.
2. Логический элемент И, реализующий функцию логического умножения. Он также имеет несколько входов и один выход. Выходная переменная принимает значение 1, если все входные переменные принимают значение 1. Выходная переменная принимает значение 0, если хотя бы одна входная переменная равна 0. Элемент И называется *схемой совпадения* и может применяться как логический ключ, один из входных сигналов которого является управляющим.
3. Логический элемент НЕ, реализующий функцию логического отрицания. Если входная переменная имеет значение 1, то переменная на выходе принимает значение 0, и наоборот, если переменная на входе равна 0, то на выходе будем иметь 1. Таким образом, этот логический элемент инвертирует значение переменной.

Ключи. Ключами называются устройства, выполняющие функции выключателей и переключателей. Различают логические (цифровые) и измерительные (аналоговые) ключи. Логические ключи предназначены для коммутации цепей прохождения сигналов с двумя различимыми уровнями. Измерительные ключи коммутируют цепи прохождения сигналов, уровень которых меняется непрерывно. Среди ключей, управляемых электрическими сигналами, различают электро-механические (электрические реле) и электронные (диоды, транзисторы и др.).

Электро-механические ключи обладают лучшими коммутационными характеристиками, но они инерционны и менее надежны, чем электронные.

Электронные ключи влияют на режим коммутируемой цепи и вносят погрешность, ограничивающую повышение точности ЦИП. Чтобы эта погрешность находилась в допустимых пределах, остаточные параметры (сопротивления ключа в открытом и закрытом состояниях и т. п.) измерительных ключей не должны превышать допустимых значений. Требования к остаточным параметрам логических ключей всегда значительно ниже.

Цифроаналоговые преобразователи. Эти устройства предназначены для преобразования кода в квантованную величину (напряжение, сопротивление и т. п.). Для преобразования кода в напряжение используют дискретные делители напряжения последовательного и параллельного типов. В настоящее время в ЦИП широко применяется параллельный дискретный делитель напряжения. Для пре-

образования кода в сопротивление используют дискретные регулируемые резисторы, применяемые в автоматических цифровых мостах.

Аналого-цифровые преобразователи. АЦП предназначены для преобразования аналогового входного сигнала в цифровые коды. Это преобразование осуществляется на основе операции сравнения двух однородных сигналов, выполняемой компаратором.

АЦП, построенный на основе набора компараторов со смещенными друг относительно друга уровнями срабатывания ($x_1 < x_2 < \dots < x_M$), подключенных параллельно к источнику входного сигнала, называется *параллельным* (рис. 12.10).

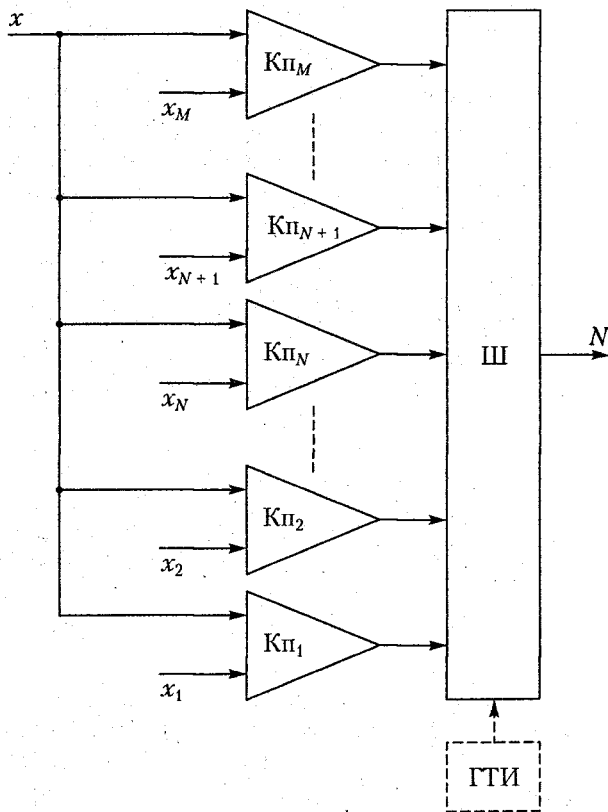


Рис. 12.10. Структурная схема параллельного АЦП

При появлении на входе АЦП сигнала x , удовлетворяющего условию $x_N \leq x < x_{N+1}$ (где $1 \leq N \leq M$), на выходах компараторов $Кп_1, Кп_2, \dots, Кп_N$ с уровнями срабатывания x_1, x_2, \dots, x_N появится сигнал, соответствующий 1, а на выходах остальных компараторов — сигнал, соответствующий 0. Таким образом, устройство примет одно из $M + 1$ возможных состояний, соответствующее N сработавших компараторов. С выходов компараторов сигналы поступают на шифратор $Ш$, который формирует соответствующий двоичный или двоично-десятичный код (для ввода в ЭВМ или других необходимых преобразований).

АЦП параллельного типа обладают высоким быстродействием и простой структурой. Их основной недостаток — большая потребляемая мощность вследствие использования большого числа компараторов. Однако благодаря быстрому развитию элементной базы (применение технологии интегральных микросхем) в настоящее время выпускаются многоразрядные АЦП этого типа с частотой преобразования 100 МГц и выше.

Другая схема построения АЦП представлена на рис. 12.11. В ней достигается сокращение числа элементов схемы за счет введения многоступенчатого преобразования. Весь АЦП состоит из l последовательно соединенных ступеней. Каждая ступень включает в себя набор компараторов и шифратор, образующие параллельный АЦП (на рисунке — АЦП1, АЦП2, ..., АЦП l), а также цифроаналоговый преобразователь (на рисунке — ЦАП1, ЦАП2, ..., ЦАП l). АЦП первой ступени определяет, в каком участке диапазона измерений лежит измеряемая величина. Разность $x - \alpha_1 x_1$ с выхода устройства вычитания УВ1 поступает на АЦП 2-й ступени, определяющей α_2 , и т. д. В результате получим: $x = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_l x_l$. АЦП, в котором реализуется такая схема многоступенчатого преобразования, называется *параллельно-последовательным* (или *смешанным*).

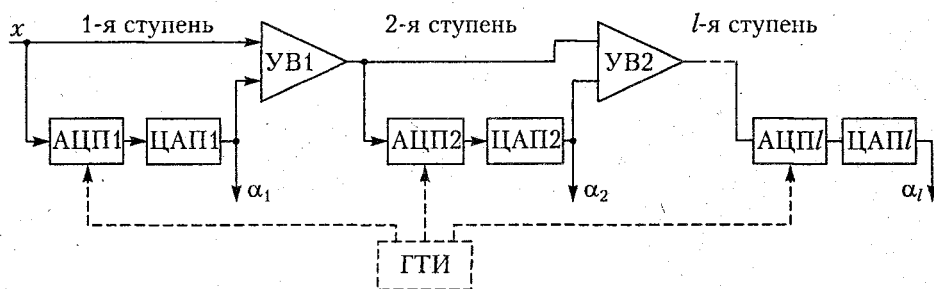


Рис. 12.11. Структурная схема параллельно-последовательного АЦП

В рассмотренных АЦП переключения одного или нескольких компараторов, приводящие к переходу в следующее состояние, происходят только при изменении входного сигнала (синхронизирующие сигналы, задающие режим работы элементов АЦП, отсутствуют). Такие АЦП называются асинхронными. Их основной недостаток — неопределенность выходного кода в течение времени смены состояний, что может вызвать появление ошибок или сбоев при снятии показаний в соответствующий момент времени. Устранения этого недостатка добиваются введением синхронизации работы отдельных частей преобразователя, например, с помощью генератора тактовых импульсов ГТИ (рис. 12.10 и 12.11) — таким образом создаются синхронные АЦП.

Другое направление при построении *последовательных* АЦП связано с использованием в них метода уравнивания измеряемой величины. В таких АЦП входной сигнал сравнивается с управляемой многозначной мерой с помощью одного компаратора (рис. 12.12, а). Состояние многозначной меры (ЦАП) в конце уравнивания определяет выходной код АЦП. Алгоритм уравнивания отображает временная диаграмма (рис. 12.12, б).

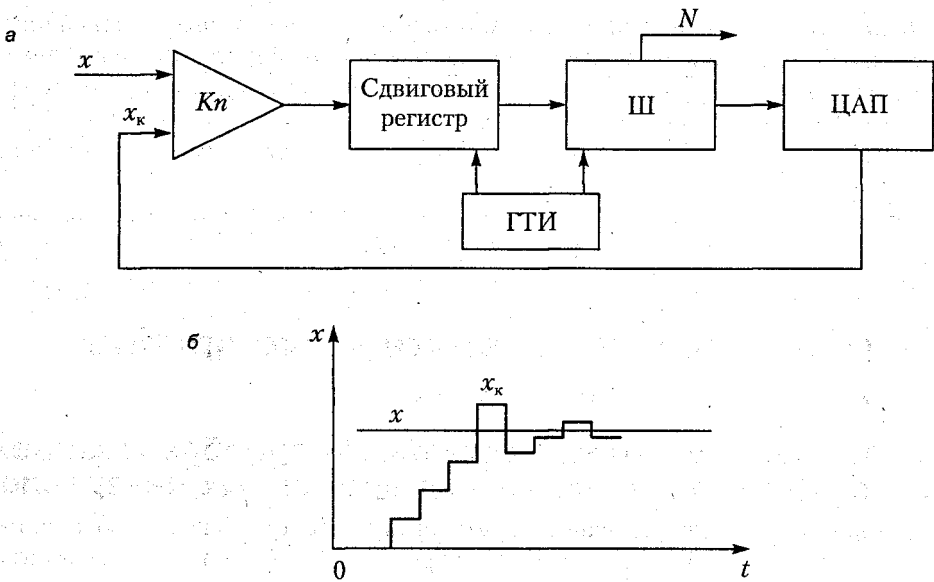


Рис. 12.12. Последовательный АЦП: а — структурная схема; б — временная диаграмма

Дешифраторы (ДШ). Это устройства для преобразования параллельных кодов одного вида в параллельные коды другого вида. В ЦИП дешифраторы применяют главным образом для преобразования двоично-десятичных и тетрадно-десятичных кодов в параллельный код, предназначенный для управления знаковыми индикаторами.

Знаковые индикаторы. Для получения показаний в цифровой форме применяются знаковые индикаторы.

Для построения цифр 0, 1, ..., 9 используются сегментные знаковые индикаторы, состоящие из 7, 8 и большего числа элементов (сегментов), светящихся при подаче управляющего напряжения. Комбинация светящихся сегментов образует знак (цифру). В качестве светящихся сегментов используют полоски электролюминофора, светодиоды, элементы с жидкими кристаллами и т. п.

Газоразрядные знаковые индикаторы представляют собой специальные газоразрядные лампы. Анод этих ламп выполнен в виде сетки, а катоды, изготовленные из тонкой проволоки и расположенные один за другим, имеют форму цифр

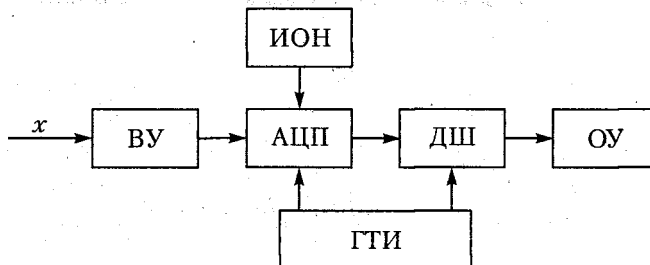


Рис. 12.13. Обобщенная структурная схема ЦИП

от 0 до 9 или других знаков (+, -, V, A, Щ и т. д.). Баллон лампы заполнен инертным газом — неон. Приложение соответствующего напряжения между анодом и катодом вызывает яркое оранжевое свечение вокруг катода, имеющего форму определенного знака (цифры или др.).

Общее число знаковых индикаторов должно соответствовать числу десятичных разрядов отсчетного устройства (ОУ).

Учитывая все сказанное о составных компонентах ЦИП, можно составить обобщенную структурную схему ЦИП (рис. 12.13).

12.4. Цифровые измерительные приборы последовательного счета

12.4.1. ЦИП с непосредственным преобразованием измеряемой величины в код временных интервалов

Прибор для измерения интервала времени (хронометр). С помощью хронометра временной интервал t_x (рис. 12.14) определяется подсчетом числа квантующих импульсов стабильной частоты, прошедших на счетчик импульсов за этот интервал. Старт-импульс (рис. 12.14, а) открывает ключ, и импульсы от генератора импульсов стабильной частоты $f_0 = 1/T_0$ (рис. 12.14, б) начинают поступать на вход пересчетного устройства счетчика импульсов (рис. 12.14, в). В момент окончания интервала t_x стоп-импульс (рис. 12.14, а) закрывает ключ, и на око-

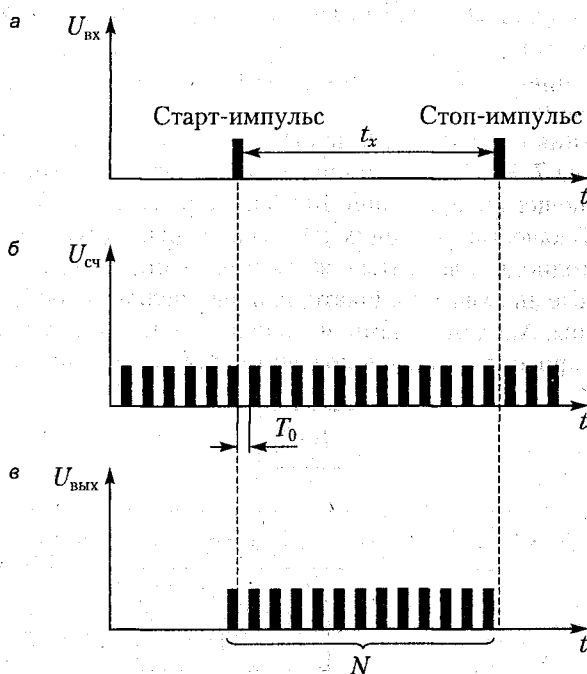


Рис. 12.14. Временные диаграммы хронометра

нечном устройстве счетчика фиксируется число прошедших импульсов $N = t_x/T_0 = t_x f_0$ (рис. 12.14, в).

Погрешность хронометра имеет три составляющие:

- 1) погрешность квантования, зависящая от соотношения t_x и T_0 (погрешность уменьшается при уменьшении отношения T_0/t_x);
- 2) погрешность реализации, зависящая от стабильности частоты f_0 ;
- 3) погрешность, обусловленная неточностью передачи временного интервала на ключ.

Фазометр. Угол фазового сдвига φ_x между двумя напряжениями U_{x1} и U_{x2} (одной и той же частоты) легко преобразуется во временной интервал t_x . Поэтому от схемы ЦИП для измерения интервала времени схема фазометра отличается наличием двух формирователей, создающих старт- и стоп-импульсы в моменты перехода кривых напряжений U_{x1} и U_{x2} через нуль, и блока выделения временного интервала, который из серии импульсов выделяет только два, временной интервал t_x между которыми измеряется. Показание прибора

$$N = t_x/T_0 = t_x f_0 = \varphi_x T_x f_0 / (2\pi) = \varphi_x f_0 / (2\pi f_x),$$

где $T_x = 1/f_x$ — период изменения напряжений U_{x1} и U_{x2} .

Составляющие погрешности фазометра те же, что и у хронометра, плюс погрешность, зависящая от точности формирования временного интервала t_x .

Недостатком этого фазометра является то, что для определения фазы необходимо знание f_x .

Свободен от указанного недостатка фазометр с усреднением измеряемых временных интервалов. В этом приборе вместо блока выделения временного интервала имеется формирователь импульса заданной длительности, выдающий на второй ключ управляющий импульс длительностью $t_{ин} = kT_0$. За время $t_{ин}$ на вход пересчетного устройства проходит $t_{ин}/T_x$ пачек квантуемых импульсов частотой f_0 . В каждой пачке t_x/T_0 импульсов, следовательно, отсчетное устройство счетчика зафиксирует число

$$N = t_x t_{ин} / (T_0 T_x) = \varphi_x k / (2\pi).$$

Составляющие погрешности прибора:

- 1) погрешность квантования интервала t_x квантуемыми импульсами частотой f_0 ;
- 2) погрешность квантования интервала $t_{ин}$ пачками импульсов длительностью T_x ;
- 3) погрешность от неточности формирования и передачи временных интервалов t_x и $t_{ин}$.

Частотомер (периодомер). Этот прибор отличается от прибора для измерения интервала времени наличием блока выделения временного интервала, выдающего старт- и стоп-импульсы через интервал $t_x = nT_x$, где T_x — период измеряемого напряжения, n — целое число. Показание отсчетного устройства

$$N = t_x/T_0 = T_x n/T_0 = n f_0 / f_x.$$

Составляющие погрешности частотомера:

- 1) погрешность квантования, зависящая от соотношения f_x и f_0 ;
- 2) погрешность реализации, вызываемая нестабильностью f_0 ;

3) погрешность, обусловленная неточностью формирования и передачи интервала t_x . Современные частотомеры имеют погрешность $\pm 10^{-7}$ %.

Основной недостаток частотомеров — показания прибора прямо пропорциональны периоду, а не частоте.

Время-импульсный вольтметр. В этих вольтметрах (рис. 12.15, а и б) измеряемое напряжение U_x преобразуется во временной интервал t_x путем сравнения U_x с линейно нарастающим напряжением U_k .

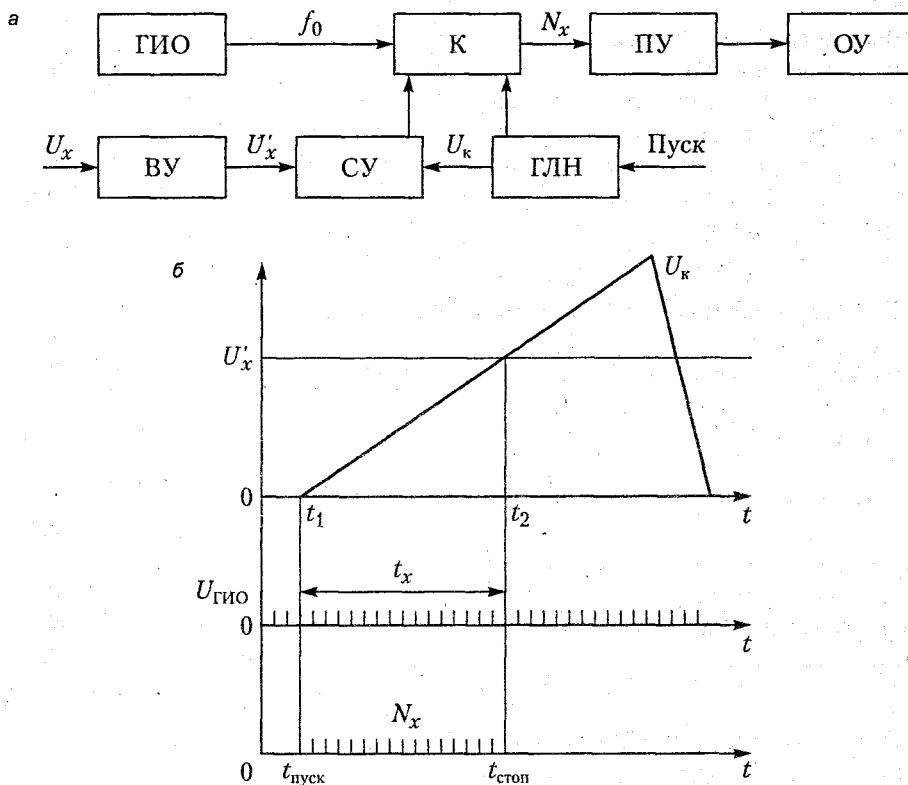


Рис. 12.15. Время-импульсный вольтметр: а — блок-схема; б — временные диаграммы напряжений

Измеряемое напряжение U_x через входное устройство ВУ, обеспечивающее большое входное сопротивление и расширение пределов измерения вольтметра, подается на один из входов сравнивающего устройства СУ. Прибор запускается старт-импульсом в момент времени t_1 . При этом генератор линейно нарастающего напряжения ГЛН открывает ключ К и одновременно подает на второй вход СУ напряжение U_k . Напряжение U_k начинает изменяться по линейному закону. Одновременно с этим с генератора опорных импульсов ГИО на вход пересчетного устройства ПУ начинает поступать последовательность импульсов с известной частотой f_0 . В момент t_2 при $U_k = U_x$ сравнивающее устройство СУ стоп-импульсом через ключ К прекращает подачу импульсов в ПУ. Таким образом,

за время $t_1 - t_2 = U_x/k = U'_x/k$ (где k — коэффициент, характеризующий скорость нарастания напряжения U_x , U'_x — измеряемая величина на выходе ВУ) на вход ПУ пройдет число импульсов

$$N = t_x/T_0 = U_x f_0/k.$$

Погрешность прибора складывается из четырех составляющих:

- 1) погрешности квантования, зависящей от t_x/T_0 ;
- 2) погрешности реализации от нестабильности f_0 ;
- 3) погрешности от наличия порога срабатывания СУ;
- 4) погрешности от нелинейности и нестабильности кривой линейно нарастающего напряжения (непостоянства k).

Четвертая составляющая погрешности практически определяет точность этих вольтметров.

В настоящее время у время-импульсных вольтметров погрешность снижена до $\pm 0,05\%$. Однако показания этих ЦИП, определяемые мгновенным размером входного сигнала, чувствительны к помехам.

Интегрирующий (двухтактный) вольтметр. В этих вольтметрах (например, в универсальных вольтметрах В7-22, В7-35 и др.) сначала измеряемое напряжение U_x интегрируется за определенное время $t_{инт}$ (преобразуется в пропорциональное напряжение на выходе интегратора $U_{инт}$), а затем на втором такте $U_{инт}$ преобразуется во временной интервал t_x путем возврата интегратора в исходное состояние с постоянной скоростью (рис. 12.16, а).

Структурная схема прибора приведена на рис. 12.16, б. Цикл измерения начинается в момент времени t_1 , когда блок управления БУ открывает ключ К1 на интервал заданной длительности $t_{инт}$, подключая тем самым ко входу интегратора $I_{инт}$ измеряемое напряжение $U_{к1} = U'_x = kU_x$ (коэффициент k учитывает переход от U_x к U'_x после прохождения измеряемым напряжением входного устройства ВУ, которое обеспечивает большое входное сопротивление и расширение пределов измерений).

Напряжение на выходе интегратора начинает возрастать по закону $U_{инт} = k \int_0^t U_x dt$.

Через интервал времени $t_{инт}$ (в момент t_2), когда $U_{инт} = k \int_0^{t_{инт}} U_x dt$ (значение напряже-

ния $U_{инт}$ в конце интервала $t_{инт}$ зависит от скорости его нарастания, то есть от U_x), узел БУ закрывает ключ К1 и открывает ключ К2, подавая в момент t_2 на вход $I_{инт}$ известное напряжение $U_{к2} = -U_0$ (противоположного знака по отношению к U_x). При этом на выходе интегратора напряжение $U_{инт}$ начинает уменьшаться с постоянной скоростью, определяемой схемой вольтметра (вследствие этого интервал $t_x = t_3 - t_2$ определяется величиной $U_{инт}$, а значит и U_x). Кроме того, в момент t_2 БУ открывает ключ К и на вход пересчетного устройства ПУ начинают поступать импульсы с известной частотой f_0 от генератора опорных импульсов ГИО. В момент времени t_3 , когда $U_{инт} = U_{он} = 0$, сравнивающее устройство СУ через блок управления БУ закрывает ключи К2 и К, прекращая тем самым поступление импульсов на ПУ.

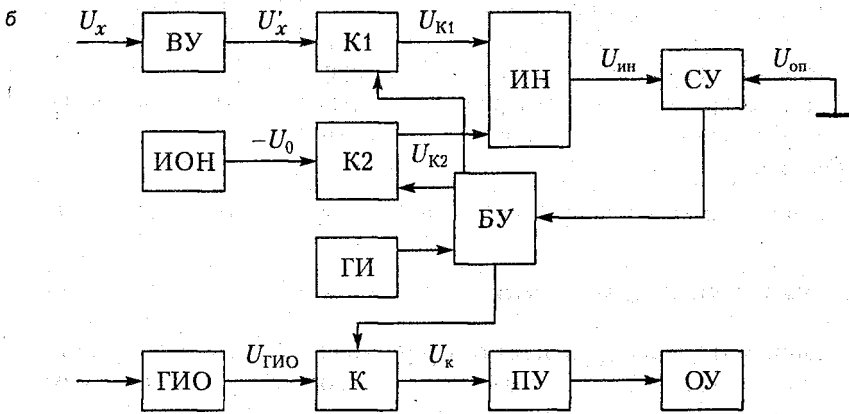
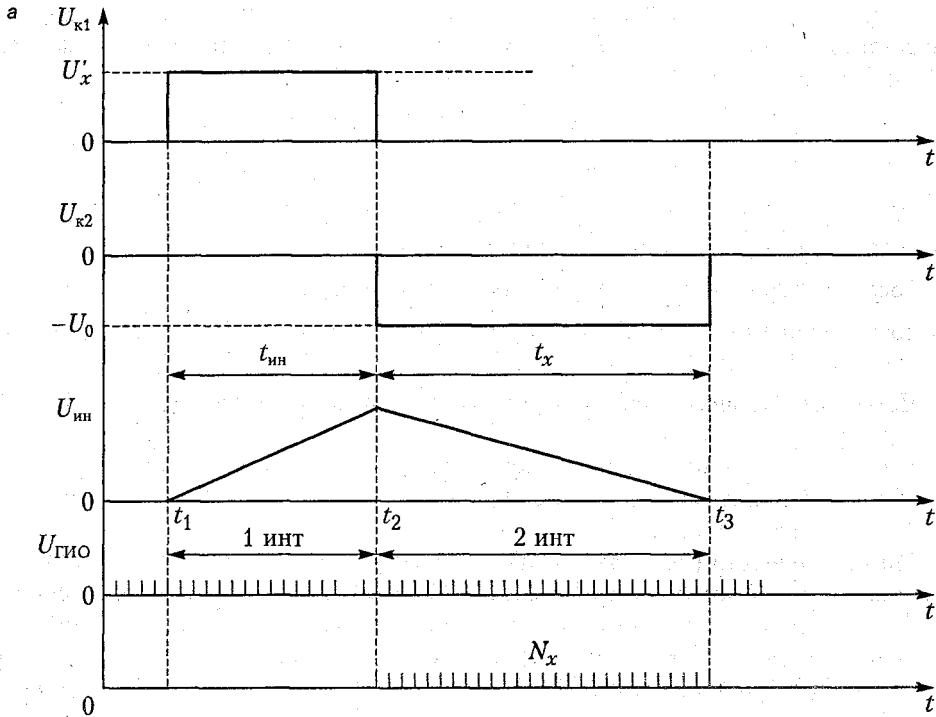


Рис. 12.16. Двухтактный интегрирующий вольтметр: а — временные диаграммы напряжений; б — структурная схема

Поскольку напряжение $U_{ин}$ в конце первого такта равно $U_{ин}$ в начале второго, получаем условие определения интервала t_x :

$$U_{ин} = k \int_0^{t_{ин}} U_x dt = k \int_0^{t_x} U_0 dt.$$

После интегрирования получим:

$$kt_{\text{ин}} U_{\text{х ср}} = kt_x U_0,$$

откуда

$$t_x = \frac{t_{\text{ин}}}{U_0} U_{\text{х ср}},$$

где $U_{\text{х ср}}$ — среднее за время $t_{\text{ин}}$ значение входного напряжения.

Таким образом, число импульсов, зафиксированных отсчетным устройством ОУ за время t_x ,

$$N = \frac{t_x}{T_0} = \frac{t_{\text{ин}}}{T_0 U_0} U_{\text{х ср}}.$$

Главным достоинством интегрирующих вольтметров является их повышенная устойчивость к помехам переменного тока. Действительно, если на измеряемый сигнал накладывается синусоидальная помеха U_n частотой f_n , то при $t_{\text{ин}} = n/f_n$ ($n = 1, 2, \dots$) выходное напряжение интегратора для нее

$$U_{\text{ин.п}} = \int_0^{t_{\text{ин}}} U_n dt = 0.$$

Обычно $t_{\text{ин}}$ выбирается с учетом влияния помех частотой, кратной 50 Гц.

Составляющие погрешности прибора:

- 1) погрешность квантования интервала t_x квантующими импульсами;
- 2) погрешность от наличия порога чувствительности СУ;
- 3) погрешность от нестабильности T_0 , $t_{\text{ин}}$ и U_0 ;
- 4) погрешность от влияния остаточных параметров аналоговых ключей К1 и К2.

Если $t_{\text{ин}} = cT_0$, где $c = \text{const}$, то $t_x = \frac{c}{U_0} U_{\text{х ср}}$.

У вольтметров такого типа погрешность снижена до $\pm 0,005\%$.

Повышенная помехоустойчивость обеспечивает интегрирующим вольтметрам коэффициент подавления помех нормального вида примерно 40 дБ при отклонении частоты помехи от номинального значения на $\pm 1\%$. Коэффициент подавления для помех общего вида постоянного тока доведен до 170 дБ, а для помех частотой 50 Гц — до 120 дБ. Интегрирующие вольтметры изготавливают, как правило, многопредельными с трех—семизначным цифровым отсчетным устройством. Они являются наиболее чувствительными. Существуют интегрирующие вольтметры, у которых одна единица младшего разряда отсчетного устройства соответствует 0,1 мкВ.

Недостаток интегрирующего вольтметра — довольно большая сложность.

Вольтметр амплитуды импульсов. Принцип действия этих вольтметров заключается в преобразовании амплитуды импульса во временной интервал посредством зарядки конденсатора через диод и последующей его разрядки через токостабилизирующую цепь по линейному закону. Время разрядки оказывается пропорциональным амплитуде импульсов. Погрешность таких приборов около 1–5%.

12.4.2. ЦИП с непосредственным преобразованием измеряемой величины в код частоты

Частотомер. Принцип действия прибора основан на подсчете импульсов частотой f_x за интервал времени $t_{\text{ин}}$. Генератор импульса заданной длительности открывает ключ на время $t_{\text{ин}}$. За это время импульсы частотой f_x , сформированные специальным формирователем, пройдут на вход пересчетного устройства в количестве $N = t_{\text{ин}}/T_x = t_{\text{ин}}f_x$.

Погрешность прибора складывается из погрешности квантования, зависящей от $T_x/t_{\text{ин}}$, и погрешности от неточности формирования $t_{\text{ин}}$.

Погрешность частотомера не превышает нестабильности частоты генератора квантующих импульсов плюс одна единица младшего разряда отсчетного устройства. В качестве примера приведем частотомер ЧЗ-86, у которого диапазон измеряемых частот составляет: для синусоидального сигнала 0,1 Гц — 18 ГГц, для импульсного сигнала 0,1 Гц — 100 МГц при длительностях импульса 50 нс — 100 мкс, разрешающей способности $\pm 10^{-8}$ с и нестабильности частоты генератора квантующих импульсов $2 \cdot 10^{-7}$ с за 1 год.

Интегрирующий (частотный) вольтметр. В этом приборе измеряемое напряжение U_x сначала преобразуется с помощью преобразователя напряжения в частоту ПНЧ в последовательность импульсов с частотой следования $f_x = kU_x$, где k — коэффициент преобразования, а затем частота f_x измеряется согласно схеме, изображенной на рис. 12.17. Генератор импульсов ГИ открывает ключ К на интервал времени $t_{\text{ин}}$ известной длительности, и в течение этого интервала на вход пересчетного устройства ПУ поступают импульсы частотой f_x .

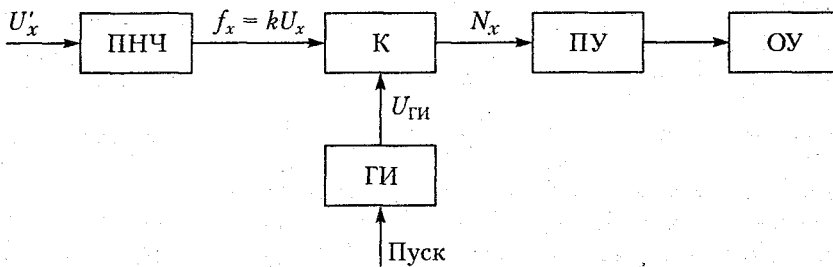


Рис. 12.17. Блок-схема интегрирующего частотного вольтметра

Показания интегрирующего частотного вольтметра

$$N = \int_0^{t_{\text{ин}}} f_x dt = \int_0^{t_{\text{ин}}} kU_x dt = kt_{\text{ин}}U_x \text{ ср.}$$

Если $t_{\text{ин}}$ кратно периоду помехи T_n , то действие помехи исключается.

Помимо погрешностей, характерных для измерителя частоты, этому вольтметру присущи погрешность от нестабильности коэффициента преобразования k и погрешность от влияния периодической помехи при нарушении кратности T_n и $t_{\text{ин}}$.

В настоящее время погрешность измерения интегрирующими частотными вольтметрами снижена до $\pm 0,01$ %.

Интегротензиомерический вольтметр. В этих приборах измерение производится за два цикла, причем второй цикл служит для коррекции результатов измерения первого цикла. Это позволяет за счет усложнения прибора получить более высокую точность измерений (погрешность $\pm 0,001\%$).

12.4.3. ЦИП с непосредственным преобразованием измеряемой величины в код напряжения постоянного тока

Циклический вольтметр. В этих приборах измеряемое напряжение U_x преобразуется в единичный код путем сравнения U_x с известным напряжением U_k скачкообразно возрастающим во времени, причем каждый скачок равен шагу квантования (рис. 12.18, а). Единичный код равен числу ступеней U_k , при котором наступает равенство $U_x = U_k$. Структурная схема вольтметра приведена на рис. 12.18, б, где ГЛСН — генератор линейно-ступенчатого напряжения.

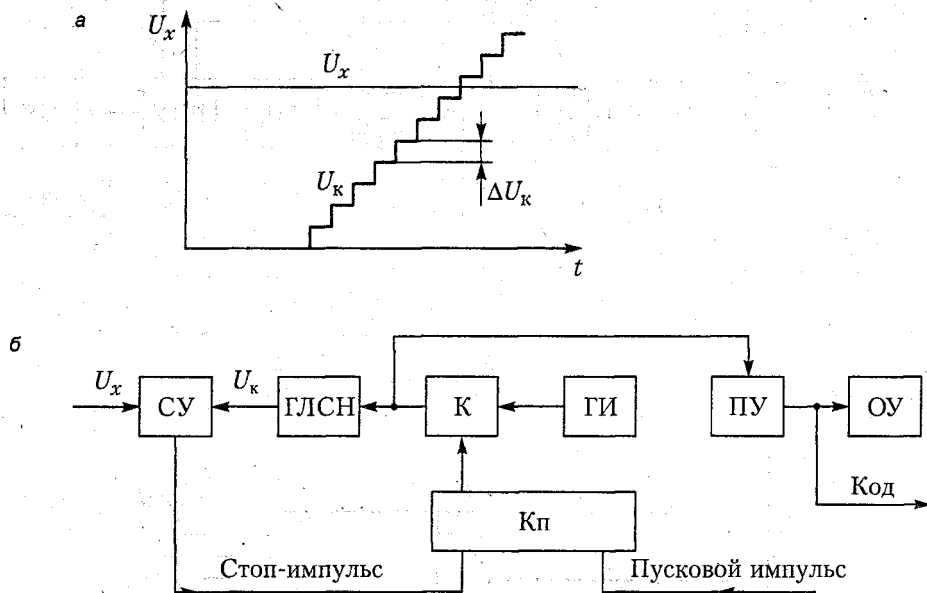


Рис. 12.18. Циклический вольтметр: а — временная диаграмма; б — структурная схема

При подаче пускового импульса компаратор Кп своим выходным сигналом открывает ключ К, и импульсы от генератора импульсов ГИ начинают проходить на входы ГЛСН и пересчетного устройства ПУ. Напряжение U_k на выходе ГЛСН возрастает по линейно-ступенчатому закону (рис. 12.18, а). При $U_x = U_k$ (с допустимой погрешностью) сравнивающее устройство СУ формирует стоп-импульс, закрывающий ключ К. Поступление импульсов на входы ГЛСН и ПУ прекращается. Следовательно, на отсчетном устройстве ОУ будет зафиксировано число импульсов

$$N = U_k / \Delta U_k = U_x / \Delta U_k.$$

Составляющие погрешности вольтметра:

- 1) погрешность дискретности, зависящая от числа ступеней напряжения U_k в момент равенства $U_x = U_k$;
- 2) погрешность реализации, обусловленная неодинаковостью и нестабильностью ступеней ΔU_k ;
- 3) погрешность, связанная с наличием порога чувствительности сравнивающего устройства.

Недостатком этого типа вольтметров является малое быстродействие, поэтому в настоящее время они применяются редко.

Следящий вольтметр (рис. 12.19, а). В этом приборе применяется сравнивающее устройство СУ с двумя выходами, которое при $U_k < U_x$ выдает импульс 1, открывающий ключ К1, а при $U_k > U_x$ — импульс 2, который открывает ключ К2. При $U_k = U_x$ импульсов на выходах нет и оба ключа закрыты.

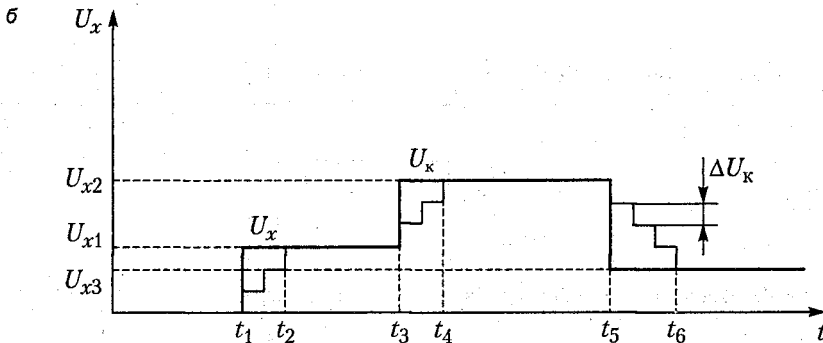
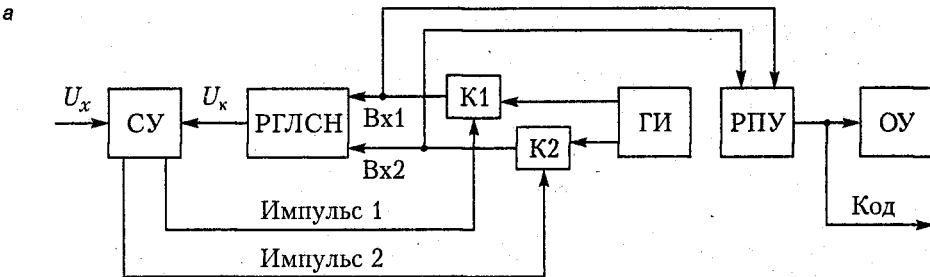


Рис. 12.19. Следящий вольтметр: а — блок-схема; б — временная диаграмма

При подаче на вход вольтметра напряжения U_x в момент t_1 (рис. 12.19, б) открывается ключ К1. Импульсы от генератора импульсов ГИ начинают поступать на вход Vx1 реверсивного генератора линейно ступенчатого напряжения РГЛСН и на вход реверсивного пересчетного устройства РПУ. Напряжение U_k начинает возрастать.

При $U_k = U_{x1}$ в момент t_2 ключ К1 закрывается и на отсчетном устройстве ОУ фиксируется $N_1 = U_{x1}/\Delta U_k$.

В момент t_3 входное напряжение становится равным U_{x2} , что снова приводит к неравенству $U_k < U_x$ и возрастанию напряжения U_k до значения, равного U_{x2} , в момент t_4 . На ОУ установится показание $N_2 = U_{x2} / \Delta U_k$.

В момент t_5 напряжение U_x уменьшается до значения U_{x3} , что приводит к неравенству $U_k > U_x$, и СУ включает ключ К2. Напряжение U_k начинает уменьшаться вплоть до значения U_{x3} в момент t_6 . В этом случае показание ОУ станет $N_3 = U_{x3} / \Delta U_k$.

Таким образом, вольтметр постоянно следит за изменениями входной величины, в чем его достоинство. Недостатком является малое быстродействие при больших скачках измеряемой величины.

Погрешность прибора включает те же составляющие, что и погрешность циклического вольтметра.

12.5. Цифровые измерительные приборы последовательного приближения (поразрядного уравнивания)

Кодово-импульсный вольтметр постоянного тока. В этом вольтметре выполняется последовательное сравнение измеряемого напряжения U_x с рядом дискретных значений известной величины U_k (изменяющейся по определенному закону, заложенному в схеме вольтметра), которая либо больше U_x , либо меньше, но постепенно стремится к ней до тех пор, пока не будет достигнуто равенство (с допустимой погрешностью) $U_x = U_k$.

На рис. 12.20, а представлена упрощенная структурная схема вольтметра. Измеряемое напряжение U_x через входное устройство ВУ поступает на один из входов сравнивающего устройства СУ. При пуске блок автоматического управления БАУ запускает цифроаналоговый преобразователь ЦАП, который формирует напряжение U_k , представляющее собой серию импульсов, соответствующую заложенному в приборе закону кодообразования. Предположим, что ЦАП формирует в каждом разряде десятичной системы счисления серию из четырех импульсов напряжения, связанных между собой комбинацией целых положительных чисел, позволяющей получать (в пределах каждого разряда) любое целое число от 0 до 9, например 2-4-2-1 (рис. 12.20, б). Напряжение U_k подается на второй вход СУ. При этом, если амплитуда импульса $U_k > U_x$, то СУ выдает на БАУ управляющий сигнал — отбросить данный импульс U_k в ЦАП, а на вход дешифратора Д с БАУ поступает сигнал, соответствующий нулю двоичной системы счисления (отсутствие импульса). Если $U_k \leq U_x$, то СУ выдает сигнал — запомнить данный импульс в ЦАП, а на вход дешифратора поступает сигнал, соответствующий единице двоичной системы (наличие импульса). Формирующийся двоично-десятичный код преобразуется дешифратором Д в параллельный код, управляющий знаковыми индикаторами оконечного устройства ОУ. Работа всей схемы синхронизируется генератором тактовых импульсов ГТИ.

Предположим, что измеряемое напряжение $U_x = 3,15$ В. В соответствии с заложенным законом кодообразования (2-4-2-1) первый импульс $U_k = 2$ В. Так как $U_k < U_x$, то этот импульс запоминается в ЦАП, а на вход дешифратора посту-

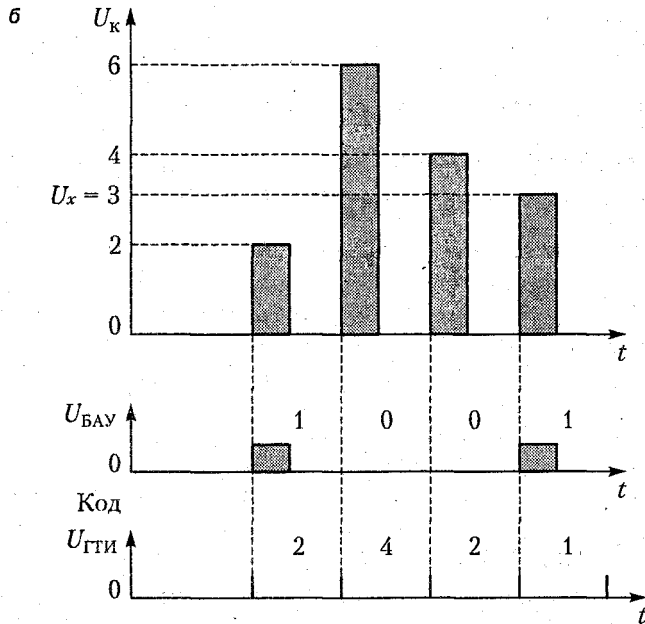
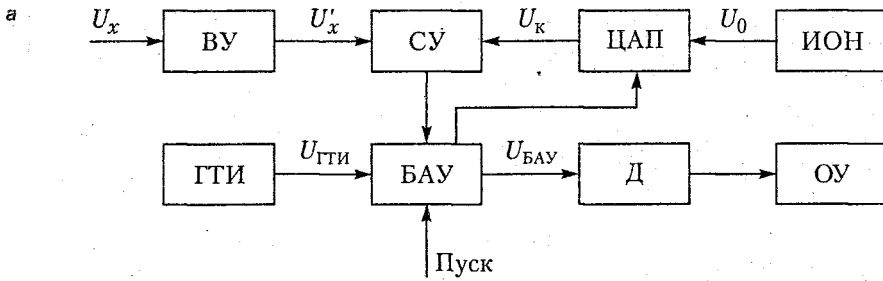


Рис. 12.20. Кодово-импульсный вольтметр постоянного тока: а — упрощенная структурная схема; б — временные диаграммы

пает импульс, соответствующий 1 в двоичной системе счисления (для данного разряда единиц десятичной системы). Второй импульс $U_k = 6$ В (это 4 В в соответствии с законом кодообразования плюс 2 В, которые были сохранены в ЦАП на предыдущем шаге). Поскольку $U_k > U_x$, то второй импульс $U_k = 4$ В, соответствующий закону кодообразования, отбрасывается в ЦАП, а на вход дешифратора поступает сигнал (отсутствие импульса), соответствующий 0 в двоичной системе. Третий импульс $U_k = 4$ В (это 2 В в соответствии с законом кодообразования плюс 2 В, которые ранее были сохранены в ЦАП). Он также оказывается больше U_x , поэтому импульс $U_k = 2$ В отбрасывается в ЦАП, а на входе дешифратора вновь отсутствует импульс. Наконец, четвертый импульс $U_k = 3$ В (это 1 В в соответствии с законом кодообразования плюс 2 В, ранее сохраненные в ЦАП). $U_k < U_x$, и данный импульс запоминается в ЦАП, а на входе дешифратора появ-

ляется импульс, соответствующий 1 в двоичной системе. Таким образом, образующийся двоичный код для единиц десятичной системы счисления составляет 1001, что соответствует 3. Далее тот же алгоритм повторяется для десятых и сотых долей единицы, при этом ЦАП в соответствии с законом кодообразования 2–4–2–1 формирует четыре импульса напряжения (в каждом разряде), равные по величине 0,2; 0,4; 0,2; 0,1 В для десятых и 0,02; 0,04; 0,02; 0,01 В для сотых долей единицы (в дополнение к уже сохраненным 3 В).

В конечном итоге к концу цикла измерения на выходе ЦАП набирается напряжение U_k , равное (или наиболее близкое в пределах погрешности) значению U_x . Этому значению будет соответствовать определенная комбинация импульсов на входе дешифратора Д, образующих двоично-десятичный код, который (с помощью дешифратора) преобразуется в параллельный код, управляющий индикаторами окончного устройства ОУ.

Основными составляющими погрешности являются:

- 1) погрешность дискретности, определяемая числом разрядов;
- 2) погрешность реализации, зависящая от ЦАП;
- 3) погрешность, обусловленная погрешностью входного устройства;
- 4) погрешность от наличия порога чувствительности СУ.

Погрешность измерения кодово-импульсными вольтметрами составляет около $\pm 0,001$ %. Они, в принципе, обладают высоким быстродействием, однако низкая помехоустойчивость по отношению к помехам нормального вида заставляет применять фильтры, которые резко его снижают. Поэтому в настоящее время принцип последовательного приближения используют главным образом для построения быстродействующих АЦП.

Вольтметры переменного тока. Вольтметры переменного тока выполняются по двум схемам:

- с непосредственным сравнением измеряемого напряжения с известным напряжением;
- с промежуточным преобразованием переменного напряжения в постоянное.

В первом случае вольтметры показывают амплитудные значения измеряемого напряжения (амплитудные вольтметры). В этих приборах напряжение U_k изменяется в соответствии с выбранным законом кодообразования до тех пор, пока не станет равным амплитудному значению $U_{m.x}$.

Во втором случае измеряемое переменное напряжение предварительно преобразуется в постоянное напряжение, пропорциональное либо амплитудному, либо действующему, либо среднему значениям в зависимости от типа используемого преобразователя. Погрешность таких вольтметров не превышает $\pm 0,01$ %, а частотный диапазон — 30 МГц, но с большей погрешностью.

Омметры. Омметры выполняют либо с преобразователем измеряемого сопротивления в напряжение постоянного тока (аналогично электронным омметрам), либо с использованием мостовой схемы (рис. 12.21).

В этой схеме устройство управления УУ по заданной программе в соответствии с сигналами нуля-органа НО устанавливает предел измерения моста резистором R_2 , включает весовые резисторы плеча R_1 и уравнивает мост.

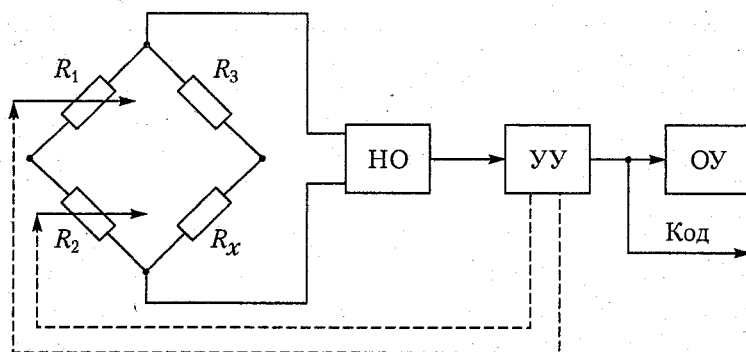


Рис. 12.21. Схема мостового цифрового омметра

Составляющие погрешности мостовых омметров:

- 1) погрешность дискретности;
- 2) погрешность реализации, которая зависит от сопротивлений резисторов и от качества ключей, их коммутирующих;
- 3) погрешность, определяемая наличием порога чувствительности нуля-органа.

Погрешность омметров с преобразователем зависит от погрешности преобразователя и составляет не более $\pm 0,01\%$.

В качестве примера приведем универсальный измеритель электрических напряжений и сопротивлений В7-72 со следующими значениями диапазонов измерений и относительной погрешности: постоянное напряжение — от 0,1 мкВ до 1000 В с $\delta = \pm(0,001..0,007)\%$; переменное напряжение — от 1 мВ до 700 В с $\delta = \pm(0,05..9)\%$ в интервале частот 10 Гц — 1 МГц; электрическое сопротивление — от 0,1 МОм до 2 ГОм с $\delta = \pm(0,003..3)\%$.

В последнее время большое распространение получили цифровые универсальные приборы для измерения параметров электрических цепей (индуктивности, емкости, сопротивления, проводимости и др.) — измерители иммитанса. Иммитанс — это термин, объединяющий понятия комплексного сопротивления (импеданса) и комплексной проводимости (адмитанса). В основу работы положен метод амперметра-вольтметра. Возможная структурная схема приведена на рис. 12.22.

На измеряемый объект Z_x , подключенный к преобразователю Пр, подается напряжение рабочей частоты от генератора Г. Преобразователь формирует два напряжения: U_T , пропорциональное величине тока, протекающего через Z_x , и U_{II} , пропорциональное величине напряжения на нем. Через коммутатор К и масштабный усилитель МУ эти напряжения подаются на АЦП, который проводит выборку значений напряжений U_T и U_{II} . Расчет отношений этих напряжений, равных либо комплексной проводимости ($Y = U_T / U_{II}$), либо комплексному сопротивлению ($Z = U_{II} / U_T$) объекта, осуществляется контроллером. При этом в случае высокоомного измеряемого объекта, когда генератор Г работает как источник напряжения, измерение проводится в виде составляющих полной проводимости Y . Если измеряется низкоомный объект, то генератор Г работает как источник тока и измерение проводится в виде составляющих полного сопротивления Z . Расширение пределов измерения достигается изменением коэффициента

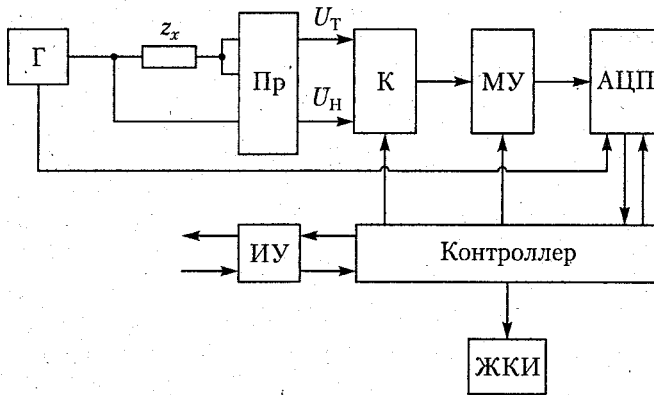


Рис. 12.22. Структурная схема измерителя иммитанса

передачи МУ. Интерфейсное устройство ИУ обеспечивает согласование уровней сигналов и гальваническую развязку измерительных цепей прибора и подключаемой аппаратуры. Жидкокристаллический индикатор ЖКИ представляет результат измерения в визуальной форме.

В качестве примера приведем диапазоны измерений иммитансных параметров измерителя иммитанса Е7-21:

- по индуктивности — от 0,1 мкГн до 16 кГн;
- по емкости — от 0,1 пФ до 20 мФ;
- по сопротивлению — от 1 мОм до 20 МОм;
- по проводимости — от 1 нСм до 10 См;
- по тангенсу угла диэлектрических потерь и добротности — от 10^{-3} до 10^3 .

Класс точности прибора составляет 0,15/0,01 по ГОСТ 25242-93.

12.6. Цифровые измерительные приборы считывания

ЦИП для измерения напряжения. Источник известных напряжений вырабатывает $U_{к1}, U_{к2}, \dots, U_{кN}$, соответствующие уровням квантования. Эти напряжения одновременно поступают на входы N сравнивающих устройств (компараторов), на вторые входы которых подается измеряемое напряжение U_x . При этом срабатывают те сравнивающие устройства, для которых $U_x \geq U_{кi}$. На выходах таких устройств появляются сигналы, соответствующие 1, на выходе остальных сравнивающих устройств — сигналы, соответствующие 0. Таким образом, на выходе всех сравнивающих устройств получается единичный код, определяемый величиной U_x . С помощью специального преобразователя этот код преобразуется в код для управления отсчетным устройством и для внешних устройств.

Основными достоинствами ЦИП для измерения напряжения являются малое время преобразования и высокое быстродействие.

Цифровые осциллографы. В последнее время на практике успешно применяются цифровые осциллографы, в которых входные аналоговые сигналы преобразуются с помощью параллельного или параллельно-последовательного (смешанного) АЦП в коды, записываемые в цифровое запоминающее устройство, где они хранятся необходимое для исследования время. Для получения изображения на экране осциллографа коды считываются с запоминающего устройства. При этом исследуемый сигнал может отображаться как на экране электронно-лучевой трубки, так и на плоском матричном экране, выполненном на жидких кристаллах или светодиодах.

Простейшая структурная схема цифрового осциллографа представлена на рис. 12.23. Мгновенные значения исследуемого сигнала, поступающего с входа Y через входное устройство ВУ на вход АЦП, в определенные моменты времени, задаваемые тактовым генератором ТГ, преобразуются в цифровые коды и запоминаются в цифровом запоминающем устройстве ЗУ. Далее эти коды поступают в отображающее устройство ОУ, где на их основе вырабатываются сигналы, управляющие вертикальным перемещением световой точки на экране.

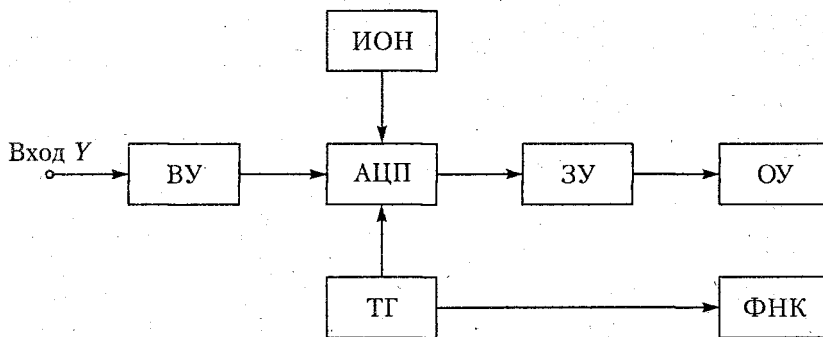


Рис. 12.23. Простейшая структурная схема цифрового осциллографа

В те же моменты времени формирователем нарастающего кода ФНК вырабатывается код, равномерно нарастающий по времени. Он также поступает в отображающее устройство, где преобразуется в сигнал, управляющий горизонтальным перемещением световой точки на экране. Этот процесс имитирует временную развертку осциллографа.

Источник опорного напряжения ИОН вырабатывает определенные значения напряжений, которые поступают на входы компараторов АЦП, задавая их уровни срабатывания, соответствующие уровням квантования.

Если в качестве дисплея используется экран электронно-лучевой трубки, то коды, соответствующие мгновенным значениям исследуемого сигнала и временной развертке, преобразуются в цифроаналоговых преобразователях в напряжения, подаваемые, соответственно, на вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины трубки. Если дисплеем является матричный экран, то указанные коды преобразуются в позиционные, которые выбирают одну из строк и один из столбцов матричной панели, на пересечении которых возникает светящаяся точка.

Функциональные возможности цифровых осциллографов значительно шире, чем возможности аналоговых. Они позволяют получать в цифровой форме многие параметры исследуемого сигнала, реализовывать его дифференциальную, интегральную или спектральную характеристики и т. п., автоматизировать процесс измерения, управлять им дистанционно и т. д. На экране помимо осциллограмм в цифровой форме отображаются коэффициент отклонения (чувствительность по вертикали) и длительность развертки. Кроме того, применение матричных экранов уменьшает габариты цифровых осциллографов и делает их более безопасными с точки зрения охраны труда, поскольку в этом случае отпадает необходимость в использовании источников питания высокого напряжения.

Так, портативный цифровой осциллограф «Север-1» с цветным экраном на жидких кристаллах имеет размеры $156 \times 257 \times 256$ мм и предназначен для наблюдения, запоминания в цифровой форме и измерения амплитудно-временных параметров двух электрических сигналов в диапазоне частот 0–50 МГц. При этом обеспечиваются высокая точность измерений (погрешность измерения мгновенных значений напряжения не более 2 %) и автоматическое измерение основных параметров сигнала: амплитуды, размаха, периода сигнала, параметров переходной характеристики. Кроме того, в осциллографе предусмотрены режим самописца с длиной записи 20 000 точек и режим усреднения.

Современная микропроцессорная техника благодаря включению ее в цифровой осциллограф позволяет решать практически любые функциональные задачи, возникающие при исследовании электрических сигналов. В качестве примеров приведем осциллограф ОЦСЗ-01С. Этот запоминающий осциллограф, сочетающий в себе измерительное устройство и вычислительную машину, обеспечивает визуальное наблюдение, запоминание в цифровой форме, измерение и математическую обработку амплитудно-временных параметров периодических и непериодических сигналов в динамическом диапазоне от 4 мВ до 50 В и полосе частот от 0,1 до 50 МГц. В качестве портативной ЭВМ используется IBM PC/AT/ATX-совместимый компьютер (процессор типа Intel 486 или выше).

Микропроцессорные счетчики электрической энергии. Эти многофункциональные современные приборы предназначены для учета активной и реактивной энергии в цепях переменного тока (в режимах однотарифности или многотарифности), а также для использования в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) с целью передачи измеренных и вычисленных параметров через устройства сбора и передачи данных (УСПД) на диспетчерский пункт по контролю, учету и распределению электрической энергии.

Принцип работы основан на аналого-цифровом преобразовании напряжения и тока с последующим вычислением мощностей и энергий. Примерная блок-схема подобного счетчика представлена на рис. 12.24. Фазные напряжения (u_A, u_B, u_C) и токи (i_A, i_B, i_C) измеряются с помощью, соответственно, высокоточных резистивных делителей напряжения ($РД_A, РД_B, РД_C$) и прецизионных измерительных трансформаторов тока ($ИТТ_A, ИТТ_B, ИТТ_C$) с линейными характеристиками. Измерительный микропроцессор (СБИС измерения) включает в себя программируемый цифровой сигнальный процессор (ЦСП) со встроенными АЦП. Преобразователи измеряют входные сигналы напряжений и токов. СБИС осуществляет выборку входных сигналов. Множительное устройство соответствующим

образом перемножает эти сигналы. Измерительный микропроцессор обеспечивает четыре канала информации для микроконтроллера счетчика, который обрабатывает входные сигналы, запоминает данные в своей памяти, отображает их на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) и осуществляет дальнейшую передачу данных через интерфейсы счетчика к УСПД.

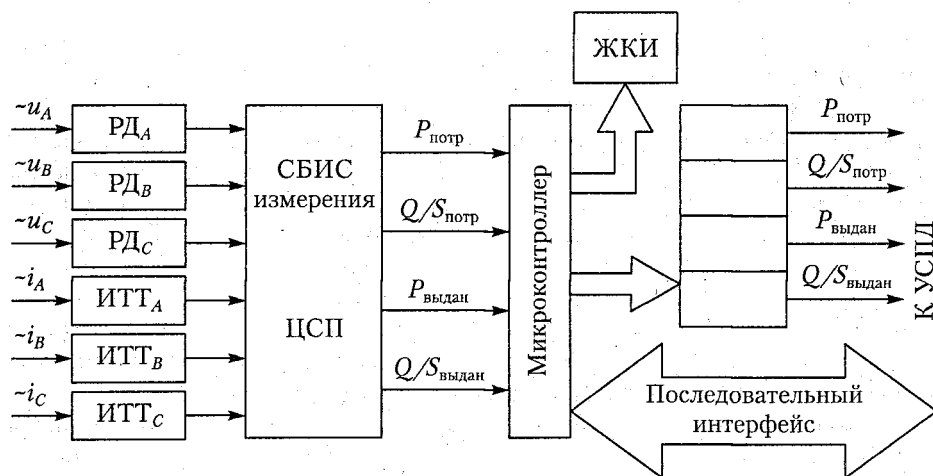


Рис. 12.24. Примерная блок-схема многофункционального микропроцессорного счетчика электроэнергии

Среди многотарифных счетчиков наиболее широко известны трехфазные счетчики серий «Альфа» и «ЕвроАльфа» компании АВВ (в нашей стране их выпускает предприятие АББ ВЭИ «Метроника», счетчики прошли все метрологические испытания, им присвоены номера в Государственном реестре средств измерений, технические условия согласованы с Главгосэнергонадзором РФ), изготавливаемые классов точности 0,2S и 0,5S в соответствии с ГОСТ 30206-94, а также 1,0 и 2,0 (для «ЕвроАльфа») в соответствии с ГОСТ 30207-94. Это универсальные счетчики, изготавливаемые по одинаковой технологии для любого применения, трансформаторного (класс точности 0,2S имеет чувствительность $I_{\min} = 1$ мА при максимальном токе нагрузки $I_{\max} = 10$ А) или прямого (класс точности 2,0, $I_{\min} = 25$ мА при $I_{\max} = 80$ А) включения.

Среди отечественных счетчиков отметим продукцию концерна «Энергомера» — универсальный микропроцессорный счетчик ЦЭ6850 и его модульную модификацию ЦЭ6850М.

ЦЭ6850 — первый отечественный прибор, измеряющий одновременно активную и реактивную энергии по нескольким тарифам на заданных интервалах времени, — используется на объектах энергетики с января 2001 г. Счетчик обладает высоким классом точности (0,2S), обеспечивает достоверный учет электроэнергии до 45-й гармоники промышленной сети, осуществляет высокоточный учет реальных технических потерь в ЛЭП, коммутационной аппаратуре, силовых трансформаторах и т. д.

Счетчик ЦЭ6850М имеет принципиально новую, модульную конструкцию. Кроме перечисленных функций базовой модели его дополнительные блоки содержат один из пяти интерфейсов и один из четырех модемов, что позволяет использовать их в любой АСКУЭ.

Все счетчики имеют высокие характеристики надежности: гарантийный срок от 3 лет, средний срок службы от 24 лет, межповерочный интервал — 8 лет.

Универсальный прибор для измерения электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии «Энергомонитор 3.3» предназначен:

- для измерения и регистрации основных показателей качества электроэнергии (ПКЭ), установленных ГОСТ 13109-97;
- измерения и регистрации действующих значений напряжений и токов, активной, реактивной и полной электрической мощности и энергии в однофазных и трехфазных сетях;
- проверки однофазных и трехфазных счетчиков активной и реактивной электрической энергии, а также измерительных преобразователей напряжения, тока, активной и реактивной мощности.

В приборе используется аналого-цифровой преобразователь смешанного типа с шестью независимыми идентичными каналами, на входы которых после масштабного преобразования подаются измеряемые напряжения и токи. Входное сопротивление каждого канала более 50 МОм. В АЦП мгновенные значения сигналов преобразуются в цифровые коды и передаются в блок обработки информации. Результаты вычислений для измеряемых величин, полученные с помощью программных модулей, отображаются на дисплее, запоминаются в памяти и выводятся (при необходимости) на внешнюю ЭВМ. Алгоритм вычислений каждой из величин таков, что позволяет видеть на дисплее их значения одновременно по всем трем фазам.

Прибор обеспечивает непрерывное измерение, расчет и накопление результатов измерений, регистрацию наибольших и наименьших значений ПКЭ и количества измерений, попавших в нормально допускаемые пределы, предельно допускаемые пределы и не попавших в эти пределы за каждые сутки. Время хранения накопленной информации при выключенном питании не ограничено.

Одновременно прибор может измерять практически все режимы электрической цепи переменного тока (ток, напряжение, частоту, углы, коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения с 1-й по 40-ю, активную, реактивную и полную мощности) и обеспечивает все виды схем соединений, применяемых при измерениях в трехфазных и однофазных электрических сетях.

ГЛАВА 13 Измерительные информационные системы

13.1. Классификации ИИС

Измерительная информационная система (ИИС) представляет собой совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для автоматического получения измерительной информации, ее преобразования, передачи на расстояние по каналам связи и обработки с целью представления в требуемом виде.

По функциональному назначению ИИС можно разделить на:

- измерительные системы;
- системы автоматического контроля;
- системы технической диагностики;
- измерительно-вычислительные комплексы (ИВК).

В состав последних входит программируемая ЭВМ, используемая как для обработки результатов измерения, так и для управления самим процессом измерения и формирования управляющих воздействий на объект.

По организации алгоритма функционирования различают:

- ИИС с заранее заданным алгоритмом функционирования, который не меняется, вследствие чего такая система применяется для исследования объектов, работающих в определенных режимах;
- программируемые ИИС, алгоритм работы которых меняется в соответствии с заданной программой, связанной с условиями функционирования исследуемого объекта;
- адаптивные ИИС, в которых алгоритм работы изменяется, приспособляясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта исследования; для этой системы требуется меньшее количество информации, что особенно важно при исследовании новых, мало изученных объектов.

В настоящее время применяется агрегатно-модульный принцип построения различных ИИС из ограниченного набора выпускаемых промышленностью уни-

фицированных конструктивно и функционально законченных блоков различных уровней сложности.

Обобщенная структурная схема ИИС (рис. 13.1) содержит следующие устройства:

- устройство измерения;
- устройство обработки измерительной информации;
- устройство хранения информации;
- устройство представления информации в виде регистраторов и индикаторов;
- устройство управления, организующее взаимодействие всех узлов ИИС;
- устройство воздействия на объект.

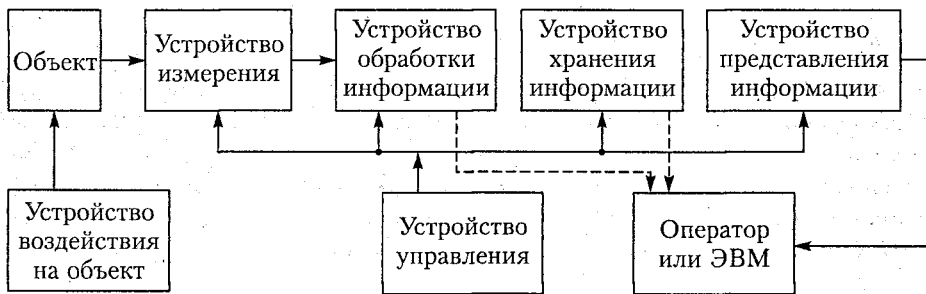


Рис. 13.1. Обобщенная структурная схема ИИС

По способу организации передачи информации между функциональными узлами (ФУ) различают цепочную, радиальную и магистральную структуры ИИС.

Цепочная структура обеспечивает последовательную передачу информации от одного ФУ к другому, каждый из которых выполняет заранее заданную операцию над входным сигналом. Достоинством ИИС с такой структурой является относительная простота, однако ее функциональные возможности ограничены.

В ИИС с *радиальной* структурой обмен сигналами между ФУ, выбор режима работы, изменение числа и состава взаимодействующих ФУ, а также установление необходимой связи между ними осуществляется через центральное устройство управления — контроллер, к которому каждый ФУ подключается с помощью индивидуальных шин. Недостатком такой структуры является существенное усложнение контроллера при большом числе ФУ.

В ИИС с *магистральной* структурой общая для всех ФУ магистраль, по которой передаются сигналы взаимодействия, позволяет без особых проблем увеличивать общее число функциональных узлов в системе. Кроме того, весьма успешно используются структуры, представляющие собой комбинации перечисленных структур (радиально-цепочные, радиально-магистральные).

Для универсализации с точки зрения измерения и контроля разнообразных параметров исследуемого процесса или объекта измеряемые и контролируемые величины представляются в ИИС унифицированными электрическими сигналами с линеаризованными зависимостями от измеряемой величины и нормированием размера информативного параметра к заданным значениям.

В настоящее время в ИИС применяются следующие унифицированные сигналы, параметры которых (амплитуда, частота, угол фазового сдвига и др.) являются информативными:

1. Непрерывные сигналы в виде постоянных и переменных токов и напряжений.
2. Импульсные сигналы в виде серии импульсов постоянного тока.
3. Кодово-импульсные сигналы в виде импульсов постоянного тока или напряжения, комбинации которых передают значения измеряемых величин.

Выбор вида унифицированного сигнала зависит от требуемых характеристик ИИС, формы представления измерительной информации (аналоговая или цифровая), вида канала связи, используемой элементной базы и т. д.

13.2. Измерительные системы

К измерительным системам (ИС) относят ИИС, в которых преобладает функция измерения. ИС делят на системы ближнего и дальнего действия (телеизмерительные системы).

Основными узлами всех ИС являются измерительные преобразователи или датчики, узлы сравнения, мер и выдачи результата.

ИС ближнего действия. В зависимости от вида и числа узлов в структуре ИС различают многоканальные (с параллельной структурой), сканирующие (с последовательной структурой), мультиплицированные (с общей мерой) и многоточечные (с параллельно-последовательной структурой) ИС.

Многоканальные ИС содержат в каждом канале полный набор узлов. Многоканальные ИС обладают высокой надежностью, наибольшим быстродействием (при одновременном получении результатов), возможностью индивидуального подбора средств измерений к измеряемым величинам. Основные недостатки такой системы — повышенная сложность и дороговизна.

Сканирующие ИС имеют один набор узлов и специальное сканирующее устройство, с помощью которого последовательно во времени выполняется измерение необходимого количества величин. Сканирующее устройство перемещает датчик в пространстве, причем траектория его перемещения может быть заранее запрограммирована (пассивное сканирование) или изменяться в зависимости от полученной информации (активное сканирование). Применяются такие системы при распределении измеряемой величины в пространстве (параметрические поля температур, давлений и т. д.). Недостатком этих ИС является их малое быстродействие, связанное с последовательным выполнением операций.

Мультиплицированные ИС в течение одного цикла изменения известной величины сравнивают ее со всеми измеряемыми величинами (без применения коммутационных узлов), используя общую для всех каналов меру.

Измеряемые величины $\{x_i\}_n^m$ сравниваются с линейно или ступенчато нарастающей величиной x_k (во втором случае значительно упрощается получение результата измерения в цифровом виде). При фиксации момента начала нарастания x_k и момент равенства $x = x_k$ формируется интервал t_{ν} , пропорциональный x_k в момент $x = x_k$.

Мультиплицированные системы имеют меньшее число узлов по сравнению с многоканальными при практически том же быстродействии (при наличии индивидуальных узлов выдачи результата). Их недостатком является наличие большого числа узлов сравнения, равного числу измеряемых величин, что при измерениях сигналов низкого уровня приводит к существенному усложнению этих узлов.

Многоточечные ИС применяются для исследования сложных объектов с большим числом измеряемых величин (до нескольких тысяч). Для коммутации аналоговых сигналов датчиков в них используются измерительные коммутаторы, погрешность которых определяется в основном остаточными параметрами ключей (остаточными ЭДС, сопротивлениями замкнутого и разомкнутого ключей). Наиболее широкое распространение получили электронные коммутаторы, состоящие из ключей и устройства управления.

Достоинствами многоточечных ИС являются меньшее число узлов по сравнению с многоканальными ИС и возможность наращивания числа измерительных каналов за счет коммутатора. Их недостатки — пониженное быстродействие при большом количестве датчиков и уменьшение точности за счет остаточных параметров ключей измерительного коммутатора.

ИС дальнего действия (телеизмерительные системы). Телеизмерительные системы (ТИС) применяются в тех случаях, когда необходимо проводить измерения на объектах, находящихся на значительном расстоянии от средств представления или обработки информации. Вследствие этого основным отличием ТИС от других измерительных систем является наличие специального канала связи — совокупности технических средств, необходимых для передачи информации от различных источников на расстояние. Основной элемент такого канала — линия связи — представляет собой физическую среду, по которой передается информация. Линии связи бывают проводные, оптические и радиолинии. Основная характеристика канала связи — полоса пропускания частот.

Для передачи информации по одной линии связи от нескольких источников применяют разделение каналов, причем наиболее часто используют временное или частотное разделение. При временном разделении выполняется последовательная передача измерительной информации от отдельных источников с помощью измерительных коммутаторов. При частотном разделении каждая измеряемая величина использует свою определенную полосу частот, что позволяет одновременно передавать измерительную информацию от нескольких источников.

В зависимости от информативного параметра сигнала, передаваемого по линии связи, ТИС делят на токовые, частотные, время-импульсные и цифровые (кодowo-импульсные).

В *токовых ТИС* (ТИС интенсивности) информативным параметром является значение постоянного тока (0–5 мА), который вырабатывается преобразователем и принимается магнитоэлектрическим миллиамперметром, причем этот миллиамперметр практически не реагирует на помехи в линии связи, так как их среднее значение обычно равно нулю. Такие системы просты, дешевы и надежны в эксплуатации.

В *многоканальных ТИС* применяют временное разделение каналов благодаря установке на передающей и принимающей сторонах системы измерительных

коммутаторов. При этом система значительно усложняется (например, принимающие приборы должны снабжаться запоминающими устройствами для хранения показаний до очередного подключения коммутатора), а быстродействие ухудшается из-за необходимости усреднения помехи.

Дальность действия токовых ТИС ограничивается непостоянством сопротивлений проводов и изоляции между ними и составляет: по воздушным линиям связи — 7–10 км, по кабельным линиям — 20–25 км.

В *частотных ТИС* информативным параметром измеряемых величин является частота синусоидального тока или импульсов постоянного тока. При передаче нескольких значений измеряемых величин применяется частотное разделение каналов.

Частота переменного тока (или импульсов постоянного тока) f_x на выходе передающего устройства зависит от измеряемой величины обычно по одному из двух следующих законов:

$$f_x = f_{\min} + k_1 x; \quad f_x = f_{\min} + k_2 (f_{\max} - f_{\min}) x,$$

где f_{\min} и f_{\max} — минимальная и максимальная частоты передаваемого сигнала; k_1 и k_2 — коэффициенты преобразования.

Переданный по линии связи частотный сигнал преобразуется приемником либо в аналоговый сигнал (ток или напряжение), либо в код в зависимости от формы (аналоговой или цифровой) представления результата измерения в узле выдачи результата.

Дальность действия частотных систем составляет сотни километров, однако число каналов не превышает 18 из-за наличия перекрестных искажений и помех по соседнему частотному каналу.

Во *время-импульсных ТИС* информативными параметрами являются либо длительность импульсов постоянного тока, либо интервалы между импульсами. Длительность импульсов обычно определяется выражением

$$\tau = \tau_{\min} + \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} (x - x_{\min}),$$

где τ_{\min} и τ_{\max} — минимальная и максимальная длительности импульса; x — измеряемая величина с минимальным x_{\min} и максимальным x_{\max} значениями.

Многоканальная время-импульсная ТИС с временным разделением каналов содержит на передающей стороне измерительный коммутатор и преобразователь унифицированных напряжений или токов датчиков во временные интервалы. Принимающая сторона включает в себя преобразователь временных интервалов в коды, кодовый переключатель, регистры, запоминающие коды каждого канала, и узел выдачи результата.

Дальность действия время-импульсных ТИС с радиоканалом связи составляет сотни и даже тысячи километров.

В *цифровых (кодowo-импульсных) ТИС* значения измеряемых величин передаются по линии связи в виде кодовых комбинаций импульсов. Обычно используется двоичный код, который на принимающей стороне преобразуется в единично-десятичный, более удобный для цифрового представления измеряемых величин в узле выдачи результата. Для повышения помехозащищенности при-

меняют специальные коды с обнаружением и исправлением ошибок, вызванных помехами.

Унифицированные сигналы измерительных датчиков в передающем устройстве поступают на входы измерительного коммутатора, который поочередно подключает эти сигналы на вход АЦП. Параллельный код с выхода АЦП подается на преобразователь параллельного кода в последовательный, который, кроме того, управляет измерительным коммутатором и формирователем контрольных символов для образования помехозащищенного кода. Далее последовательный код поступает в линию связи. Приемное устройство в качестве средств представления результата может содержать аналоговые или цифровые приборы и регистраторы в количестве, соответствующем числу измеряемых величин.

Основными достоинствами цифровых ТИС являются высокие метрологические характеристики, хорошая помехозащищенность, возможность ввода информации в ЭВМ. Недостатком можно считать их относительную сложность.

Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), другое название — *автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ)* представляет собой специфический тип измерительной системы, которая обеспечивает процесс измерения и автоматизированное получение результатов измерений для:

- получения достоверной информации о количестве произведенной, переданной и потребленной электрической энергии и мощности;
- оперативного анализа режима потребления и контроля качества электроэнергии;
- оперативного контроля и анализа режима потребления электроэнергии и мощности потребителями;
- оптимального управления нагрузкой потребителей;
- формирования базы данных на энергообъектах.

АСКУЭ выполняется на базе серийно выпускаемых технических средств и программного обеспечения, к которым относятся измерительные трансформаторы тока и напряжения, счетчики электрической энергии (в настоящее время, как правило, цифровые — серий «Альфа» и «ЕвроАльфа» компании АВВ или отечественные ЦЭ6822 и ЦЭ6850М), устройства сбора и передачи данных (УСПД) от счетчиков, каналы связи для передачи измерительной информации и средства обработки информации (как правило, персональные ЭВМ).

Использование персональных ЭВМ (со специализированным программным обеспечением) придает этим системам определенную гибкость, поскольку они позволяют решить ряд прикладных задач по оценке состояния электроэнергетических систем (например, выявить потери электроэнергии и указать места этих потерь).

По принципу организации существующие АСКУЭ можно разделить на два типа: локальные (для отдельных предприятий) и региональные (многоуровневые).

Локальная АСКУЭ (ЛАСКУЭ) располагается на одном предприятии (например, на подстанции) и имеет следующую структуру (рис. 13.2):

- измерительные трансформаторы тока и напряжения (ИТТ и ИТН) — их число соответствует общему числу потребителей электроэнергии предприятия (с учетом числа фаз);

- счетчики электрической энергии (СЧ) с телеметрическим (на выходе пропорциональная последовательность импульсов) или цифровым (на выходе цифровой код) выводом информации;
- устройства сбора и передачи данных (УСПД) – телесумматоры, мультиплексоры и др.;
- электронные устройства связи для передачи измерительной информации с соответствующей каналобразующей аппаратурой (модемы);
- сервер опроса УСПД (СОУСПД) энергосистемы – ЭВМ со специализированным программным обеспечением, способным принимать данные от УСПД и сохранять их в базе данных результатов измерений;
- локальная вычислительная сеть (ЛВС), в которой находятся рабочие места (РМ) технологов, СОУСПД и сервер баз данных (БД). В этом случае сервер опроса УСПД и сервер БД определяются как узел ЛАСКУЭ.

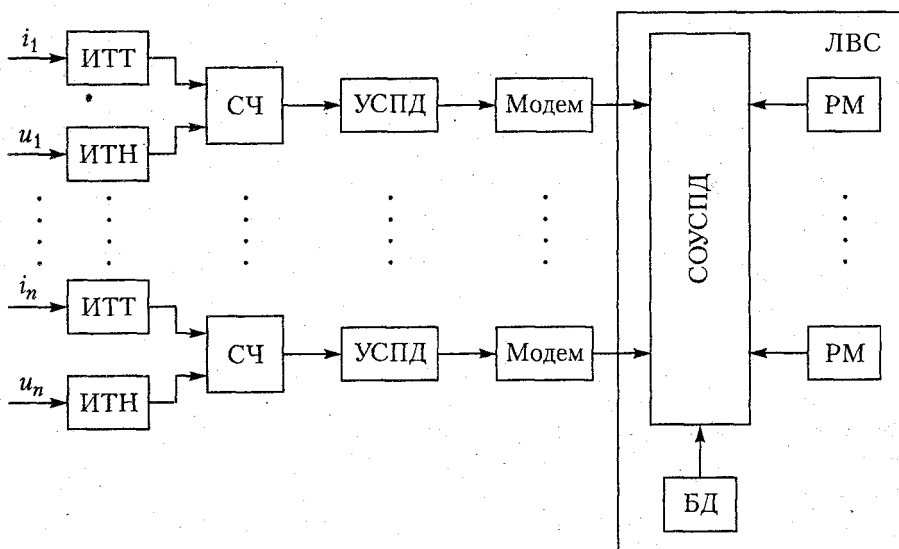


Рис. 13.2. Примерная структурная схема ЛАСКУЭ

Региональная АСКУЭ (РАСКУЭ) является многоуровневой системой, собирающей и обрабатывающей данные от нескольких ЛАСКУЭ. Верхние уровни этой системы образованы узлами ЛАСКУЭ, соединенными каналами связи, построенными на принципах организации сетей Интернет и интранет. К нижнему уровню РАСКУЭ относятся собственно ЛАСКУЭ, от которых поступает информация о потреблении электрической энергии.

Достоверность результатов измерений обеспечивается показателями качества и метрологическими характеристиками используемых в ЛАСКУЭ средств, точностью передачи измерительной информации по линиям связи. Точность передачи информации определяется наличием помех и тепловых шумов в линиях связи, при этом существует конкретное минимальное число искажений битов

передаваемой информации, которое система контроля и защиты от искажения помехами может пропустить. Этот недостаток присущ любой системе передачи информации (так называемому протоколу обмена данными).

Следует отметить, что хотя практически любая АСКУЭ состоит из унифицированных блоков, из-за различий в построении, месте расположения, длине каналов связи, количественном составе и т. п., она является уникальной и, согласно действующим нормативным документам, должна подвергаться испытаниям с целью утверждения типа и внесения в Государственный реестр средств измерений.

13.3. Системы автоматического контроля. Системы технической диагностики. ИИС на основе агрегатных комплексов

Системы автоматического контроля (САК). Эти системы контролируют состояние различных объектов. Современные САК делятся на системы с непрерывным и с дискретным последовательным контролем параметров объекта.

САК с непрерывным контролем в каждом канале содержит сравнивающие устройства и устройства индикации отклонений, количество которых в канале зависит от установленных норм изменения параметра (обычно таких норм может быть от одной до четырех: предупредительная «меньше», аварийная «меньше», предупредительная «больше», аварийная «больше»). Устройство хранения норм может быть общим для всех каналов или индивидуальным для каждого из них. САК с непрерывным контролем требуют большого количества оборудования, поэтому они применяются для контроля наиболее ответственных параметров с целью обеспечения высокой надежности контроля и своевременности выдачи результата.

САК с дискретным контролем являются наиболее распространенными. Они требуют меньшего количества оборудования и потому более дешевы. В них унифицированные сигналы от измерительных датчиков через измерительный коммутатор поступают на вход сравнивающего устройства, где сравниваются с нормами. Блок управления изменяет нормы и переключает коммутатор. Узел представления информации содержит устройства индикации отклонений и цифровой регистрации.

Недостатками таких систем являются большая избыточность операций контроля, а также вероятность пропуска предаварийного и даже аварийного режимов работы объекта.

Промышленностью, как правило, выпускаются комбинированные САК, которые могут наиболее важные параметры контролировать непрерывно, а остальные — дискретно и последовательно во времени.

Системы технической диагностики (СТД). СТД отличаются от САК тем, что помимо контроля состояния объекта и определения его неисправности указывают место неисправности. По назначению СТД делят на собственно диагностические и прогнозирующие. Собственно диагностические системы обнаруживают неисправность проверяемого объекта. Прогнозирующие СТД по результатам проверки предсказывают поведение объекта в будущем.

На основании того, что является критерием оценки состояния объекта диагностики, СТД делятся на детерминированные и статистические. В детерминированных системах параметры проверяемого объекта сравниваются с эталонными параметрами, хранящимися в соответствующих устройствах СТД, а в статистических решение выносится в результате проверок сигналов, характеризующих объект.

Применяют три вида проверок:

- функциональную, при которой выявляют наличие сигнала на выходе объекта при поступлении сигнала на его вход (отсутствие выходного сигнала является отказом);
- алгоритмическую, в ходе которой проверяется последовательность выполнения функций;
- тестовую, или логически-комбинационную, когда на вход проверяемого объекта подается специальный диагностический тест. Этот вид проверки позволяет обнаружить неисправность на любом уровне.

ИИС на основе агрегатных комплексов. Увеличение потребности в различных ИИС привело к созданию систем на основе *агрегатных комплексов* — наборов отдельных узлов и приборов, обладающих необходимой совместимостью. В настоящее время наиболее распространенным принципом построения ИИС является блочно-модульный принцип, заключающийся в построении систем из отдельных модулей — функционально и конструктивно законченных блоков различных уровней сложности. Такой подход позволяет выбирать наилучший вариант построения ИИС, при необходимости легко перестраивать их в процессе эксплуатации, заменять устаревшие узлы более совершенными.

В соответствии с нормативными документами установлены функциональный, структурный и параметрический уровни описания агрегатных комплексов, соответствующих определенному этапу проектирования ИИС.

В настоящее время разработано более 20 агрегатных комплексов, как широкого назначения, так и специализированных. Наиболее широко применяются для построения ИИС агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники и агрегатный комплекс средств вычислительной техники.

13.4. Микропроцессорные системы в измерительной технике. Измерительно-вычислительные комплексы

Микропроцессорные системы. *Микропроцессор* — это программно-управляемое устройство, выполненное по технологии больших интегральных схем (БИС) и предназначенное для обработки данных и управления. Микропроцессор реализуется в виде одного или нескольких кристаллов, каждый из которых содержит несколько тысяч компонентов. Технологичность и высокая эффективность микропроцессора определяются модульным принципом конструирования, предполагающим его выполнение в виде набора совместимых БИС с определенным

числом внешних выводов (24–48), и программным принципом организации его работы. В этот набор, специально разработанный для построения различных микропроцессорных систем, входят собственно микропроцессор (МП), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), перепрограммируемое запоминающее устройство (ППЗУ), узел программного управления (МПУ), устройство ввода-вывода и др.

К основным видам вычислительных средств (рис. 13.3), выполненных на базе микропроцессоров, относятся:

- собственно микропроцессор — одна или несколько БИС, реализующих функции арифметико-логического устройства (АЛУ), внутренних регистров (Рг), устройства управления (УУ); внутренний интерфейс обеспечивает связь перечисленных устройств между собой;
- микропроцессорный модуль — функционально законченное и выполненное на одной плате изделие, включающее в себя БИСы с МП, ОЗУ, ПЗУ, интерфейс внешних устройств, а также генератор тактовых импульсов (ГТИ). Такой модуль может выполнять функции устройства управления (контроллера) при встраивании его в микропроцессорную систему;
- микроЭВМ — представляет собой конструктивно завершенное автономное цифровое вычислительное устройство, выполненное на основе микропроцессорных модулей и включающее в себя источник питания, устройство ввода-вывода, пульт управления и комплект программного обеспечения.

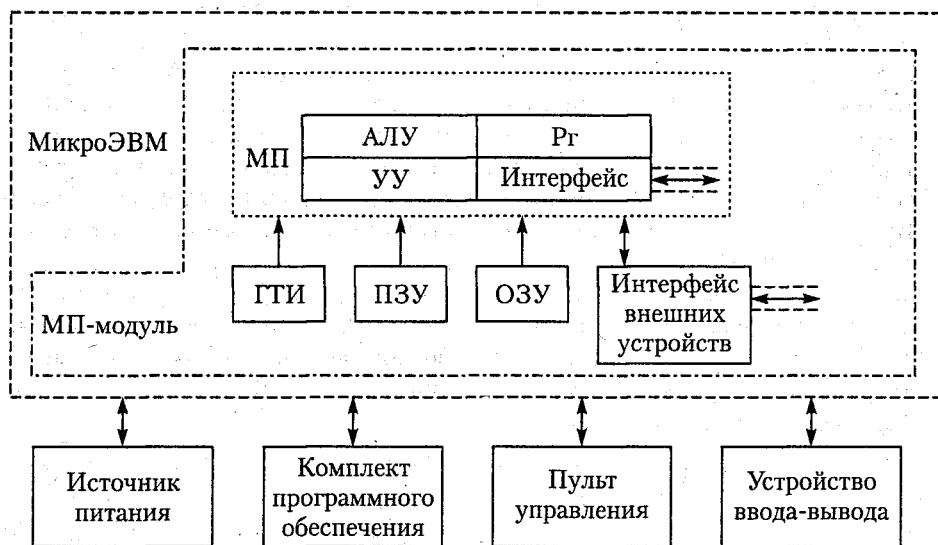


Рис. 13.3. Вычислительные средства, выполненные на базе микропроцессоров

Программное обеспечение, используемое в средствах измерения, определяет перечень измеряемых величин, форму представления результата, критерии обработки получаемой информации, последовательность действий функциональных узлов с учетом объема и характера обработки информации и т. д.

Измерительно-вычислительные комплексы (ИВК). ИВК представляют собой совокупность программно-управляемых измерительных, вычислительных и вспомогательных средств, реализующих алгоритм получения, обработки и использования измерительной информации.

ИВК обеспечивают получение и первичную обработку результатов измерения; управление отдельными узлами в ходе эксперимента, включая установление приоритетов, очередей, диалогового режима; контроль работоспособности отдельных участков комплекса; контроль метрологических характеристик; хранение получаемой информации; представление результатов в виде графиков, таблиц и т. д.

ИВК строятся на основе блочно-модульного принципа, что предполагает при необходимости возможность изменения их структуры. Вместе с тем все измерительные и вычислительные средства ИВК взаимодействуют на основе единого алгоритма.

В зависимости от назначения различают:

- универсальные ИВК, предназначенные для создания автоматизированных систем научных исследований, испытаний различных изделий и материалов;
- проблемно-ориентированные ИВК, соответствующие набору однотипных задач для автоматизированных систем научных исследований или систем управления технологическими процессами;
- уникальные ИВК для единичных специфических исследований и испытаний.

Работоспособность ИВК определяется техническим, математическим и метрологическим обеспечением.

В техническое обеспечение входят измерительные, вычислительные и вспомогательные средства. К измерительным средствам относятся цифровые и аналоговые измерительные приборы, измерительные преобразователи различного функционального назначения, коммутаторы измерительных цепей, калибраторы, измерительные источники питания и т. д. В качестве вычислительных средств в ИВК используются аналоговые, гибридные и цифровые вычислительные устройства микроЭВМ.

Основное содержание математического обеспечения ИВК составляют алгоритмы и программы. Алгоритмы обеспечивают выполнение процедур, связанных с измерением физических величин, обработкой результатов измерения и т. п. Программы обеспечивают общее функционирование ИВК.

В метрологическое обеспечение входят:

- теория метрологии, связанная с расчетом, поверкой и контролем метрологических характеристик, проведением испытаний средств измерений;
- эталонные средства измерений, предназначенные для проведения поверок, контроля метрологических характеристик и испытания средств измерений;
- нормативные документы (государственные и отраслевые стандарты, руководящие технические материалы и методические указания), законодательно определяющие процедуры расчета, поверки и контроля метрологических характеристик и испытаний средств измерений, обеспечивающие единство измерений.

Системная совместимость всех функциональных узлов любого ИВК обеспечивается:

- ❑ унификацией и нормированием всех видов и параметров сигналов (информационная совместимость);
- ❑ однотипностью метрологических характеристик всех средств измерений, используемых в комплексе (метрологическая совместимость);
- ❑ согласованностью используемых программ и подпрограмм, языков программирования (программная совместимость);
- ❑ унификацией используемых модулей, выполненных на одном технологическом уровне (конструктивная совместимость);
- ❑ нормированием условий окружающей среды, надежности и т. п. (эксплуатационная совместимость).

Информационная и конструктивная совместимости достигаются применением стандартных интерфейсов — совокупностью цепей, связывающих различные устройства, и алгоритмом, определяющим порядок передачи информации между этими устройствами. При этом используется либо единый интерфейс ЭВМ, входящий в состав ИВК, либо специальный интерфейс, имеющий свой блок управления (контроллер).

ГЛАВА 14 Магнитоизмерительные приборы

Магнитоизмерительные приборы (МИП) предназначены для измерения магнитных величин, являющихся параметрами магнитных полей и магнитных материалов. Любые МИП обязательно имеют следующие два функциональных узла:

- измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования измеряемой магнитной величины (магнитного потока, магнитной индукции, напряженности магнитного поля и т. д.) в электрическую величину, удобную для дальнейших преобразований;
- измерительное устройство, необходимое для измерения выходной величины измерительного преобразователя.

14.1. Приборы для измерения магнитного потока

Индукционный преобразователь и измерительная катушка. Для измерения магнитного потока используют явление электромагнитной индукции. Соответствующий измерительный преобразователь, работа которого основана на этом явлении, называется *индукционным преобразователем*. Он представляет собой катушку, в которой при изменении магнитного потока Φ возникает ЭДС самоиндукции e , определяемая соотношением

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (14.1)$$

где $\Psi = w_k \Phi$ — потокосцепление; w_k — число витков в катушке.

Отсюда

$$\Delta\Psi = -\int_0^{\infty} e dt = -R \int_0^{\infty} i dt,$$

где R — сопротивление цепи катушки; i — ток в ней.

Из выражения (14.1) видно, что с помощью индукционного преобразователя магнитная величина (магнитный поток Φ) преобразуется в электрическую величину (ЭДС e). Индукционный преобразователь с известным произведением $w_k S_k$ (где w_k — число витков, а S_k — площадь поперечного сечения преобразователя) называется *измерительной катушкой*. Произведение $w_k S_k$ называется постоянной измерительной катушки.

Если поле однородно и перпендикулярно плоскости катушки, то

$$e = -w_k \frac{d\Phi}{dt} = -w_k S_k \frac{dB}{dt} = -\mu_0 w_k S_k \frac{dH}{dt}, \quad (14.2)$$

где B — магнитная индукция; H — напряженность магнитного поля; μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Таким образом, согласно (14.2), с помощью измерительной катушки можно измерять не только магнитный поток, но и магнитную индукцию, и напряженность магнитного поля.

При измерении параметров переменных магнитных полей в зависимости от применяемого способа могут быть измерены мгновенные или амплитудные значения этих параметров либо амплитуды первых гармоник.

При измерении параметров постоянных магнитных полей необходимо изменять потокосцепление, что осуществляется одним из следующих способов:

- вынесением измерительной катушки из поля;
- поворотом катушки на 180° ;
- вращением катушки с постоянной скоростью;
- качанием измерительной катушки относительно ее среднего положения.

Измерительные приборы. Магнитоизмерительный прибор для измерения магнитного потока со шкалой, градуированной в единицах магнитного потока — веберах, называется *веберметром*. Применяются веберметры различного принципа действия.

Одним из первых приборов для измерения магнитного потока был магнитоэлектрический веберметр. В нем используется магнитоэлектрический измерительный механизм без противодействующего момента, но с большим магнитоиндукционным моментом успокоения. Если к зажимам веберметра подключить измерительную катушку и изменить магнитный поток, сцепляющийся с ее витками, то угол поворота $\Delta\alpha$ подвижной части веберметра будет пропорционален изменению потока $\Delta\Phi_x$.

При изменении магнитного потока, сцепляющегося с витками измерительной катушки, происходит соответствующее изменение магнитного потока, сцепляющегося с витками подвижной катушки веберметра, то есть

$$\begin{aligned} w_k \Delta\Phi_x &= w_b S_b B \Delta\alpha; \\ \Delta\alpha &= \frac{w_k}{w_b S_b B} \Delta\Phi_x, \end{aligned} \quad (14.3)$$

где w_k — число витков измерительной катушки; Φ_x — измеряемый магнитный поток; w_b — число витков катушки веберметра; S_b — площадь поперечного сечения этой катушки; B — магнитная индукция в воздушном зазоре измерительного механизма веберметра.

Выражение (14.3) справедливо при условии, что сопротивление измерительной катушки не превосходит значения, указанного в паспорте или на шкале прибора (в пределах от 5 до 30 Ом).

Поскольку в веберметре противодействующий момент отсутствует, указатель прибора занимает произвольное положение, поэтому при измерении магнитного потока либо берут разность конечного и начального отсчетов по шкале, либо устанавливают указатель на нулевую или другую удобную отметку шкалы, используя при этом электрический корректор.

Основными достоинствами магнитоэлектрического веберметра являются простота и удобство в работе, градуировка шкалы в единицах магнитного потока, независимость показаний прибора в широких пределах от сопротивления цепи веберметра и скорости изменения измеряемого потока; главными недостатками — низкая чувствительность, невысокая точность (погрешность порядка 1,5 %), использование измерительных катушек ограниченного сопротивления.

На рис. 14.1 приведена упрощенная схема фотогальванометрического веберметра, который представляет собой фотогальванометрический усилитель с отрицательной обратной связью по производной выходного тока.

При изменении измеряемого магнитного потока на зажимах измерительной катушки ИК возникает ЭДС самоиндукции e , под действием которой через магнитоэлектрический гальванометр Γ протекает ток. При этом перемещается подвижная часть гальванометра, изменяя световой поток, падающий на фотоэлемент $\Phi Э$, и, следовательно, его фототок. После усиления усилителем постоянного тока УПТ выходной ток I преобразуется дифференциальным RC -звеном и в виде напряжения обратной связи $U_{o.c}$ поступает в цепь измерительной катушки. Перемещение подвижной части гальванометра происходит до тех пор, пока $U_{o.c}$ не уравновесит e :

$$k \frac{dI}{dt} = -\omega_k \frac{d\Phi_x}{dt}.$$

Здесь ω_k — число витков измерительной катушки; Φ_x — измеряемый поток; k — постоянная RC -звена обратной связи.

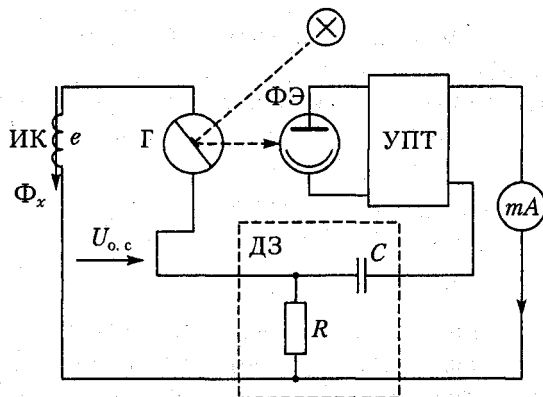


Рис. 14.1. Упрощенная схема фотогальванометрического веберметра

Таким образом, по изменению тока ΔI можно судить об изменении потока $\Delta \Phi_x$ (шкала миллиамперметра градуируется в единицах магнитного потока):

$$\Delta I = \frac{w_k}{k} \Delta \Phi_x.$$

Фотогальванометрический веберметр обладает высокой чувствительностью (может измерять магнитные потоки от 2 мкВб), небольшой погрешностью ($\leq 1,5\%$), повышенным входным сопротивлением (благодаря действию отрицательной обратной связи), что позволяет использовать измерительные катушки с более высоким сопротивлением.

В настоящее время для измерения магнитного потока все чаще применяются цифровые веберметры, принцип действия которых основан на измерении времени разряда интегрирующего конденсатора, заряжающегося током измерительной катушки.

Диапазон магнитных потоков, измеряемых цифровыми веберметрами, составляет от 10^{-2} до 10 мкВб, основная приведенная погрешность — $\pm 0,5\%$. Значительное уменьшение погрешности измерения (до $\pm 0,05\%$) можно обеспечить преобразованием выходного сигнала измерительной катушки в последовательность импульсов, частота следования которых пропорциональна величине измеряемого потока.

14.2. Приборы для измерения магнитной индукции

Тесламетр — это магнитоизмерительный прибор для измерения магнитной индукции, шкала которого градуирована в единицах магнитной индукции — теслах.

Тесламетр с преобразователем Холла. В этом приборе магнитоизмерительным преобразователем является датчик Холла, представляющий собой полупроводниковую пластину, по которой протекает ток I . В магнитном поле, вектор магнитной индукции B которого перпендикулярен плоскости пластины, на ее боковых гранях возникает ЭДС Холла

$$E_x = CIB,$$

где C — постоянная, зависящая от свойств материала и размеров пластины.

Таким образом, при $I = \text{const}$ ЭДС Холла пропорциональна магнитной индукции. Значение E_x (после усиления) может быть измерено, например, милливольтметром, шкала которого градуирована в единицах магнитной индукции.

Тесламетр с преобразователем Холла позволяет измерять магнитную индукцию (или напряженность магнитного поля) постоянных, переменных (в диапазоне частот до 100 кГц) и импульсных магнитных полей. Датчик Холла имеет небольшие размеры, что позволяет измерять индукцию в малых зазорах (например, в пазах электрических машин).

У выпускаемых промышленностью тесламетров верхние пределы измерений лежат в диапазоне от $2 \cdot 10^{-3}$ до 2 Тл, основная приведенная погрешность — $\pm(1,5-2,5)\%$.

Ферроимпульсионный тесламетр. Принцип действия такого тесламетра основан на компенсации измеряемой магнитной индукции (или напряженности магнитного поля) методом уравнивания.

Основным узлом прибора (рис. 14.2) является дифференциальный ферроимпульсионный преобразователь, состоящий из двух одинаковых по свойствам и размерам пермалловых сердечников С с одинаковыми, включенными встречно, обмотками возбуждения w , питающимися переменным током от генератора Г.

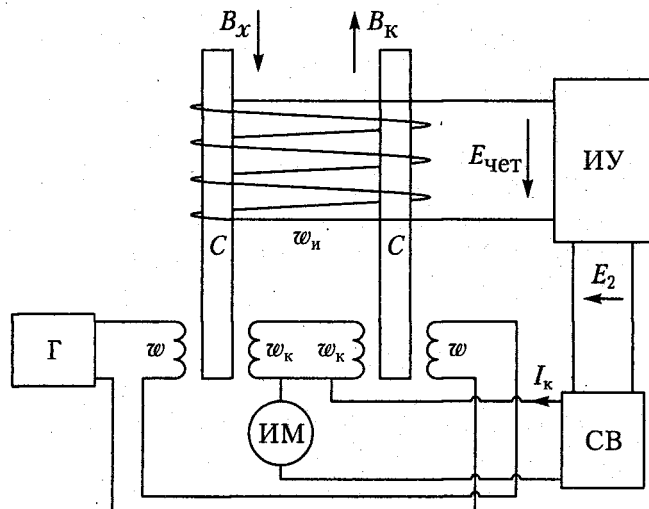


Рис. 14.2. Упрощенная схема ферроимпульсионного тесламетра

При отсутствии внешнего (измеряемого) поля ЭДС на зажимах индикаторной обмотки w_n равна 0, так как потоки, создаваемые обмотками возбуждения w , равны по величине и противоположны по направлению. При появлении внешнего поля B_x , вектор которого параллелен осям сердечников, кривая переменной составляющей индукции становится несимметричной относительно оси времени, то есть в составе этой кривой появляются четные гармоники, которые будут индуцировать ЭДС $E_{чет}$ в индикаторной обмотке w_n . В частности, для второй гармоники E_2 можно считать

$$E_2 \approx k_1 B_x = k_2 H_x,$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты преобразования (зависят от параметров преобразователя, частоты и значения напряженности поля возбуждения); B_x — измеряемая индукция, H_x — напряженность магнитного поля.

Выходной сигнал индикаторной обмотки w_n через избирательный усилитель ИУ, усиливающий вторую гармонику E_2 , создает в третьей, размещенной на сердечниках С преобразователя, обмотке w_k компенсирующее поле с индукцией B_k . В конце концов в обмотке w_k устанавливается ток I_k , создающий поле, полностью компенсирующее измеряемое.

Измеряя этот ток с помощью измерительного механизма ИМ, шкала которого градуирована в теслах (или в амперах на метр), можно измерять индукцию B_x (или напряженность H_x) магнитного поля.

Ферромодуляционные тесламетры применяют для измерения магнитной индукции (или напряженности магнитного поля) небольших постоянных и низкочастотных (до 1 кГц) переменных магнитных полей. Они обладают высокой чувствительностью (диапазон измерений индукции лежит в пределах от 10^{-6} до 1 мТл) и хорошей точностью (погрешность измерения 1–5 %). В настоящее время нашли широкое применение цифровые ферромодуляционные тесламетры, имеющие повышенную точность и быстродействие.

Ядерно-резонансный тесламетр. Принцип действия этого тесламетра основан на явлении ядерного резонанса, который состоит в том, что при помещении во внешнее магнитное поле магнитные моменты ядер атомов рабочего вещества начинают прецессировать вокруг вектора магнитной индукции $B_{\text{вн}}$ внешнего поля с частотой f , пропорциональной величине этой индукции:

$$f = \frac{\gamma B_{\text{вн}}}{2\pi},$$

где γ — отношение магнитного момента ядра атома к его моменту количества движения (гиромагнитное отношение). Измеряя частоту прецессии, можно определить значение магнитной индукции.

Измерение частоты прецессии осуществляется методом, основанным на явлении ядерного магнитного резонанса, а именно: на измеряемое магнитное поле под углом 90° накладывается переменное поле, частоту которого можно плавно менять.

При совпадении частот прецессии и накладываемого переменного поля возникает резонанс и амплитуда прецессии резко возрастает. Момент резонанса фиксируется с помощью электронного осциллографа. Частота прецессии определяется измерением частоты переменного поля в момент резонанса.

Измерение частоты может быть выполнено с погрешностью $\leq \pm 10^{-4}$ %. Гиромагнитное отношение определяется также с довольно высокой точностью (например, для ядер атомов водорода погрешность составляет $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ %). Вследствие этого основная приведенная погрешность ядерно-резонансных тесламетров лежит в пределах $\pm(0,001-0,1)$ % в зависимости от типа прибора. Кроме того, эти тесламетры имеют высокую чувствительность и широкий диапазон измерений (10^{-12} –10 Тл). Применяются ядерно-резонансные тесламетры для измерения параметров постоянных и переменных (до 20 кГц) магнитных полей.

Сверхпроводниковый тесламетр. Принцип действия этого тесламетра основан на явлении сверхпроводимости, что в сочетании с некоторыми физическими эффектами позволяет создавать приборы уникальной чувствительности и высокой точности. Рассмотрим принцип действия одного из них.

Магнитоизмерительный преобразователь (сплошной цилиндр из сверхпроводящего материала, на который намотаны измерительная обмотка и нагреватель) помещается во внешнее измеряемое магнитное поле.

Нагреватель обеспечивает периодические, с частотой 1 МГц, нагрев и охлаждение цилиндра до температуры, большей и меньшей критической, соответст-

венно для данного сверхпроводящего материала. В результате происходит периодическое выталкивание магнитного потока из объема цилиндра (эффект Мейснера), а значит, и изменение потокосцепления его с измерительной обмоткой. В соответствии с законом электромагнитной индукции на зажимах этой обмотки возникает ЭДС, пропорциональная напряженности измеряемого магнитного поля.

Сверхпроводниковые тесламетры имеют уникальный порог чувствительности (10^{-15} Тл) и высокую точность, но могут применяться для измерения полей частотой только до 1 кГц, содержат сложную аппаратуру и поэтому дороги.

ГЛАВА 15 Электрические преобразователи и приборы для измерения неэлектрических величин

15.1. Основные понятия и классификации

Среди всего разнообразия физических величин, подлежащих измерению, значительную часть составляют неэлектрические величины. При этом электрические средства измерений имеют целый ряд существенных достоинств, благодаря чему они применяются весьма широко. К таким достоинствам можно отнести возможность проведения дистанционных измерений, автоматического преобразования как информативных параметров сигнала, так и результатов измерений, способность непрерывно регистрировать очень медленные и быстро меняющиеся величины, возможность автоматического управления процессом измерения, широкий диапазон значений измеряемых величин и т. п.

При измерении неэлектрических величин электрическими приборами измеряемая величина должна предварительно преобразовываться в электрическую величину. Поэтому любой подобный прибор обязательно включает в себя *измерительный преобразователь неэлектрической величины*, который устанавливает однозначную функциональную связь между измеряемой неэлектрической и преобразованной с его помощью электрической величинами.

Многообразие методов и приборов, применяемых при электрических измерениях неэлектрических величин, весьма велико, поэтому создать единую классификацию довольно сложно. Вследствие этого приведем примеры лишь некоторых классификаций измерительных преобразователей:

1. По роду измеряемой величины:

- тепловые (измеряют температуру и другие тепловые параметры);
- механические (измеряют механические напряжения, деформации, моменты и т. д.);
- геометрические (измеряют перемещения, размеры и т. п.);

- излучения (определяют потоки излучения, спектральный состав);
 - для измерения параметров, характеризующих свойства веществ, их состав и т. д.
2. По виду выходного сигнала:
- параметрические;
 - генераторные.
3. По принципу преобразования:
- с аналоговым прямым преобразованием в непрерывный электрический сигнал;
 - с преобразованием, основанным на дифференциальном методе измерения;
 - с преобразованием, основанным на принципе компенсации (уравновешивания).

В первом случае прибор состоит из последовательно включенных измерительного преобразователя неэлектрической величины и измерительного механизма, шкала которого градуируется в единицах измеряемой неэлектрической величины (например, прибор для измерения температуры с термопарой в качестве измерительного преобразователя, термоЭДС которой пропорциональна измеряемой температуре и измеряется магнитоэлектрическим милливольтметром).

Во втором случае (рис. 15.1) преобразователь включает в себя дифференциальное звено ДЗ с двумя выходами, два канала преобразования (Π_1 и Π_2) и вычитающее устройство ВУ. При изменении входной измеряемой величины x относительно начального значения x_0 на Δx выходные величины дифференциального звена получают приращения с разными знаками относительно начального значения, преобразуются в электрические величины y_1 и y_2 и вычитаются. В результате выходная величина преобразователя оказывается пропорциональной приращению Δx измеряемой неэлектрической величины. Такое преобразование имеет меньшую аддитивную погрешность, меньшую нелинейность функции преобразования и большую чувствительность по сравнению с прямым преобразованием.

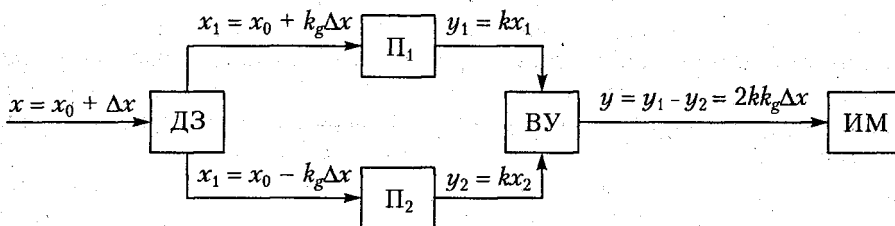


Рис. 15.1. Блок-схема дифференциального измерительного преобразователя

При третьем варианте преобразования (рис. 15.2) в узле сравнения преобразователя происходит сопоставление однородных измеряемой и изменяемой, создаваемой узлом обратной связи, величин до их полного уравновешивания. В качестве узла обратной связи используют преобразователь электрической величины в неэлектрическую (лампа накаливания, электромеханический преобразователь и др.). Применение метода уравновешивания (компенсации) повышает точность

измерения, быстродействие и уменьшает потребление энергии от объекта исследования.

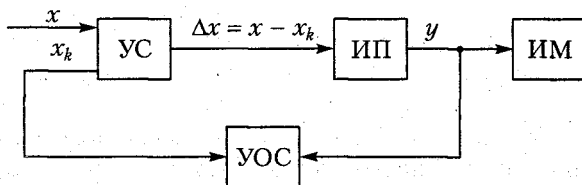


Рис. 15.2. Блок-схема компенсационного измерительного преобразователя

15.2. Измерительные преобразователи и приборы, в которых они применяются

В зависимости от вида выходного сигнала все измерительные преобразователи неэлектрических величин делятся на параметрические и генераторные.

В *параметрических преобразователях* выходная величина является параметром электрической цепи, таким как сопротивление R , собственная индуктивность L , взаимная индуктивность M или емкость C . При использовании параметрических преобразователей всегда необходим дополнительный источник электрической энергии (для образования выходного сигнала преобразователя).

В *генераторных преобразователях* выходной величиной является ЭДС или заряд. При их использовании вспомогательные источники применяются только для усиления полученного сигнала.

К важнейшим метрологическим характеристикам преобразователей относятся:

- номинальная статическая характеристика преобразования — функциональная зависимость между измеряемой неэлектрической и преобразованной электрической величинами (обычно стремятся иметь линейную характеристику преобразования, однако используют преобразователи и с квадратичной, логарифмической и другими зависимостями);
- чувствительность преобразователя — имеет размерность, зависящую от природы измеряемой и преобразованной величин (например, для термопары размерность чувствительности — мВ/...°);
- основная погрешность — находится при определенных значениях внешних воздействий и определяется принципом действия преобразователя, несовершенством конструкции и технологии его изготовления и т. д.;
- дополнительные погрешности — вызваны влиянием на характеристику преобразования изменений различных факторов (температуры, внешних электрических и магнитных полей, вибраций и др.);
- динамические погрешности, обусловленные инерционностью преобразователей и необходимостью затрат времени на самопреобразование;
- полное выходное сопротивление преобразователя и др.

Далее будут рассмотрены наиболее часто применяемые измерительные преобразователи.

15.2.1. Параметрические преобразователи

Среди параметрических преобразователей наиболее широкое применение получили реостатные, тензочувствительные (тензометрические), термочувствительные, индуктивные и емкостные преобразователи.

В *реостатных преобразователях* под влиянием перемещения, вызванного воздействием измеряемой неэлектрической величины, происходит изменение электрического сопротивления. Конструктивно они выполняются в виде реостата (каркас с нанесенной на него проволоочной обмоткой), подвижный контакт (движок) которого в зависимости от формы совершает угловое или линейное перемещение. В результате между подвижным контактом и любым из зажимов обмотки изменяются значения сопротивлений, измеряемые, как правило, с помощью мостовых схем.

Статическая характеристика преобразования реостатных преобразователей имеет ступенчатый характер, так как сопротивление изменяется скачками, равными сопротивлению одного витка. Это вызывает появление погрешности измерения. Если применить реохордный преобразователь, в котором подвижный контакт скользит вдоль оси проволоки, то указанной погрешности не будет.

Основными недостатками реостатных преобразователей являются наличие скользящего контакта, необходимость сравнительно больших перемещений и значительных усилий для перемещения. Однако простота конструкции и возможность получения больших выходных сигналов делают их весьма удобными при измерении относительно больших угловых или линейных перемещений, а также других неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в перемещение (давления, усилия и т. п.).

Принцип работы *тензочувствительных преобразователей (тензорезисторов)* основан на использовании явления тензоэффекта — изменения электрического сопротивления проводника (полупроводника) при его механической деформации. Относительное изменение сопротивления $\Delta R/R$ линейно зависит от относительной деформации $\Delta l/l$ проволоки:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta l}{l},$$

где S — коэффициент тензочувствительности. Для константана $S = 1,9 \dots 2,1$, для манганина это значение в 3–4 раза меньше. Размеры преобразователей зависят от их назначения и колеблются в широких пределах.

Тензочувствительные преобразователи изготавливаются из проволоки, фольги или напылением в вакууме тензочувствительной пленки (проволочные, фольговые и пленочные соответственно).

Наиболее широкое распространение получили преобразователи из константановой проволоки диаметром 0,02–0,05 мм, поскольку они имеют малый температурный коэффициент сопротивления и высокое удельное сопротивление. Проволока укладывается зигзагообразно и приклеивается на подложку из целлофана или тонкой бумаги с помощью пленки лака или клея. После этого готовый преобразователь закрепляют (наклеивают) на поверхности испытуемой детали так, чтобы направление ожидаемой деформации совпало с продольной осью подложки.

Основными достоинствами проволочных преобразователей являются простота конструкции, линейность статической характеристики преобразования, малые габариты и масса, недостатками — влияние температуры окружающей среды (устраняется применением методов термокомпенсации) и низкая чувствительность.

Если для измерений необходима высокая чувствительность тензорезистора, то его изготавливают из полупроводникового материала (коэффициент S таких преобразователей составляет несколько сотен). Однако полупроводниковые преобразователи имеют большой разброс характеристик.

Тензочувствительные преобразователи применяются в приборах для измерения давлений (манометрах), деформаций, усилий, моментов и т. п.

В *термочувствительных преобразователях (терморезисторах)* используется зависимость электрического сопротивления проводников (или полупроводников) от температуры. В процессе измерения между терморезистором и окружающей средой происходит теплообмен вследствие теплопроводности самого терморезистора и окружающей среды, конвекции в ней и излучения. Интенсивность теплообмена, а значит, и температура терморезистора зависят от температуры и скорости перемещения среды, от состава, теплопроводности, плотности и других физических свойств среды, от геометрических размеров и формы терморезистора и защитного устройства, в котором он размещен. Таким образом, температура терморезистора и, следовательно, его сопротивление могут быть использованы для измерения различных неэлектрических параметров, характеризующих газовую или жидкую среду. При этом измерительное устройство должно быть сконструировано так, чтобы его выходная величина однозначно определялась измеряемой.

По режиму работы различают терморезисторы перегревные и без преднамеренного перегрева. В первых электрический ток вызывает перегрев, зависящий от различных свойств среды, которые и являются объектами измерения. Во вторых протекающий ток практически не вызывает перегрева, поэтому температуру терморезистора определяет температура окружающей среды. Такие преобразователи применяют для измерения температуры.

Далее рассмотрим области применения термочувствительных преобразователей.

Измерение температуры окружающей среды

В приборах для измерения температуры (термометрах сопротивления) наиболее широкое применение получили платиновые (для измерения температуры в диапазоне от -260 до 1100 °С), медные (в диапазоне от -200 до 200 °С) и никелевые (в диапазоне от -50 до 180 °С) терморезисторы. Платиновые терморезисторы обеспечивают высокую точность измерения температуры (приведенная погрешность $\gamma = \pm 0,002$ %), хотя и обладают большой инерционностью (температурный коэффициент составляет не более 1 °С в минуту), в то время как медные и никелевые терморезисторы имеют более низкую точность ($\gamma = \pm 0,5$ %), но меньшую инерционность (более 1 °С в минуту).

Зависимость сопротивления проводника от температуры может быть аппроксимирована тремя аналитическими выражениями:

□ для отрицательных температур

$$R_t = R_0 [1 + at + bt^2 + ct^3 (t - 100)];$$

□ для положительных температур

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2),$$

или приближенно (в диапазоне 0–180 °С)

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление при температуре 0 °С (стандартные значения 1, 10, 50, 100, 500 Ом); a , b , c — постоянные коэффициенты; α — температурный коэффициент сопротивления проводника; t — температура, °С.

Конструктивное выполнение преобразователей зависит от области применения, диапазона измеряемых температур и т. д. Например, в платиновых терморезисторах применяется проволока без изоляции, которая наматывается на каркас из слюдяных пластин, в медных терморезисторах — изолированная эмалью или шелком проволока, намотанная на пластмассовый каркас.

Еще один вариант конструкции: две или четыре секции платиновой спирали (электрически соединенные последовательно) помещаются в каналы керамической трубки, которые засыпают порошком безводного оксида алюминия, исполняющего роль электрической изоляции и механического фиксатора спирали. Снаружи для крепления выводов и герметизации керамическая трубка заливается глазурью и для защиты от внешних воздействий помещается в специальную арматуру.

Для измерения температуры в диапазоне от –270 °С до 300 °С наряду с проводниковыми применяются также полупроводниковые терморезисторы (термисторы) различных типов. Их достоинствами являются высокая чувствительность (при 20 °С температурный коэффициент сопротивления у термисторов в 10–15 раз больше, чем у чистого проводника) и большие сопротивления (до 1 МОм) при малых размерах, недостатками — плохая воспроизводимость характеристик, нелинейность характеристики преобразования (экспонента) и невысокая точность ($\gamma = \pm 1,0\%$). Кроме того, в диапазоне от –80 до 150 °С применяют термодиоды и термотранзисторы, в которых используется зависимость сопротивления p - n -перехода от температуры. Как и у термисторов, их основными достоинствами являются высокая чувствительность и малые размеры, они малоинерционны, надежны в эксплуатации и дешевы. Недостатки — узкий температурный диапазон и плохая воспроизводимость статической характеристики преобразования.

Измерение скорости газового потока

В приборах для измерения скорости газового потока (термоанемометрах) применяются перегреваемые терморезисторы, температура которых при помещении в газовый поток зависит от скорости потока (теплообмен регулируется скоростью газового потока, создающего принудительную конвекцию). Термоанемометры позволяют измерять скорость потока до 1 м/с с высокой чувствительностью и быстродействием.

Измерение степени разреженности

В приборах для измерения степени разреженности (вакуумметрах) используется зависимость теплопроводности газа от давления при большом разрежении. При низких давлениях теплопроводность газа зависит от числа молекул в единице объема (степени разреженности). Таким образом, при изменении степени разреженности будет меняться теплопроводность среды, а значит и температура

терморезистора, измеряя которую (например, с помощью термопары) можно судить о степени разреженности среды (газа). Для измерения используются металлические или полупроводниковые терморезисторы, заключаемые в специальный стеклянный или металлический сосуд, сообщающийся с исследуемой средой.

Анализ состава газовых смесей

При анализе состава газовых смесей с помощью приборов, называемых газоанализаторами, используют зависимость теплопроводности газовой смеси от ее состава. При постоянстве теплопроводностей компонентов в смеси двух газов, не вступающих друг с другом в реакцию, теплопроводность смеси однозначно зависит от процентного содержания одного из компонентов. Теплопроводность измеряется перегревным платиновым терморезистором, помещаемым в камеру с анализируемой смесью. Для исключения влияния температуры окружающей среды в схему измерения добавляется компенсационный терморезистор, находящийся в специальной камере с постоянным по составу газом. Рабочий и компенсационный терморезисторы включают в соседние плечи мостовой схемы и этим осуществляют термокомпенсацию.

Емкостные преобразователи реализуют зависимость электрической емкости C конденсатора от площади S обкладок, расстояния d между ними и относительной диэлектрической проницаемости среды ϵ , в которой они находятся:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (15.1)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная.

Зависимость $C = f_1(d)$ используется для измерения малых перемещений (до 1 мм). Применяется простейшая конструкция — одна подвижная и одна неподвижная пластины, расстояние между которыми (и, соответственно, емкость) изменяется под действием измеряемой величины. Если подвижную пластину поместить между двумя неподвижными, получится конструкция дифференциального преобразователя, являющаяся более чувствительной. Перемещение подвижной пластины (под действием измеряемой величины) приводит к одновременному увеличению одной, образованной подвижной и одной из неподвижных пластин, емкости и уменьшению другой емкости, образованной подвижной и второй неподвижной пластинами. Такие преобразователи, как правило, включают в мостовые измерительные схемы (рис. 15.3. Здесь ДИП — дифференциальный измерительный преобразователь с двумя неподвижными (1) и одной подвиж-

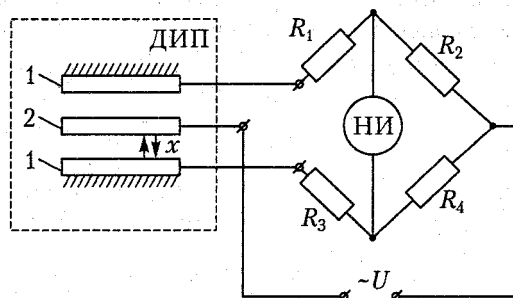


Рис. 15.3. Мостовая схема с емкостным ДИП

ной (2) пластинами). Недостатком приведенных конструкций преобразователей является в соответствии с (15.1) нелинейность зависимости $C = f_1(d)$.

Меньшей чувствительностью обладают преобразователи, в которых реализуется зависимость $C = f_2(S)$, поэтому преобразователи с переменной активной площадью пластин применяются для измерения сравнительно больших линейных (более 1 мм), а также угловых перемещений. Их достоинством является линейность зависимости $C = f_2(S)$.

Зависимость $C = f_3(\epsilon)$ используется в измерителях уровней жидкости (уровнемерах), а также для определения влажности или толщины диэлектрических изделий. Так, например, если в сосуд с жидкостью поместить два электрода, то при изменении уровня жидкости будет меняться общая (воздух плюс жидкость) диэлектрическая проницаемость среды между электродами, а значит и емкость устройства. При измерении влажности или толщины изделий из диэлектрика между электродами помещается диэлектрик в виде ленты или пластины. Емкость образовавшегося конденсатора с двойным слоем (воздух и испытуемый диэлектрик) будет равна

$$C = \frac{S}{\frac{d - d_d}{\epsilon_0} + \frac{d_d}{\epsilon_d}}, \quad (15.2)$$

где d — расстояние между электродами конденсатора; d_d и ϵ_d — толщина и диэлектрическая проницаемость испытуемого диэлектрика соответственно. Из выражения (15.2) следует, что при неизменных для данного устройства S и d емкость C при $\epsilon_d = \text{const}$ зависит от толщины d_d , а при $d_d = \text{const}$ — от диэлектрической проницаемости ϵ_d , то есть в первом случае по значению емкости можно контролировать толщину диэлектрика, во втором — его влажность.

Основными достоинствами емкостных преобразователей являются высокая чувствительность (реагируют на перемещения порядка 10^{-7} мм), простота конструкции и малая инерционность. Однако они подвержены влиянию внешних электрических полей, паразитных емкостей, температуры и влажности окружающей среды. Для уменьшения этих влияний необходимо применять экранирование преобразователя, соединительных и подводящих проводов, выбирать точку заземления измерительной цепи, термостатировать преобразователь и т. д. Кроме того, для питания цепей с емкостными преобразователями, как правило, используют источники высокой частоты (до десятков мегагерц), что уменьшает шунтирующее действие сопротивления изоляции.

Индуктивные преобразователи используют зависимость собственной или взаимной индуктивностей обмоток на магнитопроводе от взаимного положения, геометрических размеров и магнитного состояния отдельных элементов конструкции.

Из электротехники известно, что собственная индуктивность L обмотки на магнитопроводе связана с числом витков w обмотки и магнитным сопротивлением Z_m магнитопровода соотношением

$$L = \frac{w^2}{Z_m}, \quad (15.3)$$

а взаимная индуктивность двух обмоток (с числом витков w_1 и w_2) на одном магнитопроводе —

$$M = \frac{w_1 w_2}{Z_m}. \quad (15.4)$$

В выражениях (15.3) и (15.4) магнитное сопротивление

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}.$$

При этом активная составляющая магнитного сопротивления

$$R_m = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i} + \frac{\delta}{\mu_0 S},$$

где l_i , S_i , μ_i — длина, площадь поперечного сечения и относительная магнитная проницаемость различных участков магнитопровода соответственно; μ_0 — магнитная постоянная; δ и S — соответственно, длина и площадь поперечного сечения воздушного участка магнитной цепи.

Реактивная составляющая магнитного сопротивления

$$X_m = \frac{P}{\omega \Phi^2}, \quad (15.5)$$

где P — потери мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи; Φ — магнитный поток в магнитопроводе; ω — угловая частота.

Соотношения (15.3)–(15.5) показывают, что собственную и взаимную индуктивности преобразователя можно менять, изменяя длину δ или сечение S воздушного участка магнитной цепи, потери мощности P в магнитопроводе и т. д.

В простейшем индуктивном преобразователе длина воздушного зазора изменяется перемещением подвижного сердечника (якоря) относительно неподвижного. Такой преобразователь имеет высокую чувствительность и применяется при перемещениях якоря в пределах от 0,01 до 5 мм, однако зависимость $L = f(\delta)$ носит нелинейный характер. При перемещении якоря в направлении, перпендикулярном предыдущему случаю, будет меняться площадь поперечного сечения воздушного промежутка. В этом случае преобразователь будет иметь меньшую чувствительность (измеряемые перемещения — в пределах 10–15 мм), но линейную характеристику преобразования $L = f(S)$.

Большую чувствительность имеют дифференциальные индуктивные преобразователи, в которых якорь помещен между двумя неподвижными сердечниками с обмотками. При перемещении якоря под воздействием измеряемой величины индуктивность одной обмотки будет возрастать, а другой — уменьшаться. Такие преобразователи применяются в сочетании с мостовыми измерительными схемами.

Преобразователи с незамкнутой магнитной цепью применяются для измерения сравнительно больших перемещений — порядка 50–100 мм.

Для измерения угла поворота используют трансформаторные преобразователи, состоящие из неподвижного статора и подвижного ротора с обмотками. Статор питается переменным током, поэтому поворот ротора вызовет изменение угла фазового сдвига и значения наводимой в его обмотке ЭДС.

В магнитоупругих преобразователях ферромагнитный сердечник подвергается механическому воздействию, что влечет за собой изменения магнитной проницаемости μ материала магнитопровода, магнитного сопротивления цепи и, соответственно, собственной или взаимной индуктивностей обмоток.

Таким образом, областью применения индуктивных преобразователей является измерение перемещений, а также других, связанных с перемещением, неэлектрических величин (усилий, давлений и т. п.).

Индуктивные преобразователи просты и надежны в эксплуатации, в сравнении с другими преобразователями они имеют довольно мощный выходной сигнал. Их недостатками являются инерционность и влияние преобразователя на исследуемый объект.

15.2.2. Генераторные преобразователи

Наиболее широкое применение среди генераторных преобразователей получили термоэлектрические, индукционные и пьезоэлектрические преобразователи.

Термоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на термоэлектрическом эффекте, применяются для измерения температуры. Этот эффект заключается в следующем: в замкнутой цепи из разнородных проводников, образующих термопару, при разных температурах точек соединения возникает термоЭДС. Если температуру одной точки соединения поддерживать постоянной, то термоЭДС будет пропорциональна температуре другой точки соединения материалов. Эта зависимость и положена в основу работы термоэлектрического преобразователя.

У термопары один конец соединен (рабочий конец), другой — разъединен. Если рабочий конец поместить в точку измерения температуры, то на образовавшихся свободных концах появится термоЭДС, однозначно определяемая температурой рабочего конца (при неизменности температуры свободных концов). Значение термоЭДС можно измерить, например, с помощью магнитоэлектрического, электронного или цифрового милливольтметра.

Для изготовления термопар используют специальные сплавы из благородных металлов: платинородий (10 % родия) — платина, платинородий (30 % родия) — платинородий (6 % родия), из тугоплавких металлов типа вольфрамений (5 % рения) — вольфрамений (20 % рения), а также сплавы хромель (90 % никеля, 10 % хрома) — копель (56 % меди, 44 % никеля) и др.

Термоэлектрические преобразователи обладают довольно высокой чувствительностью, но существенной инерционностью (от 5 с у самых быстродействующих до нескольких минут).

Градуировку термоэлектрических термометров (рис. 15.4) — приборов, использующих термопары для измерения температуры, — производят при температуре свободных концов 0°C . Поскольку при практическом применении этих термометров температура свободных концов обычно отлична от 0°C , необходимо вводить поправку. На рис. 15.4: Тп — термопара, УП — удлинительные провода, СП — соединительные провода, R_y — уравнивающий резистор, МП — масштабный преобразователь, ИМ — измерительный механизм, шкала которого отградуирована в единицах температуры (градусах). С помощью R_y внешнее по отношению к ИМ сопротивление подгоняется до градуировочных значений.

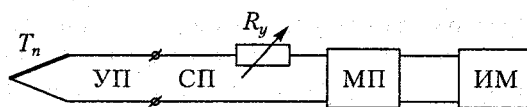


Рис. 15.4. Термоэлектрический термометр

Термопары из благородных металлов позволяют измерять температуры в диапазоне от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $\pm 0,1\%$; диапазоны термопар из тугоплавких металлов и сплава хромель-копель составляют $0\text{--}2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-200\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно при погрешности $\pm 1,0\%$.

Для уменьшения влияния изменения сопротивлений проводов и термопары измерительный механизм (например, электронные или цифровые милливольтметры) должен иметь большое входное сопротивление. Кроме того, в термоэлектрических термометрах применяются автоматические потенциометры, которые повышают точность измерения, практически исключая влияние сопротивлений проводов и термопары. Для исключения влияния температуры свободных концов термопары в цепь включают терморезистор, находящийся в зоне температуры свободных концов. Параметры схемы и терморезистора подбираются таким образом, чтобы при изменениях температуры свободных концов изменялось бы и компенсирующее напряжение, оставляя показания потенциометра неизменными.

Индукционные преобразователи основаны на действии закона электромагнитной индукции, в соответствии с которым при изменении потока сцепления, сцепленного с контуром проводников, в последнем наводится ЭДС, значение которой

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt},$$

где e — значение индуцированной ЭДС; w — число витков контура (катушки); $\frac{d\Phi}{dt}$ — скорость изменения магнитного потока, сцепленного с контуром.

Реализовываться данный принцип действия может двумя путями:

- 1) индуцированная ЭДС наводится в катушке благодаря линейным или угловым перемещениям самой катушки в зазоре постоянного магнита;
- 2) ЭДС наводится в неподвижной катушке при механическом модулировании магнитного потока постоянного магнита, которое осуществляется, например, изменением воздушного зазора в цепи магнитопровода.

Основная область применения индукционных преобразователей — измерение скорости линейных и угловых перемещений. Их используют главным образом в приборах для измерения скорости вращения (тахометрах) и параметров вибраций (акселерометрах). Если выходной сигнал индукционного преобразователя проинтегрировать электрическим интегрирующим устройством, то полученный сигнал будет пропорционален линейному или угловому перемещению. Если выходной сигнал преобразователя продифференцировать с помощью электрического дифференциального устройства, то полученный сигнал будет пропорционален линейному или угловому ускорению. Таким образом, индукционные преобразователи могут быть использованы также для измерения линейных и угловых перемещений и ускорений.

Индукционные преобразователи надежны в работе и обладают высокой чувствительностью при сравнительной простоте конструкции. Основной их недостаток — ограниченный частотный диапазон измеряемых величин.

Пьезоэлектрические преобразователи основаны на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, возникающего в некоторых кристаллических диэлектриках (кварц, титанат бария, сегнетовая соль и др.), называемых пьезоэлектриками, и заключающегося в появлении электрического заряда на поверхности этих материалов под влиянием механических напряжений.

В измерительной технике чаще всего применяют кварц, в котором пьезоэлектрические свойства сочетаются с высокой механической прочностью и хорошими электроизоляционными характеристиками, а также с незначительным влиянием температуры в довольно широких пределах. Кварцевые преобразователи (они имеют вид пластин) вырезают из монокристалла с учетом его строения и направления главных осей: электрической, вдоль которой возникает продольный пьезоэффект, механической, вдоль которой возникает поперечный пьезоэффект, и оптической, механическое воздействие вдоль которой не вызывает пьезоэффекта.

Пьезоэлектрические преобразователи применяются для измерения быстро меняющихся усилий, давлений, вибраций и т. п., что связано с утечкой заряда через сопротивление изоляции и входную цепь измерительного прибора. Вследствие этого пьезоэлектрические преобразователи не используют для статических измерений, а приборы, измеряющие разность потенциалов на преобразователях, должны иметь большое входное сопротивление (порядка 10^{12} – 10^{15} Ом).

Для измерения температур с высокой точностью применяются кварцевые термочувствительные преобразователи. При включении такого преобразователя в резонансный контур частота генерируемых электрических колебаний определяется собственной резонансной частотой механических колебаний пьезочувствительной пластины (обратный пьезоэлектрический эффект), которая может измениться, например, под воздействием температуры и, соответственно, изменит частоту генерируемых электрических колебаний. Измеряя частоту колебаний, пропорциональную температуре, можно измерить температуру. Это реализуется в приборах, называемых кварцевыми термометрами. Чувствительность кварцевых термопреобразователей весьма высока и достигает 200–1000 Гц/К, что позволяет измерять температуру в диапазоне 0–100 °С с погрешностью 0,05–0,005 °С. Рабочий диапазон температур кварцевых термометров составляет от –260 до 500 °С, хотя указанную наименьшую погрешность они имеют лишь в диапазоне 0–100 °С.

Высокая точность кварцевых термометров связана с высокой стабильностью параметров преобразователя и высокими метрологическими характеристиками измерителей частоты. Недостатком является ограниченная взаимозаменяемость, обусловленная разбросом параметров пьезочувствительных пластин.

15.3. Основные разновидности применяемых измерительных схем

Для характеристик электрических приборов, измеряющих неэлектрические величины, важными являются не только качество и параметры измерительных пре-

образователей и измерительных механизмов, но и измерительные схемы, в которые они включены.

При использовании параметрических преобразователей широко применяются мостовые измерительные схемы. Они обеспечивают требуемую точность, позволяют обеспечить высокую чувствительность и имеют возможность компенсировать дополнительную погрешность, возникающую вследствие влияния внешних факторов (температуры, внешних магнитных и электрических полей). Например, увеличить чувствительность измерительных приборов можно применением дифференциальных преобразователей, измерительные элементы которых включаются в смежные плечи мостовой схемы (см. рис. 15.3).

Помимо мостовых схем в некоторых случаях применяют компенсационные и резонансные схемы. Примерами могут служить измерение падения напряжения между подвижным и одним из неподвижных контактов реостатного преобразователя с помощью компенсационной схемы, которая практически не влияет на работу преобразователя, а также измерение выходного параметра емкостного преобразователя резонансным методом.

Выход генераторных преобразователей подключают непосредственно к измерительному механизму или входной цепи усилителя. Поэтому в приборах с генераторными преобразователями измерительные схемы могут приобретать различные свойства. Например, если измерительное устройство имеет большое входное сопротивление (вход усилителя), то выходное сопротивление преобразователя в этом случае значения не имеет. Если измерительное устройство имеет высокую чувствительность к току и работает в сочетании с индукционным преобразователем, то чувствительность всего прибора в целом будет определяться не только чувствительностями этого измерительного устройства и преобразователя, но и их сопротивлениями. Лучшие результаты получаются при сочетании измерительного устройства и преобразователя с высокими чувствительностями и малыми внутренними сопротивлениями (при равенстве сопротивлений будет выполняться условие передачи максимальной мощности).

Часть III

**Техническое
регулирование**

ГЛАВА 16 Обязательные требования к объектам технического регулирования. Цели принятия технических регламентов

16.1. Федеральный закон Российской Федерации «О техническом регулировании». Общие положения

Федеральный закон Российской Федерации (ФЗ) «О техническом регулировании» принят Государственной Думой 15 декабря 2002 г. и вступил в действие с 1 июля 2003 г. Со дня вступления в силу данного ФЗ прекратили свое действие законы РФ «О стандартизации» и «О сертификации продукции и услуг». Под этим следует понимать, что ФЗ «О техническом регулировании» подчиняет себе сферы распространения ранее действовавших законов РФ «О стандартизации» и «О сертификации...» и при этом вносит в эти сферы, которые теперь становятся одной сферой технического регулирования, дополнительные изменения.

Техническое регулирование — правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также в области установления и применения на добровольной основе требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг и правовое регулирование отношений в области оценки соответствия.

В приведенном определении, взятом из ФЗ «О техническом регулировании», следует выделить три области распространения технического регулирования. Во-первых, это область обязательных требований к продукции, которые до 2003 г. устанавливались, как правило, в государственных стандартах (ГОСТ) и назывались обязательными требованиями ГОСТ. В настоящее время обязательные тре-

бования к продукции устанавливаются техническими регламентами. Во-вторых, это область требований к продукции на добровольной основе, которые устанавливаются стандартами (национальными или международными). Ранее «рекомендуемые» требования к продукции также приводились в государственных стандартах (ГОСТ). В-третьих, это регулирование отношений в области оценки соответствия. Понятие «оценка соответствия» имеет более широкий смысл, чем «сертификация продукции и услуг». Сейчас сертификация — одна из форм подтверждения соответствия объектов требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

Техническое регулирование в РФ осуществляется в соответствии со следующими принципами:

- применение единых правил установления требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ и оказанию услуг;
- соответствие технического регулирования уровню развития национальной экономики, развития материально-технической базы, а также уровню научно-технического развития;
- независимость органов по аккредитации, органов по сертификации от изготовителей, продавцов, исполнителей и приобретателей;
- единая система и правила аккредитации;
- единство правил и методов исследований (испытаний) и измерений при проведении процедур обязательной оценки соответствия;
- единство применения требований технических регламентов независимо от видов или особенностей сделок;
- недопустимость ограничения конкуренции при осуществлении аккредитации и сертификации;
- недопустимость совмещения полномочий органа государственного контроля (надзора) и органа по сертификации;
- недопустимость совмещения одним органом полномочий на аккредитацию и сертификацию;
- недопустимость внебюджетного финансирования государственного контроля (надзора) за соблюдением требований технических регламентов.

16.2. Технические регламенты

Новый для нашей страны нормативный документ — технический регламент, устанавливающий обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции, в том числе зданиям, строениям и сооружениям, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации), имеет статус федерального закона, тогда как «обязательные требования ГОСТ», действовавшие до 1 июля 2003 г., утверждались Госстандартом России.

Технический регламент может быть принят одним из четырех способов:

- международным договором Российской Федерации, ратифицированным в установленном порядке;
- федеральным законом;
- указом Президента Российской Федерации;
- постановлением Правительства РФ.

Введение технического регламента в действие указом Президента или постановлением Правительства РФ производится в исключительных случаях при возникновении обстоятельств, приводящих к непосредственной угрозе жизни или здоровью граждан, окружающей среде, жизни или здоровью животных или растений, и в других случаях, когда незамедлительно требуется принятие соответствующего технического регламента. Технический регламент, принятый указом Президента РФ или постановлением Правительства РФ, утрачивает силу после вступления в силу федерального закона о соответствующем техническом регламенте.

Технические регламенты принимаются для достижения следующих целей:

- защиты жизни или здоровья граждан;
- защиты имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;
- охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений;
- предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей.

Принятие технических регламентов в иных целях не допускается.

Технические регламенты (с учетом степени риска причинения вреда) устанавливают минимально необходимые требования, обеспечивающие:

- безопасность всякого рода (безопасность излучения, биологическую безопасность, взрывобезопасность, механическую, пожарную, промышленную, термическую, химическую, электрическую, ядерную и радиационную безопасность);
- электромагнитную совместимость (в части обеспечения безопасности работы приборов и оборудования);
- единство измерений.

Содержание технического регламента должно включать исчерпывающий перечень обязательных требований как к самой продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, так и к терминологии, упаковке, маркировке, а также к правилам и формам оценки соответствия. Эти требования имеют прямое действие на всей территории РФ и могут быть изменены только внесением изменений или дополнений в соответствующий технический регламент. Не включенные в технические регламенты требования не могут носить обязательный характер.

Действие технических регламентов распространяется на всю продукцию данного рода, имеющую хождение в стране, независимо от страны или места ее происхождения. Для некоторых видов продукции в зависимости от места ее происхождения, учитывая климатические и географические особенности, технические регламенты могут содержать дополнительные специальные требования (каран-

тинные правила, ограничения ввоза, особые процедуры испытания продукции, инспекционный контроль и т. д.).

В Российской Федерации действуют:

- общие технические регламенты;
- специальные технические регламенты.

Требования к конкретным видам продукции определяются совокупностью требований общих и специальных технических регламентов.

Требования общего технического регламента обязательны для применения и соблюдения в отношении любых видов продукции. Эти требования, относящиеся к любой продукции, включают в себя безопасность всякого рода и электромагнитную совместимость.

Специальные технические регламенты учитывают особенности отдельных видов продукции и устанавливают требования, которые не обеспечиваются требованиями общих технических регламентов.

Процесс принятия технических регламентов должен быть завершен за семь лет с момента вступления в силу ФЗ «О техническом регулировании» (1 июля 2003 г. — 1 июля 2010 г.). Впредь до вступления в силу соответствующих технических регламентов на продукцию продолжают действовать обязательные требования, установленные нормативными правовыми актами РФ и нормативными документами федеральных органов исполнительной власти (обязательные требования ГОСТ), но только в части целей, закрепленных для технических регламентов, а именно: защита жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного и муниципального имущества, охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений, предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей.

Всего должно быть принято около 2000 технических регламентов.

16.3. Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов

Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов пришел на смену действовавшему до 1 июля 2003 г. государственному контролю и надзору за соблюдением обязательных требований государственных стандартов и за сертифицированной продукцией. Согласно ФЗ «О техническом регулировании», национальные стандарты перешли в область «добровольного многократного использования», и обязательные требования к продукции устанавливаются только техническими регламентами, имеющими статус федерального закона.

Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов осуществляется:

- федеральными органами исполнительной власти;
- органами исполнительной власти субъектов РФ;

□ подведомственными им государственными учреждениями, уполномоченными на проведение контроля (надзора).

Все эти учреждения и органы исполнительной власти являются органами государственного контроля (надзора). Непосредственно государственный контроль (надзор) осуществляют должностные лица органов государственного контроля (надзора).

Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов осуществляется исключительно в части соблюдения требований соответствующих технических регламентов и исключительно на стадии обращения продукции.

Органы государственного контроля (надзора) имеют право:

- требовать от изготовителя (а также продавца или лица, представляющего иностранного изготовителя) предъявления декларации о соответствии или сертификата соответствия или их копий, если применение копий предусмотрено техническим регламентом;
- осуществлять мероприятия по государственному контролю (надзору) в соответствии с законодательством РФ;
- выдавать предписания об устранении нарушений требований технических регламентов;
- принимать решения о запрете передачи продукции, а также о приостановлении производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, если иными мерами невозможно устранить нарушения требований технических регламентов;
- приостановить или прекратить действие декларации о соответствии или сертификата соответствия;
- привлекать изготовителя (исполнителя) к ответственности;
- принимать иные меры, предусмотренные законодательством РФ, в целях недопущения вреда.

Органы государственного контроля (надзора) и их должностные лица несут ответственность за ненадлежащее исполнение своих служебных обязанностей в соответствии с законодательством РФ.

Изготовитель (исполнитель, продавец или лицо, представляющее иностранного изготовителя) несет ответственность:

- за нарушение требований технических регламентов;
- за неисполнение предписаний и решений органа государственного контроля (надзора);
- за вред, причиненный другим лицам, их имуществу и окружающей среде.

Виновник причиненного вреда обязан возместить причиненный вред и принять меры для недопущения причинения вреда в будущем. Спорные вопросы при невыполнении предписаний или программы мероприятий по предотвращению причинения вреда решаются в судебном порядке. При этом орган государственного контроля (надзора) имеет право требовать в суде принудительного отзыва продукции.

16.4. Переходные положения

Федеральный закон «О техническом регулировании» вступил в силу с 1 июля 2003 г., но процесс принятия технических регламентов, содержащих обязательные требования к продукции, должен растянуться на семь лет, то есть до 1 июля 2010 г. В связи с этим со дня вступления в силу ФЗ «О техническом регулировании» и впредь до принятия соответствующих технических регламентов продолжают действовать обязательные требования к продукции, установленные в нормативных документах РФ (в первую очередь государственных стандартах), но только в части:

- защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;
- охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений;
- предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей.

Со дня вступления в силу ФЗ «О техническом регулировании» обязательное подтверждение соответствия осуществляется только в отношении продукции, выпущенной в обращение на территории РФ.

До вступления в силу соответствующих технических регламентов:

- Правительством РФ определяется и ежегодно дополняется перечень видов продукции, в отношении которых обязательная сертификация заменяется декларированием соответствия;
- схема декларирования соответствия на основе собственных доказательств допускается только для изготовителей и лиц, представляющих иностранного изготовителя;
- продолжают действовать федеральные законы «О карантине растений», «О ветеринарии», «Об использовании атомной энергии», «О радиационной безопасности населения».

По истечении срока в семь лет, установленного для принятия технических регламентов, прекращают свое действие обязательные требования к продукции, в отношении которых технические регламенты не были приняты.

ГЛАВА 17 Стандартизация

17.1. Сущность стандартизации

На современном этапе научно-технического развития стандартизация определяет закономерности, принципы, методы и формы целесообразного, коллективно-го и оптимального упорядочения всех видов деятельности человека. Ситуации, когда из ряда существующих решений одной и той же задачи выбирается одно оптимальное и узаконивается, встречается в различных областях человеческой деятельности.

Стандартизация связана с такими понятиями, как объект стандартизации и область стандартизации.

Объект стандартизации — продукция, работа, процесс, услуги, подлежащие или подвергшиеся стандартизации. Стандартизации может подлежать либо объект в целом, либо его отдельные составляющие (характеристики). *Область стандартизации* — совокупность взаимосвязанных объектов стандартизации. Например, приборостроение является областью стандартизации, а объектами стандартизации могут быть типы приборов, технологические процессы, безопасность в приборостроении и т. д.

Разносторонняя деятельность человека привела к необходимости отбора методов, наиболее пригодных для решения той или иной задачи, к закреплению и передаче этих методов другим поколениям. Эта практика легла в основу понятия «стандартизация».

Методы стандартизации, возникшие из потребностей социальной жизни, целенаправленно стали применяться в технике. Неупорядоченная, стихийная стандартизация стала превращаться в упорядоченную стандартизацию: в рамках предприятия (организации), государства, в межгосударственном масштабе.

Рассмотрим пример типовой задачи, решаемой с помощью стандартизации. Необходимо определить удельное сопротивление какого-либо сплава. Методов определения много, и каждый дает свой результат. Результаты сравнивают и выбирают тот метод, который дает воспроизводимые результаты с необходимой точностью при минимальных экономических затратах. Аналогичные примеры можно привести для различных отраслей деятельности, при этом будет наблюдаться один и тот же процесс. Из ряда возможных решений отбирается (разрабатывается) одно, оптимальное, и его узаконивают в виде стандарта.

Типовая задача может быть представлена в общем виде. Существует или возможно множество предметов или процессов: A, B, C, D, E, F, \dots . Некоторые из них в ходе деятельности неоднократно повторяются: $A, B, C, B, D, E, B, F, \dots$. Среди повторяющихся процессов имеются варианты:

$$A, B_1, C, B_2, D, E, B_3, F, \dots \quad (17.1)$$

Из этих вариантов, используя научный анализ, отбирают, а иногда и создают, наилучшие, оптимальные, которые узаконивают в виде стандартов:

$$B_1, B_2, B_3 \rightarrow B_2 = \text{opt} \rightarrow \text{const.}$$

Из рассмотрения типовой задачи можно сделать вывод: стандартизации подлежат предметы и процессы (B_{1-n}), повторяющиеся в виде вариантов (или имеющие такую возможность).

Стандартизации не подлежат:

- неповторяющаяся задача (предметы или процессы);
- повторяющаяся, но не имеющая вариантов задача (предметы или процессы).

Ряд (17.1) может иметь вид

$$A, B_1, C_{1-n}, B_2, D, E_{1-n}, B_3, F, \dots$$

где C_{1-n} и E_{1-n} являются задачами неповторяющимися, но для которых возможна разработка вариантов (хозяйственный план, решение командира корабля и т. д.). В этом случае на научной основе выбирается оптимальный вариант, в соответствии с которым и работают. Возможно узаконение этого варианта, но в документе разового пользования, — например, план предприятия на определенный год, приказ командира для данной обстановки и т. п., то есть производятся действия

$$C_{1-n} \rightarrow C_5 = \text{opt};$$

$$E_{1-n} \rightarrow E_3 = \text{opt}.$$

В этом случае нет стадии const, которая характерна для стандартизации.

На рис. 17.1 показано решение типовой задачи стандартизации и решение для единичной ситуации.

Решение типовой задачи происходит в следующей последовательности: имеется объект стандартизации, повторяющийся в виде вариантов; из вариантов выбирается один; выбранный вариант должен быть оптимальным; поиск оптимального варианта производится на научной основе; выбранный вариант узаконивается в виде нормативного документа (НД) по стандартизации; разработка и оформление НД производится по регламентированному порядку.

Предметом стандартизации является процесс упорядочения любой деятельности на основе решения повторяющихся задач с различными вариантами исполнения. Упорядочение связано с приведением знаний и объектов в систему, начинается с накопления определенной информации и продолжается до замены данной системы новой, более общей или более строгой. Все сохраняемые технические решения, как правило, имеют значительные достоинства и определенную конкурентоспособность. Кроме того, в технике значительную роль имеет фактор преемственности, требующий согласования новых изделий с ранее выпускавшимися изделиями.

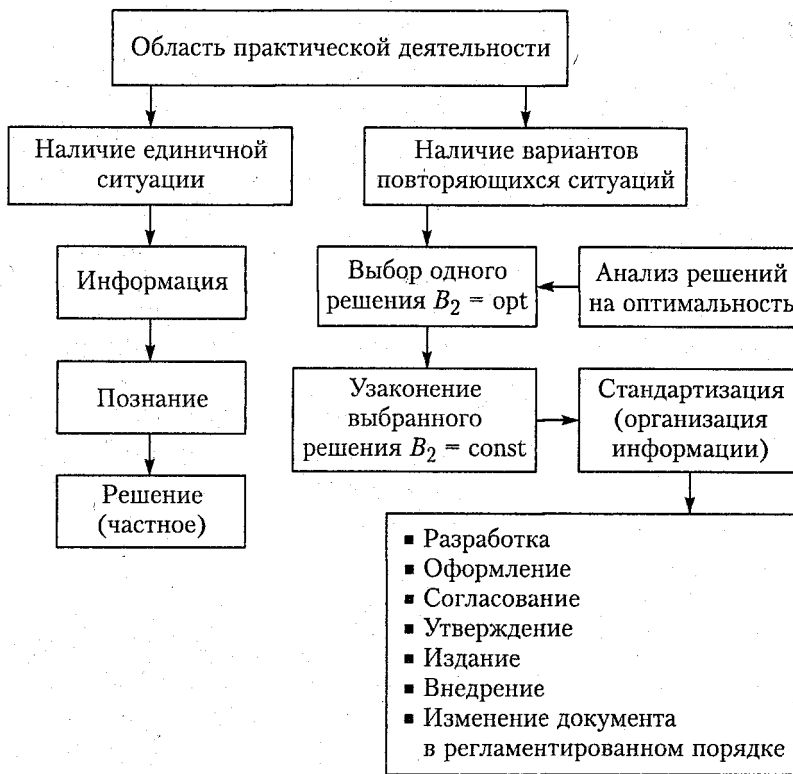


Рис. 17.1. Решение типовой задачи стандартизации и решение для единичной ситуации

Стандартизацию, в свою очередь, можно рассматривать как одну из составных частей более общей науки об управлении — кибернетики, как один из методов переработки информации с целью нахождения оптимального обязательного (рекомендательного) решения на определенный период времени. Основным признаком объекта, на который следует разрабатывать НД по стандартизации, является перспективность его многократного применения.

Таким образом, стандартизация — это деятельность, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления положений для всеобщего и многократного использования в отношении реально существующих или потенциальных задач.

Работы по стандартизации в России осуществляются на основании федерального закона «О техническом регулировании». В соответствии со ст. 47 этого закона утратил силу закон Российской Федерации от 10 июня 1993 г. № 5154-1 «О стандартизации».

Согласно ст. 2 федерального закона «О техническом регулировании», *стандартизация* — деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного и многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышение конкурентоспособности продукции, работ, услуг.

17.2. Цели и принципы стандартизации

Общей целью стандартизации является защита интересов потребителей и государства по вопросам качества продукции, процессов и услуг посредством разработки и применения нормативных документов по стандартизации. В соответствии с этим перед стандартизацией стоит несколько целей. К числу основных целей относятся:

- повышение уровня безопасности жизни и здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества, экологической безопасности, безопасности жизни или здоровья животных и растений и содействия соблюдению требований технических регламентов;
- повышение уровня безопасности объектов с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;
- обеспечение научно-технического прогресса;
- повышение конкурентоспособности продукции, работ, услуг;
- рациональное использование ресурсов;
- обеспечение технической и информационной совместимости;
- обеспечение сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-статистических данных;
- обеспечение взаимозаменяемости продукции.

Стандартизация осуществляется в соответствии с принципами:

- добровольного применения стандартов;
- максимального учета при разработке стандартов законных интересов заинтересованных лиц;
- применения международного стандарта как основы для разработки национального стандарта, за исключением случаев, когда такое применение признано невозможным.

Учет законных интересов заинтересованных лиц основывается на сбалансированности интересов сторон, разрабатывающих, изготавливающих, предоставляющих и потребляющих продукцию (услугу). Участники стандартизации, исходя из возможностей изготовителя продукции и исполнителя услуги, с одной стороны, и требований потребителя — с другой, должны найти консенсус, который понимается как общее согласие, то есть как отсутствие возражений по существенным вопросам у большинства заинтересованных сторон, стремление учесть мнение всех сторон и сблизить несовпадающие точки зрения. Консенсус не предполагает полного единодушия.

Стандартизация осуществляется с системных позиций. Принцип системности в стандартизации предполагает рассмотрение каждого объекта как части более сложной системы. Системный подход подразумевает рассмотрение элементов, образующих систему, с учетом взаимосвязей между ними, что позволяет разрабатывать систему взаимно увязанных требований к собственно объекту стандартизации и к основным элементам, составляющим этот объект.

Важным моментом при разработке стандартов является комплексность. Комплексность предполагает совместимость всех элементов сложной системы. Комплексами НД по стандартизации объединяют требования к материалам, полуфабрикатам, деталям, комплектующим и изготавливаемым из них сложным изделиям, машинам, приборам. В качестве комплекса изделий можно рассмотреть авиатранспорт, в который входят летательные аппараты, навигационные системы, аэродромные сооружения, системы обеспечения горюче-смазочными материалами и многое другое. Известным сложным изделием является автомобиль, НД на который приходится увязывать со стандартами на металлы и сплавы, измерительные приборы, с экологическими нормами, правилами дорожного движения, юридическими нормами и т. д. В задачу комплексной стандартизации входит обеспечение преемственности вновь назначаемых норм со старыми нормами и увязывание разрабатываемых стандартов с действующими.

Достижение одной из целей стандартизации — обеспечения научно-технического прогресса — невозможно без динамичности и опережающего развития стандартов. Научно-технический прогресс вносит изменения в технику и процессы управления, поэтому стандарты должны быть адаптированными к происходящим переменам. Динамичность обеспечивается внесением изменений в стандарты и отменой НД. Опережающее развитие обеспечивается внесением в стандарт перспективных требований и норм, учетом на этапе разработки НД требований международных и региональных стандартов.

Применение стандартов должно давать экономический или социальный эффект. Непосредственный экономический эффект дают стандарты, ведущие к экономии ресурсов, повышению надежности, технической и информационной совместимости. Стандарты, направленные на обеспечение безопасности жизни и здоровья людей, окружающей среды, дают социальный эффект.

17.3. Международная и межгосударственная стандартизация

Основы существующей в России системы стандартизации были заложены во время проведения работ по стандартизации в рамках бывшего СССР. В целях обеспечения преемственности, технической и информационной совместимости, увязывания вновь разрабатываемых стандартов с действующими, представители государств бывшего СССР 13 марта 1992 г. подписали Соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, в котором были заложены основы системы межгосударственной стандартизации. Согласно этому документу, стандарты, действовавшие в рамках СССР в качестве государственных (национальных) стандартов, были признаны межгосударственными стандартами, эталонная база бывшего СССР рассматривалась как совместное достояние, устанавливалась необходимость двусторонних соглашений для взаимного признания систем стандартизации, сертификации и метрологии. До 1992 г. аббревиатура ГОСТ расшифровывалась как «государственный стандарт Союза ССР». Учитывая, что эта аббревиатура известна во всем мире, представители государств

СНГ решили сохранить ее для вновь разрабатываемых межгосударственных стандартов.

На межправительственном уровне был создан Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). Членами МГС являются руководители национальных организаций по стандартизации, метрологии и сертификации государств — участников Соглашения (12 государств Содружества). Основной рабочий орган МГС — Бюро стандартов, метрологии и сертификации, расположенное в Минске. Рабочими органами МГС являются межгосударственные технические комитеты по стандартизации (МТК), которые создаются для разработки межгосударственных стандартов и проведения других конкретных работ в области межгосударственной стандартизации.

Межгосударственные стандарты и изменения к ним принимаются по решению МГС, заседания которого проходят два раза в год. В качестве проекта ГОСТа национальный орган по стандартизации какого-либо государства может предложить действующий национальный (государственный) стандарт государства — участника Соглашения.

В результате деятельности МГС сохранены существовавшие в СССР фонды НД и эталонная база. Учитывая большую работу, проводимую МГС в рамках СНГ, Международная организация по стандартизации (ISO) признала МГС в качестве международной региональной организации по стандартизации. Деятельность МГС в значительной степени способствует ускорению процесса вступления государств — участников Содружества во Всемирную торговую организацию (ВТО) и ISO.

Важным условием для успешного осуществления торгового, экономического и научно-технического сотрудничества различных стран является развитие международной стандартизации. В настоящее время значение международной стандартизации трудно переоценить. Основными задачами международного научно-технического сотрудничества в области стандартизации являются:

- обеспечение взаимозаменяемости элементов сложной продукции;
- сближение уровня качества товаров, производимых в разных странах;
- содействие взаимному обмену научно-технической информацией;
- ускорение научно-технического прогресса участников международных организаций;
- содействие международной торговле.

Международное сотрудничество осуществляется по линии международных и региональных организаций по стандартизации.

Наиболее крупными организациями по стандартизации являются Международная организация по стандартизации и Международная электротехническая комиссия (МЭК).

Неправительственная Международная организация по стандартизации начала свою официальную деятельность в 1947 г. ISO занимается вопросами стандартизации во всех областях, кроме электроники, электротехники, связи и приборостроения, которые относятся к компетенции МЭК. Высшим руководящим органом ISO является Генеральная ассамблея, состоящая из официальных лиц

и представителей всех категорий членов ISO, созываемая не реже одного раза в три года. Генеральная ассамблея определяет общую политику организации, решает основные вопросы ее деятельности. К официальным лицам ISO относятся: президент, вице-президент, казначей, генеральный секретарь. В ISO существуют три категории членства: комитет-член (полноправный член ISO), член-корреспондент, наблюдатель. Комитетами-членами ISO являются национальные организации по стандартизации, согласные с требованиями Устава и Правил ISO. От каждой страны, независимо от числа действующих в ней организаций по стандартизации, в члены ISO может быть принята только одна национальная организация. Страны, не имеющие национальной организации по стандартизации (чаще всего развивающиеся), относятся к категории членов-корреспондентов. Члены-корреспонденты имеют право на участие в заседаниях технических комитетов (ТК) без регистрации и на получение материалов информационного характера.

ISO имеет широкие деловые контакты со специализированными агентствами ООН, работающими в смежных направлениях, и с МЭК. Стандарты ISO не имеют статуса обязательных для всех стран-участниц. Каждая страна мира вправе применять или не применять их. Решение вопроса о применении стандартов ISO в основном связано со степенью участия страны в международном разделении труда и состоянием ее внешней торговли. В российской системе стандартизации нашли применение около половины стандартов ISO. Вопросы применения международных стандартов в отечественной практике рассматриваются далее.

Стандарты ISO отличаются тем, что небольшая часть из них включает требования к конкретной продукции. Основное число НД касается вопросов безопасности, взаимозаменяемости, технической совместимости, методов испытаний продукции, общих методических вопросов. Предполагается, что технические требования к продукции устанавливаются в процессе договорных отношений.

В период между сессиями Генеральной ассамблеи работой ISO руководит Совет, в который входят представители национальных организаций по стандартизации. При Совете создан ряд специальных комитетов для работы по отдельным направлениям деятельности ISO. Проекты международных стандартов разрабатываются рабочими группами (РГ), действующими в рамках ТК. Количество ТК не ограничено, новый ТК может быть создан по предложению одного комитета-члена при поддержке не менее пяти других комитетов-членов. Если сфера деятельности данного ТК охватывает целую отрасль, в его рамках создаются более узкоспециализированные подкомитеты (ПК). ТК подразделяются на общетехнические и комитеты, работающие в конкретных областях техники

В рамках работы комитетов:

- оказывается методическая и информационная помощь Совету ISO по принципам и методике разработки международных стандартов, изучаются основополагающие принципы стандартизации, организуются семинары по применению международных стандартов;
- проводится подготовка предложений по планированию работы ISO, по организации и координации технических сторон работы, по созданию и роспуску ТК, по определению области стандартизации, которой должны заниматься конкретные ТК;

- изучаются вопросы, связанные с подтверждением соответствия продукции, услуг, процессов и систем качества требованиям стандартов. Оказывается содействие взаимному признанию и принятию национальных и региональных систем сертификации, а также использованию международных стандартов в области испытаний и подтверждения соответствия;
- проводится работа по вопросам научно-технической информации;
- изучаются запросы развивающихся стран в области стандартизации и разрабатываются рекомендации по содействию этим странам в данной области;
- изучаются вопросы обеспечения интересов потребителей и возможности содействия этому через стандартизацию, обобщается опыт участия потребителей в создании стандартов и составляются программы по обучению потребителей в области стандартизации и доведению до них необходимой информации о международных стандартах;
- разрабатываются руководства по вопросам, касающимся стандартных образцов, координируется деятельность ISO по стандартным образцам с международными метрологическими организациями (в первую очередь с МОЗМ — Международной организацией законодательной метрологии).

Международная электротехническая комиссия (МЭК) была создана в 1906 г. на международной конференции, в которой участвовали 13 стран. Разновременность образования и разная направленность МЭК и ISO определили факт параллельного существования этих двух международных организаций. Между МЭК и ISO заключено соглашение, которое, с одной стороны, направлено на разграничение сфер деятельности, а с другой — на координацию технической деятельности.

Основная цель МЭК — содействие международному сотрудничеству по стандартизации и смежным с ней проблемам в области электротехники и радиотехники путем разработки международных стандартов и других документов. Международные стандарты МЭК можно разделить на два вида: общетехнические, которые носят межотраслевой характер, и стандарты, содержащие технические требования к конкретной продукции. К первому виду относятся НД на терминологию, стандартные напряжения и частоты, различные виды испытаний и пр. Вторым видом стандартов охватывается большой диапазон электроприборов — от бытовых до устройств спутниковой связи. Основные объекты стандартизации МЭК:

- материалы для электротехнической промышленности;
- электротехническое оборудование;
- электроэнергетическое оборудование;
- изделия электронной промышленности;
- электронное оборудование бытового и производственного назначения;
- электроинструменты;
- оборудование для спутников связи;
- терминология.

Придавая большое значение разработке международных стандартов на безопасность, ISO совместно с МЭК приняли Руководство ISO/МЭК «Общие тре-

бования к изложению вопросов безопасности при подготовке стандартов». Главной целью стандартизации в области безопасности является поиск защиты от различных видов опасностей. В сферу деятельности МЭК входят: травмоопасность, опасность поражения током, техническая опасность, пожароопасность, взрывоопасность, химическая опасность, биологическая опасность, опасность излучений оборудования (звуковых, инфракрасных, радиочастотных, ультрафиолетовых, ионизирующих, радиационных и др.).

В составе МЭК особый статус имеет Международный комитет по радиопомехам, который занимается стандартизацией методов измерения радиопомех, излучаемых электронными и электротехническими приборами. Допустимые уровни таких помех являются объектами прямого технического законодательства практически всех развитых стран.

Высшим руководящим органом МЭК является Совет, в который входят национальные комитеты стран — членов МЭК. Структура технических органов МЭК, непосредственно разрабатывающих международные стандарты, аналогична структуре ISO. Это технические комитеты, подкомитеты и рабочие группы. В работе каждого ТК участвуют 15–25 стран.

Наряду со стандартизацией МЭК занимается сертификацией изделий по своему профилю деятельности.

Помимо ISO и МЭК в работах по международной стандартизации участвуют и другие организации:

- Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН), известная своей деятельностью в области стандартизации требований безопасности транспортных средств;
- Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО);
- Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), имеющая консультативный статус в ISO и принимающая участие в работе более чем 40 ТК;
- международные организации при ООН, участвующие в работах по стандартизации в пределах своей компетентности, — ЮНЕСКО, МАГАТЭ и пр.;
- Международная торговая палата (МТП);
- комиссия «Кодекс Алиментариус» по разработке стандартов на продовольственные товары, действующая в рамках Объединенного комитета экспертов ФАО/ВОЗ.

В мире действуют также региональные организации по стандартизации. Типичный пример региональной стандартизации — межгосударственная стандартизация в рамках стран СНГ. Примеры других региональных организаций по стандартизации:

- Европейский комитет по стандартизации (СЕН), основной целью которого является содействие развитию торговли товарами и услугами путем разработки европейских стандартов (EN);
- Европейский комитет по стандартизации в электротехнике (СЕНЭЛЕК), основная цель комитета — разработка стандартов на электротехническую продукцию. Стандарты СЕНЭЛЕК рассматриваются как необходимое средство для создания единого европейского рынка;

- Европейский институт по стандартизации в области электросвязи (ЕТСИ), создание которого было вызвано необходимостью гармонизации стандартов в области электросвязи, что является актуальным для развития электросетей, промышленности и новейших технологий;
- Межскандинавская организация по стандартизации (ИНСТА). Основной задачей организации является содействие созданию согласованных национальных стандартов скандинавских государств;
- Международная ассоциация стран Юго-Восточной Азии (АСЕАН);
- Панамериканский комитет стандартов (КОПАНТ), созданный для устранения технических барьеров в региональной торговле.

17.4. Документы в области стандартизации

Согласно ст. 13 закона «О техническом регулировании», к документам в области стандартизации, используемым на территории Российской Федерации, относятся:

- национальные стандарты;
- правила стандартизации, нормы и рекомендации в области стандартизации;
- применяемые в установленном порядке классификации, общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации;
- стандарты организаций.

Согласно ст. 2 упомянутого закона, *стандарт* — документ, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг. Стандарт также может содержать требования к терминологии, символике, упаковке, маркировке или этикеткам и правилам их нанесения.

Постановление Госстандарта России от 27 июня 2003 г. № 63 признало национальными стандартами действующие государственные и межгосударственные стандарты, введенные в действие до 1 июля 2003 г. для применения в Российской Федерации. В соответствии с этим же постановлением до вступления в силу вновь разработанных соответствующих правил, норм и рекомендаций по стандартизации признано целесообразным сохранить для действующих государственных и межгосударственных стандартов и разрабатываемых национальных стандартов условные обозначения «ГОСТ» и «ГОСТ Р». Таким образом, в течение переходного периода на территории РФ будут функционировать как стандарты, разработанные в рамках старой системы (до вступления в силу закона «О техническом регулировании»), так и стандарты, разработанные в рамках новой системы. Поэтому в настоящее время используются следующие понятия.

Нормативный документ — документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.

Термин «нормативный документ» является родовым и охватывает такие понятия, как стандарты и иные документы по стандартизации — правила, рекомендации, регламенты, общеевропейские классификаторы.

Стандарт научно-технического, инженерного общества (СТО) — стандарт, принятый научно-техническим, инженерным обществом или другим общественным объединением.

Правила (ПР) — документ в области стандартизации, устанавливающий обязательные для применения организационно-технические и/или общетехнические положения, порядки (правила, процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ, а также обязательные требования к оформлению результатов этих работ.

Рекомендации (Р) — документ в области стандартизации, содержащий добровольные для применения организационно-технические и/или общетехнические положения, порядки (правила, процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ, а также рекомендуемые правила оформления результатов этих работ.

Стандарт отрасли (ОСТ) — стандарт, принятый государственным органом управления в пределах его компетенции. В настоящее время понятие отрасли исчезает в сфере управления экономикой РФ, но в ряде важных сфер деятельности требования ОСТ необходимо учитывать.

Стандарт предприятия (СТП) — стандарт, утвержденный предприятием и применяемый (соблюдаемый) в основном на данном предприятии.

Стандарты организаций (понятие введено в законе «О техническом регулировании») — стандарты организаций, в том числе коммерческих, общественных, научных организаций, саморегулируемых организаций, объединений юридических лиц, разрабатываемые и утверждаемые ими самостоятельно исходя из необходимости их применения.

Комплекс стандартов — совокупность взаимосвязанных стандартов, объединенных общей целевой направленностью и устанавливающих согласованные требования к взаимосвязанным объектам стандартизации.

Общероссийский классификатор технико-экономической и социальной информации (ОКТЭСИ) — официальный документ, представляющий собой систематизированный свод наименований и кодов классификационных группировок и/или объектов классификации в области технико-экономической и социальной информации. Согласно ст. 15 федерального закона «О техническом регулировании», ОКТЭСИ — нормативные документы, распределяющие технико-экономическую и социальную информацию в соответствии с ее классификацией (классами, группами, видами и др.) и являющиеся обязательными для применения при создании государственных информационных систем и информационных ресурсов и межведомственном обмене информацией.

Для того чтобы выпускаемые изделия обладали необходимыми потребителю свойствами, необходимо нормировать выходные характеристики этих изделий. Назначение норм состоит в наложении некоторых ограничений на параметры изделия.

Параметр — величина, характеризующая какое-либо свойство изделия. Параметры определяют техническую характеристику изделий с точки зрения производительности, основных размеров, конструкции. Параметры в стандартах обычно фиксируются в виде параметрических рядов.

Параметрический ряд — последовательный ряд числовых значений параметров, построенный на основе принятой системы градации. Закономерное построе-

ние параметров стандартизуемых объектов осуществляется на основе предпочтительных чисел и их рядов. В основу параметрических рядов объектов стандартизации могут быть положены их размер, мощность, производительность, грузоподъемность и др.

Процесс назначения требований к объектам и их параметрам называют нормированием. В наиболее широком смысле стандартом можно считать любое нормирующее предписание (например, рецепт приготовления салата или пирога). В общепринятом смысле стандарт является НД, который утвержден компетентной организацией в установленном порядке.

17.5. Национальная система стандартизации

Национальные стандарты и общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации, в том числе правила их разработки и применения, представляют собой *национальную систему стандартизации*.

В зависимости от назначения и содержания выделяют следующие виды стандартов:

- основополагающие;
- на продукцию и услуги;
- на работы (процессы);
- на методы контроля.

Основополагающий стандарт — нормативный документ, имеющий широкую область распространения и содержащий общие положения для определенной области.

Основополагающие стандарты в широком смысле охватывают объекты межотраслевого значения: к ним можно отнести систему государственной стандартизации, систему конструкторской документации, термины межотраслевого значения. В узком смысле основополагающий стандарт определяет общие положения в общей цепочке стандартов конкретной системы.

Основополагающие стандарты включают основополагающие организационно-методические стандарты и основополагающие общетехнические стандарты. Основополагающие организационно-методические стандарты устанавливают общие организационно-методические положения для определенной области деятельности (например, ГОСТ Р 1.0 «ГСС РФ. Порядок разработки государственных стандартов»). Основополагающие общетехнические стандарты устанавливают общетехнические требования, нормы и правила, обеспечивающие взаимопонимание, техническое единство и взаимосвязь различных областей науки, техники и производства в процессах создания и использования продукции (научно-технические термины, условные обозначения различных объектов стандартизации, требования к построению и изложению документации различных видов и т. п.).

Стандарты на продукцию (услугу) устанавливают требования к группам однородной продукции (услуги) или конкретной продукции (услуге). Под однородной продукцией понимается совокупность продукции, характеризующейся общностью назначения, области применения, конструктивно-технологического

решения, номенклатуры основных показателей качества (велосипеды, швейные изделия, консервы). Стандарты на продукцию (услугу) в общем случае включают следующие разделы: классификация; основные параметры и/или размеры; общие технические требования; правила приемки; маркировка; упаковка; транспортирование и хранение. По группам однородной продукции могут разрабатываться стандарты узкого назначения: стандарты правил приемки, стандарты правил маркировки и др.

Стандарты на работы (процессы) устанавливают требования к выполнению различного рода работ на отдельных этапах жизненного цикла продукции (услуги). Цель разработки подобных стандартов — обеспечение технического единства и оптимальности при разработке, изготовлении, хранении, транспортировании, эксплуатации и утилизации продукции. Стандарты на работы (процессы) могут устанавливать требования к технологическим операциям, имеющим самостоятельное значение, а также к совокупности последовательно выполняемых технологических операций. Объектами стандартов на процессы являются, в частности:

- методы автоматизированного проектирования продукции и информационного обслуживания;
- методы блочно-модульного конструирования;
- принципиальные технологические схемы изготовления продукции и др.

Стандарты на работы (процессы) должны содержать требования к безопасности для жизни и здоровья населения и охраны окружающей среды при проведении технологических операций. На современном этапе большое значение приобретают стандарты на процессы управления в рамках систем обеспечения качества продукции (услуг): управление документацией, закупками, подготовкой кадров и т. п.

Стандарты на методы контроля (испытания, измерений, анализа) в первую очередь предназначены для обеспечения всесторонней проверки всех обязательных требований к качеству продукции (услуги). Устанавливаемые в стандартах методы контроля должны быть объективными, четко сформулированными и должны обеспечивать воспроизводимые результаты. Выполнение этих требований в значительной степени зависит от наличия в стандарте необходимых сведений о точности измерений. С учетом специфики проведения испытаний и контроля в стандартах устанавливаются:

- средства испытаний (контроля) и вспомогательные устройства;
- порядок подготовки к проведению испытаний (контроля);
- порядок проведения испытаний (контроля);
- правила обработки результатов испытаний (контроля);
- правила оформления результатов испытаний (контроля);
- допустимая погрешность испытаний (контроля).

В стандартах на методы контроля устанавливаются методы контроля как одного показателя нескольких групп однородной продукции, так и комплекса показателей групп однородной продукции.

Практика обязательной сертификации вызвала необходимость разработки стандартов смешанного вида — стандартов на продукцию и методы контроля, в частности стандартов на требования к безопасности продукции (услуги) и методы контроля безопасности.

Статус стандарта, зависящий от сферы действия, называется категорией стандарта. Далее рассмотрены особенности отдельных категорий стандартов.

Государственный стандарт Российской Федерации (ГОСТ Р) — стандарт, принятый Государственным комитетом Российской Федерации по стандартизации и метрологии (Госстандартом России). В области строительства ГОСТ Р принимается Госстроем России.

Государственные стандарты РФ распространяются на субъекты хозяйственной деятельности независимо от форм собственности и подчиненности, а также на граждан, занимающихся индивидуальной деятельностью. К объектам государственных стандартов РФ относят:

- организационно-методические и общетехнические объекты межотраслевого применения;
- продукцию, работы и услуги, имеющие межотраслевое значение.

При стандартизации организационно-методических и общетехнических объектов устанавливаются положения, обеспечивающие техническое единство при разработке, производстве, эксплуатации продукции и оказании услуг, например: организация работ по стандартизации, сертификации; разработка и постановка продукции на производство; правила оформления технической, управленческой, информационно-библиографической документации; общие правила обеспечения качества продукции; типоразмерные ряды и типовые конструкции; метрологические и другие общетехнические правила и нормы.

При стандартизации продукции (услуг) в государственные стандарты включают обязательные требования к качеству продукции (услуги), обеспечивающие безопасность для жизни, здоровья и имущества потребителя; охрану окружающей среды, совместимость и взаимозаменяемость; методы контроля соответствия обязательным требованиям; методы маркировки как средство информации о выполнении обязательных требований и правилах безопасного использования продукции.

Обозначение государственного стандарта состоит из индекса (ГОСТ Р), регистрационного номера и отделенных тире двух последних цифр, обозначающих год принятия (ГОСТ Р xxxx—xx). В обозначении государственных стандартов, входящих в комплекс (систему) стандартов, в регистрационном номере первые цифры с точкой определяют шифр комплекса государственных стандартов.

Стандарты отраслей (ОСТ) могут разрабатываться и приниматься государственными органами управления в пределах их компетенции применительно к продукции, работам и услугам отраслевого значения. Компетенция указанных органов определяется положениями о них. Например, положением о Министерстве путей сообщения РФ предусмотрено утверждение единых НД, в том числе ОСТ, по технической эксплуатации железных дорог и условиям перевозок, направленных на обеспечение безопасности движения поездов и охраны труда.

Стандарты отраслей (как и государственные стандарты) разрабатывают для двух видов объектов: организационно-технических и общетехнических объек-

тов, а также продукции, процессов и услуг. Объекты ОСТ имеют отраслевое значение.

Стандарты отраслей разрабатываются в случае отсутствия государственных стандартов или при установлении более высоких требований, чем требования государственных стандартов. Требования стандартов отраслей не должны противоречить обязательным требованиям государственных стандартов.

Примерами продукции отраслевого значения как объекта ОСТ являются: коробки картонные для рыбной продукции (картонные коробки вообще являются объектами ГОСТ); рабочая обувь для работников мясомолочных предприятий (тогда как обувь кожаная и резиновая является объектом ГОСТ).

Обозначение стандарта отрасли состоит из индекса (ОСТ), условного обозначения министерства (ведомства), регистрационного номера и отделенных тире двух последних цифр года утверждения.

Стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений (СТО). Объектами СТО являются:

- принципиально новые виды продукции и услуг;
- новые, передовые методы испытаний;
- нетрадиционные технологии разработки, изготовления, хранения продукции и новые принципы организации и управления производством.

Общественные объединения, занимающиеся этими вопросами, преследуют цель распространения через свои стандарты заслуживающих внимания и перспективных результатов мировых научно-технических достижений, фундаментальных и прикладных исследований. Для отечественной стандартизации СТО является новой категорией стандарта, но за рубежом она используется давно. Большое распространение эта категория стандарта получила в США. Наиболее влиятельным инженерным обществом является Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM). В обществе состоят индивидуальные члены, компании, научно-исследовательские институты, учебные заведения. Работой общества руководит совет директоров. ASTM издает журнал «Исследования свойств материалов и стандарты», издает свои стандарты отдельными брошюрами и сборниками. Стандартизация в области транспортных средств (автомобилестроение, самолетостроение и пр.) осуществляется Американским обществом инженеров транспорта (SAE).

Разработка принципиально новых видов продукции (услуг), нетрадиционных технологий, методов испытаний — это результат научно-исследовательских работ. Разработку соответствующих стандартов раньше (в СССР) организовывали отраслевые министерства. Сейчас эта функция должна перейти к научно-техническим и инженерным обществам. Задачи, связанные с разработкой новых химических методов, будут решать специалисты из Российского химического общества, задачи из области строительства будут решать специалисты Российского научно-технического союза строителей. Обозначение СТО состоит из индекса (СТО), аббревиатуры общества, регистрационного номера и отделенных тире двух цифр, обозначающих год утверждения стандарта. *Пример:* СТО РОО 10.01–95, где РОО — Российское общество оценщиков.

Стандарты предприятий (СТП) разрабатываются на создаваемые и применяемые в основном на данном предприятии продукцию, услуги, процессы. Требо-

вания, устанавливаемые в СТП не должны противоречить обязательным требованиям государственных стандартов и стандартов отраслей. Объектами СТП являются:

- разрабатываемая на данном предприятии продукция, ее составные части, технологическая оснастка и инструмент;
- технологические процессы, общие технологические нормы и требования к ним;
- услуги, оказываемые внутри предприятия;
- процессы организации и управления производством.

Таким образом, основное назначение СТП — решение внутренних задач предприятия. Для решения внутренних задач предназначены и *стандарты организаций*, которые должны заменить СТП.

Технические условия (ТУ) разрабатывают предприятия и другие субъекты хозяйственной деятельности в том случае, когда стандарт создавать нецелесообразно. Объектом ТУ может быть продукция разовой поставки, выпускаемая малыми партиями, а также произведения художественных промыслов и т. п. ТУ имеют двойной статус как документа нормативного и технического. Согласно государственной системе стандартизации (ГСС) РФ, ТУ на поставляемую продукцию используют в роли НД, если на них делаются ссылки в договорах и контрактах, с другой стороны, в соответствии с законом «О стандартизации» ТУ были отнесены к техническим, а не нормативным документам.

В ТУ устанавливают требования к конкретной продукции (услуге, процессу). Требования ТУ не должны противоречить обязательным требованиям государственных (национальных) стандартов, распространяющихся на данную продукцию, но могут дополнять и ужесточать установленные в них требования.

Обозначение «ТУ» предприятие-разработчик присваивает продукции в соответствии с принятым им порядком обозначения ТУ. Разработчик ТУ принимает их без указания срока действия, за исключением особых случаев, когда заинтересованность в ограничении срока действия проявляет заказчик (потребитель) продукции.

В качестве нормативного документа может выступать комплекс стандартов, который объединяет взаимосвязанные стандарты, если они имеют общую целевую направленность, устанавливают согласованные требования к взаимосвязанным объектам стандартизации. Подобные комплексы стандартов, согласно общероссийским классификаторам, представляют собой *системы стандартов* межотраслевого значения. Номер системы обозначается цифрой после аббревиатуры ГОСТ. Примерами межгосударственных и государственных систем стандартов являются:

- ГОСТ Р 1 — государственная система стандартизации Российской Федерации;
- ГОСТ 2 — единая система конструкторской документации (ЕСКД);
- ГОСТ 3 — единая система технологической документации (ЕСТП);
- ГОСТ (ГОСТ Р) 8 — государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ);
- ГОСТ 12 — система стандартов безопасности труда (ССБТ);

- ГОСТ 14 — единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП).

Национальные стандарты утверждаются национальным органом по стандартизации в соответствии с правилами стандартизации, нормами и рекомендациями в этой области. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2004 г. № 294 функции национального органа РФ по стандартизации возложены на Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Ранее эти функции были возложены на Госстандарт России.

Национальный орган по стандартизации наделен правом разрабатывать и утверждать программу разработки национальных стандартов, а также порядок создания и деятельности технических комитетов по стандартизации, проводящих экспертизу проектов стандартов. В состав технических комитетов по стандартизации на паритетных началах и добровольной основе могут включаться представители федеральных органов исполнительной власти, научных организаций, саморегулируемых организаций, общественных объединений предпринимателей и потребителей.

Деятельность по стандартизации осуществляется и другими федеральными органами исполнительной власти в пределах их компетенции. Эти органы в своих стандартах могут устанавливать обязательные требования к качеству продукции (работ, услуг), то есть создавать технические регламенты. В частности, роль технических регламентов выполняют санитарные правила и нормы (СанПиН), вводимые Минздравом России; строительные нормы и правила (СНиП), вводимые Госстроем России; государственные образовательные стандарты Министерства образования Российской Федерации и пр.

Национальный стандарт применяется на добровольной основе равным образом и в равной степени независимо от страны и/или места происхождения продукции, осуществления процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ и оказания услуг, видов или особенностей сделок и/или лиц, являющихся изготовителями, исполнителями, продавцами, приобретателями.

17.6. Соглашение по техническим барьерам в торговле

Соглашение является одним из документов ВТО, содержащих правила деятельности членов ВТО в рамках международной стандартизации. Рассмотрим ряд основных правил, приведенных в соглашении.

1. *Гармонизация.* При наличии международных стандартов (как добровольных технических документов), регламентов (как документов, обязательных для исполнения), правил по оценке соответствия (в части работ по сертификации) член ВТО не должен разрабатывать национальную документацию, отличающуюся от них. Национальные стандарты должны быть гармонизированы с международными стандартами. *Гармонизация стандарта* — это приведение

его содержания в соответствие с другим стандартом для обеспечения взаимозаменяемости продукции (услуг), взаимного понимания результатов испытаний и информации, содержащейся в стандартах.

2. *Национальный режим и отсутствие дискриминации.* Условия для оценки качества импортной продукции должны быть не менее благоприятными, чем для отечественной продукции, то есть к импортной продукции не должны предъявляться более жесткие требования, чем к отечественной.
3. *Уведомление (нотификация) и прозрачность (транспарентность).* Если страна — член ВТО намерена принять НД, отличающийся от международного, она обязана направить в секретариат ВТО сообщение с обоснованием причин подобного шага и кратким изложением проекта документа. Любой член организации (по запросу) должен иметь не менее 60 суток для подготовки соответствующего отзыва на проект НД. Все утвержденные НД должны быть опубликованы и доступны (прозрачны) для всех заинтересованных сторон как внутри страны, так и за ее пределами.
4. *Информация о стандартизации.* Члены ВТО обязаны информировать обо всех изменениях в системе стандартизации, которые могут привести к созданию скрытых препятствий (барьеров) в торговых отношениях партнеров по организации. Каждый член ВТО должен открыть один или несколько пунктов, в которых можно получить информацию о действующих и разрабатываемых в стране стандартах, регламентах и пр. В соответствии с этим правилом в России создан национальный Информационный центр по стандартизации, сертификации и преодолению технических барьеров в торговле (НИЦ ВТО).

17.7. Применение международных стандартов при разработке системы национальных стандартов

Участие России в работах по международной стандартизации может быть эффективным только при условии своевременного и наиболее полного использования международных стандартов в отраслях экономики.

Государственная (национальная) система стандартизации России предусматривает несколько вариантов применения международных, региональных, национальных стандартов других стран в зависимости от степени использования международного документа и формы его представления (рис. 17.2).

1. *Принятие государственного (национального) стандарта, представляющего собой аутентичный текст на русском языке соответствующего международного документа, без каких-либо дополнений и изменений.* Этот вариант называют прямым методом, или «методом обложки». При этом варианте обозначение государственного стандарта РФ состоит из индекса (ГОСТ Р); обозначения соответствующего международного стандарта (без указания года его принятия); отделенных тире двух цифр, обозначающих год утверждения ГОСТ Р.

Пример: ГОСТ Р ISO 945–97.

2. Принятие государственного (национального) стандарта, представляющего собой аутентичный текст на русском языке соответствующего международного документа, но с дополнительными требованиями к объекту стандартизации, отражающими специфику потребностей России. При данном варианте содержание ГОСТа отличается от зарубежного аналога, а обозначение международного стандарта приводится в скобках вслед за обозначением ГОСТ Р.

Пример: ГОСТ Р 45324–98 (ISO 6782–92).

3. Принятие ОСТ, СТП, СТО, стандарта организации на основе международного документа по стандартизации до принятия их в качестве государственных стандартов. При этом методе международный документ используется локально, то есть в рамках отрасли, предприятия, научно-технического общества.



Рис. 17.2. Варианты применения международных стандартов в РФ

Возможны и другие варианты заимствования отдельных положений и норм международных документов по стандартизации и использования их в российских НД. В этом случае международный стандарт используется только в качестве источника информации, который учитывается при разработке отечественного стандарта.

17.8. Методы стандартизации

Для нахождения оптимального решения повторяющихся задач и узаконивания его в качестве норм и правил необходим комплекс соответствующих методов.

Метод стандартизации — это прием или совокупность приемов, с помощью которых достигается цели стандартизации.

Основными методами стандартизации являются унификация, типизация, агрегатирование.

Унификация. Термин «унификация» происходит от латинских слов *unio* — единство и *facere* — делать и обозначает «приводить что-либо к единой норме, к единой форме, к единообразию или системе». В широком смысле унификация — это научно-технический метод определения и регламентации оптимальной и сокращенной номенклатуры объектов одинакового функционального назначения. Унифицированным является изделие (узел, деталь, конструктивный элемент, технологический процесс и т. д.), которое создано на базе некоторого количества ранее существовавших различных исполнений путем приведения их к единому исполнению, заменяющему любое из первичных.

На 17-й сессии Совета ISO было принято предложенное французскими стандартизаторами определение термина унификация. «Унификация — вид стандартизации, состоящий в объединении в один документ двух или более технических условий с таким расчетом, чтобы регламентируемые документом изделия были взаимозаменяемыми». Это определение несколько необычно для отечественной практики, но подчеркивает приоритет технической документации и не противоречит приведенному в предыдущем абзаце определению.

Часто унификацию пытаются привести к одной простой схеме: унификация — сокращение — число изделий (номенклатура). Подобная процедура определена международным термином «симплификация», под которой понимается элементарный вид унификации, основанный на простом сокращении наименее употребительных элементов, — ограничительная унификация. Тем не менее, проводя унификацию, зачастую не сокращают типоразмерный ряд изделий, а увеличивают. В зависимости от целей, задач и конкретных способов реализации следует различать три вида унификации: заимствование, построение рядов, сокращение (симплификация).

Унификация заимствованием — это использование в каком-либо изделии при его проектировании ранее разработанных деталей, узлов, элементов конструкций, технологических процессов и т. п. Заимствование может проводиться как из предыдущих моделей данного изделия, так и из изделий другого функционального назначения. Заимствование может происходить нерегламентируемо (стихийно), однако необходимо убедиться в том, что конкретное заимствование не противоречит действующим НД.

Унификация построением рядов — это построение оптимальных рядов изделий, которые по своему функциональному назначению заменяют неунифицированные изделия. В этом случае разрабатываются типовые решения для создания новых изделий, процессов или проведения соответствующих работ. Такой вид унификации используется тогда, когда предполагается полная или существенная смена изготавливаемой продукции. Результатом разработки типовых решений будут унифицированные детали, узлы, технологические операции и процессы, агрегаты, базовые конструкции и базовые изделия, ряды изделий, параметров и т. д.

Унификация данного типа завершается созданием стандарта или альбомом унифицированных конструкций. Таким образом, при унификации заимсткова-

нием типоразмеры детали получают из проектной документации (чертежей) соответствующих изделий, а при унификации построением рядов — из НД (рис. 17.3). Полностью унифицированная деталь — это деталь, изготовленная по унифицированному рабочему чертежу. Деталь в этом случае получает определенное обозначение, которое полностью и однозначно определяет все ее характеристики.

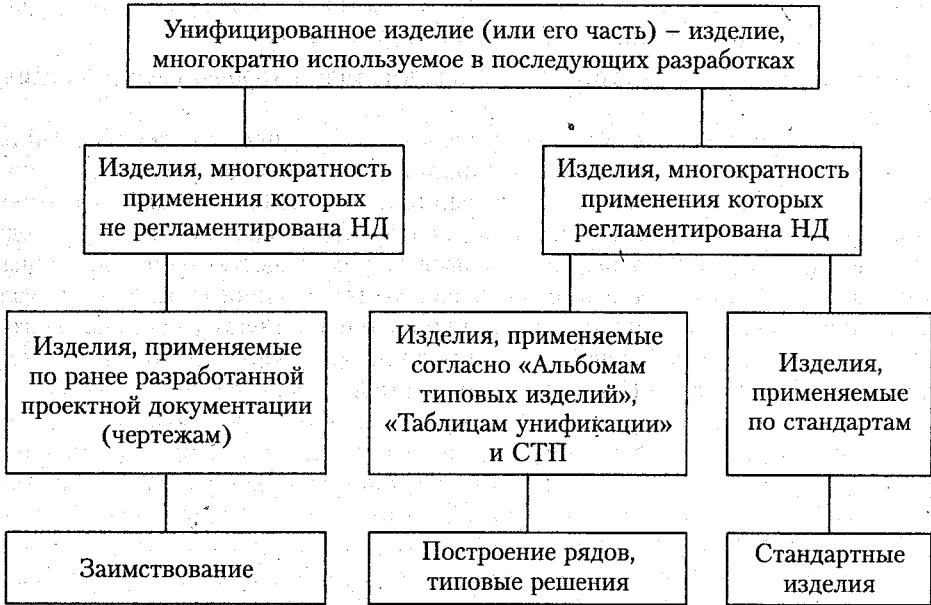


Рис. 17.3. Взаимосвязь понятий «унифицированное изделие»

Типизация. Под типизацией объектов стандартизации понимается метод стандартизации, заключающийся в установлении типовых объектов для данной совокупности и принимаемых за основу (базу) при создании других объектов, близких по функциональному назначению. Этот метод часто называют *методом базовых конструкций*, так как в процессе типизации выбирается объект, наиболее характерный для данной совокупности, с оптимальными свойствами, а для получения конкретного объекта (изделия, технологического процесса) выбранный типовой объект может лишь частично изменяться или дорабатываться. Возможность определенных преобразований отобранных объектов отличает типизацию от *селекции* — деятельности, заключающейся в простом отборе конкретных объектов, которые признаются целесообразными для дальнейшего производства и применения.

Агрегатирование. Под термином «агрегатирование» понимается метод создания (компоновки) машин, приборов и оборудования из отдельных стандартных (взаимозаменяемых, унифицированных) узлов, многократно используемых при создании различных изделий. Каждый узел (агрегат) выполняет определенную функцию и представляет собой законченное изделие. Агрегат — это укрупненный унифицированный узел машины или прибора, который обладает следующими свойствами:

- отделимостью и полной взаимозаменяемостью;
- завершенностью в функциональном отношении. Под завершенностью в данном случае понимается возможность самостоятельно выполнять определенную функцию;
- завершенностью в конструктивном исполнении (самостоятельное изделие);
- наличием стандартных конструктивных, габаритных и присоединительных размеров, допускающих надежную и быструю сборку.

Агрегат должен быть отработан технологически и хорошо изучен в эксплуатации.

Унификация приводит к уменьшению количества типоразмеров изделий одинакового функционального назначения, а агрегатирование увеличивает число объектов специализированного назначения. Применение метода агрегатирования позволяет не создавать каждый раз новое изделие как оригинальное и единственное в своем роде, а перекомпоновывать уже существующие, освоенные в производстве узлы и агрегаты, с добавлением ограниченного числа новых узлов. В машиностроении и приборостроении широко используется метод базового агрегата, при котором к базовой модели машины (прибора) присоединяется специальное оборудование (блоки). В результате получают ряд машин (приборов) разнообразного назначения. В условиях современного производства, когда осуществляется быстрая смена объектов производства, агрегатирование является одним из наиболее прогрессивных методов конструирования изделий, обеспечивающим ускорение технического прогресса и большой экономический эффект.

Продукция определенного назначения, принципа действия и конструкции, то есть продукция определенного типа, характеризуется рядом параметров. Набор установленных значений параметров называется параметрическим рядом. Процесс стандартизации параметрических рядов – параметрическая стандартизация – заключается в выборе и обосновании целесообразной номенклатуры и численного значения параметров.

Разработка параметрических рядов требует прежде всего установления единой закономерности в системе стандартизируемых величин, к числу которых относятся геометрические характеристики, мощность, производительность, грузоподъемность, скорость, прочность и другие параметры изделий и их составных частей. Эта задача решается установлением рядов предпочтительных чисел, из которых необходимо выбирать значения параметров, размеров и других характеристик как при разработке стандартов, так и при проектировании, расчетах, составлении различных технических документов. Смысл разработки рядов предпочтительных чисел заключается в выборе лишь тех значений параметров изделий, которые подчиняются строго определенной математической закономерности, а не любых значений, принимаемых в результате расчетов или в порядке волевого решения.

Ряды предпочтительных чисел должны удовлетворять следующим требованиям:

- представлять собой рациональную систему градации чисел, удовлетворяющую потребностям производства и эксплуатации;
- быть бесконечными как в сторону малых, так и в сторону больших величин;

- включать все десятикратные значения любого числа и единицу;
- быть простыми и легко запоминающимися.

Примеры применения целесообразных рядов известны с древних времен. Колеса римских водопроводов имели диаметры, соответствующие геометрической прогрессии. Петр I издал указ, в котором устанавливались калибры ядер 4, 6, 8, 12, 18, 24, 36, что соответствовало ступенчатой геометрической прогрессии.

Простейшие ряды предпочтительных чисел строятся на основе арифметической прогрессии, то есть такой последовательности чисел, в которой разность между последующим и предыдущим членами остается постоянной. Примерами арифметической прогрессии являются следующие последовательности:

- возрастающая прогрессия с разностью 3: 1-4-7-10-...;
- убывающая прогрессия с разностью 0,2: 1-0,8-0,6-....

Любой член арифметической прогрессии вычисляется по формуле

$$a_n = a_1 + d(n - 1),$$

где a_1 — первый член прогрессии; d — разность прогрессии; n — номер взятого члена.

Достоинством рядов предпочтительных чисел, базирующихся на арифметической прогрессии, является их простота, недостатком — относительная неравномерность. Так, в возрастающей арифметической прогрессии с разностью 3 второй член превышает первый на 300 %, а одиннадцатый больше десятого на 30 %. В результате большие значения следуют друг за другом значительно чаще, чем малые.

Для преодоления этого недостатка используют ступенчато-арифметические прогрессии. Такую прогрессию образуют, например, достоинства монет:

$$1-2-3-5-10-15-20 \text{ коп.},$$

где разность прогрессии принимает значения 1 и 5. В настоящее время ступенчатая арифметическая прогрессия находит применение в стандартах на диаметры резьб, размеры болтов, винтов и других деталей машин.

В геометрической прогрессии постоянным остается отношение последующего члена прогрессии к предыдущему. Примерами геометрической прогрессии являются следующие последовательности:

- возрастающая последовательность со знаменателем 1,2: 1-1,2-1,44-1,73-...;
- убывающая последовательность со знаменателем 0,1: 1-0,1-0,01-....

Любой член геометрической прогрессии вычисляется по формуле

$$a_n = a_1 q^{n-1},$$

где a_1 — первый член прогрессии; q — знаменатель прогрессии; n — номер взятого члена.

Введение современной системы предпочтительных рядов чисел, основанных на геометрической прогрессии, связано с именем французского инженера Шарля Ренара, который разработал спецификацию на диаметры хлопчатобумажных канатов для аэростатов с таким расчетом, чтобы их могли изготовлять заранее, независимо от места эксплуатации. Используя преимущества геометрической про-

грессии, Ренар взял за основу канат, имеющий определенную массу a в граммах на один метр длины, и построил ряд, приняв знаменатель прогрессии, обеспечивающий десятикратное увеличение каждого пятого члена ряда, то есть $aq^5 = 10a$, откуда $\sqrt[5]{10} = q$. Получился следующий числовой ряд: $a - 1,5849a - 2,5119a - 3,9811a - 6,3096a - 10a$. Значения этого ряда были заменены более удобными на практике округленными значениями.

На основе построенного Ренаром ряда, условно обозначенного $R5$, впоследствии были построены ряды $R10$, $R20$, $R40$, которые так и называют — рядами Ренара (табл. 17.1).

В результате многолетнего производственного опыта было установлено, что для удовлетворения нужд производства достаточно положить в основу построения рядов предпочтительных чисел геометрические прогрессии со знаменателями, приведенными в таблице.

Таблица 17.1. Геометрические прогрессии, положенные в основу рядов Ренара

Условное обозначение ряда	Знаменатель прогрессии	Количество членов в десятичном интервале
$R5$	$\sqrt[5]{10} = 1,6$	5
$R10$	$\sqrt[10]{10} = 1,25$	10
$R20$	$\sqrt[20]{10} = 1,12$	20
$R40$	$\sqrt[40]{10} = 1,059$	40
$R80$	$\sqrt[80]{10} = 1,029$	80
$R160$	$\sqrt[160]{10} = 1,015$	160

Ряды $R5$, $R10$, $R20$, $R40$ называются основными рядами, а ряды $R80$, $R160$ — дополнительными.

При построении рядов предпочтительных чисел соблюдается один из основных принципов стандартизации — принцип предпочтительности. Соблюдение принципа предпочтительности позволяет добиться разумного сокращения применяемой номенклатуры стандартных объектов. При выборе того или иного ряда учитываются интересы не только потребителей, но и изготовителей продукции. Частота параметрического ряда должна быть оптимальной: слишком «густой» ряд позволяет максимально удовлетворять нужды потребителей, однако при этом чрезмерно расширяется номенклатура продукции, расплывается ее производство, что приводит к большим производственным затратам. Поэтому ряд $R5$ является более предпочтительным по сравнению с рядом $R10$, а ряд $R10$ предпочтительнее ряда $R20$.

В области радиоэлектроники в качестве руководящего документа Международной электротехнической комиссией принята Публикация 63 «Ряды предпочтительных величин для резисторов и конденсаторов», предусматривающая систему предпочтительных чисел в виде рядов $E3$, $E6$, $E12$, $E24$, $E48$, $E96$, $E192$

(табл. 17.2). Принцип построения указанных рядов аналогичен принципу, положенному в основу построения рядов Ренара.

Таблица 17.2. Принципы построения рядов предпочтительных чисел в радиоэлектронике

Условное обозначение ряда	Знаменатель прогрессии	Количество членов в десятичном интервале
<i>E3</i>	$\sqrt[3]{10} = 2,2$	3
<i>E6</i>	$\sqrt[6]{10} = 1,5$	6
<i>E12</i>	$\sqrt[12]{10} = 1,2$	12
<i>E24</i>	$\sqrt[24]{10} = 1,1$	24
<i>E48</i>	$\sqrt[48]{10} = 1,05$	48
<i>E96</i>	$\sqrt[96]{10} = 1,01$	96
<i>E19</i>	$\sqrt[192]{10} = 1,01$	192

Стандартизуемые и нормируемые параметры могут иметь разный характер, но при выборе их номинальных значений из рядов предпочтительных чисел значительно легче согласуются между собой изделия, предназначенные для работы в одной технологической цепочке или являющиеся объектами технологического процесса. Например, принято использование транспортных и грузоподъемных средств в расчете на массы грузов, построенные по ряду *R5* (грузоподъемность железнодорожных вагонов 25, 40, 63 и 100 т, вместимость контейнеров — 250, 400, 630, 1000 кг, масса ящиков — 25, 40, 63, 100 кг, масса коробок или банок — 250, 400, 630 и 1000 г).

ГЛАВА 18 Подтверждение соответствия

18.1. Формы подтверждения соответствия. Основные определения

Подтверждение соответствия продукции и услуг является одной из составляющих механизма оценки их безопасности и применяется на дорыночной стадии обращения продукции.

Согласно ФЗ «О техническом регулировании», *подтверждением соответствия* называют документальное удостоверение соответствия продукции или иных объектов, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ и оказания услуг требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

Подтверждение соответствия осуществляется в целях:

- удостоверения соответствия продукции, работ или услуг техническим регламентам, стандартам, условиям договоров;
- содействия приобретателям в компетентном выборе продукции, работ или услуг;
- повышения конкурентоспособности продукции, работ или услуг на российском и международном рынках;
- создания условий для обеспечения свободного перемещения товаров на территории РФ, а также для осуществления международного экономического, научно-технического сотрудничества и международной торговли.

Подтверждение соответствия осуществляется на основе принципов:

- доступности информации о порядке подтверждения соответствия заинтересованным лицам;
- недопустимости применения обязательного подтверждения соответствия к объектам, в отношении которых не установлены требования технических регламентов;

- установления перечня форм и схем обязательного подтверждения соответствия в отношении определенных видов продукции в соответствующем техническом регламенте;
- уменьшения сроков обязательного подтверждения соответствия и затрат заявителя;
- недопустимости принуждения к добровольному подтверждению соответствия, в том числе в определенной системе добровольной сертификации;
- защиты имущественных интересов заявителей, соблюдения коммерческой тайны в отношении сведений, полученных при подтверждении соответствия;
- недопустимости подмены обязательного подтверждения соответствия добровольной сертификацией.

Подтверждение соответствия применяется ко всей продукции на территории РФ независимо от страны или места ее происхождения.

Формы подтверждения соответствия, применяемые в РФ, представлены на рис. 18.1.

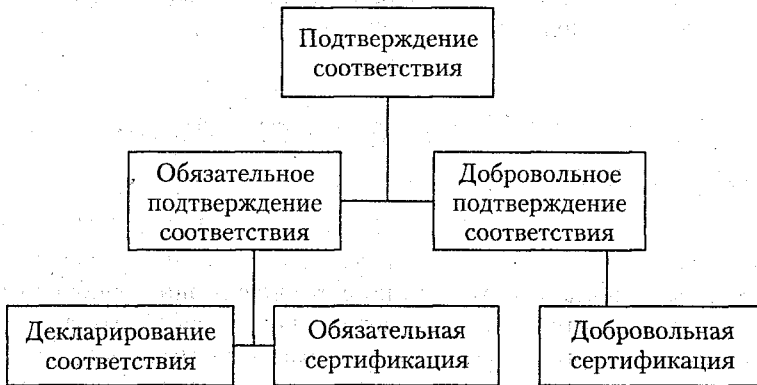


Рис. 18.1. Формы подтверждения соответствия

Добровольное подтверждение соответствия возможно только в форме добровольной сертификации и производится по той же схеме, что и ранее проводившаяся добровольная сертификация, предусмотренная законом РФ «О сертификации продукции и услуг».

Обязательное подтверждение соответствия проводится только в случаях, установленных соответствующим техническим регламентом, и исключительно на соответствие требованиям технического регламента. Объектом обязательного подтверждения соответствия может быть только продукция, выпускаемая в обращение на территории Российской Федерации.

ФЗ «О техническом регулировании» устанавливает две формы обязательного подтверждения соответствия: *обязательная сертификация* и *принятие декларации о соответствии (декларирование соответствия)*, причем форма и схемы обязательного подтверждения соответствия устанавливаются только техническим регламентом с учетом степени риска не достичь целей технического регулирова-

ния. К той продукции, для которой техническим регламентом предусмотрено обязательное подтверждение соответствия в форме декларирования соответствия, уже не может быть применена обязательная сертификация, и наоборот.

Основными вопросами, которые надо решать предприятию при подтверждении соответствия выпускаемой им продукции, являются следующие:

- подлежит ли производимая предприятием (или поставляемая организацией на рынок) продукция обязательному подтверждению соответствия;
- каким обязательным требованиям должна соответствовать эта продукция;
- какая форма обязательного подтверждения соответствия должна быть применена;
- какие органы по сертификации могут провести оценку и выдать сертификат соответствия или каковы правила и процедуры декларирования соответствия;
- требуются ли для подтверждения соответствия документы Минздрава России или других федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих контроль и надзор за этой продукцией;
- каковы права и обязанности производителя (продавца) продукции, подлежащей обязательному подтверждению соответствия.

18.2. Обязательная и добровольная сертификация

Начало истории систем сертификации относится к XVII–XVIII вв., когда возникла задача обеспечения безопасности на море. Морские путешествия и перевозки всегда были связаны с риском, но в это время они приобрели массовый характер, и правительствам морских держав пришлось обратить внимание на качество военных и торговых судов своих стран. Первыми системами сертификации были *морские регистры*, появившиеся в морских державах один за другим, в том числе и в России. Морской регистр судоходства в Российской Федерации, как и морские регистры в других странах мира, является старейшей и одной из самых уважаемых систем сертификации, призванной следить за безопасностью на море.

В более широком смысле термин «сертификация» в нашей стране стал применяться после введения в действие в 1992 г. закона РФ «О защите прав потребителей» и утверждения Правительством РФ первой номенклатуры товаров, подлежащих обязательной сертификации. Главным требованием к выпускаемой продукции была признана безопасность ее потребления.

Следующим шагом в создании и становлении систем сертификации в нашей стране стал закон РФ «О сертификации продукции и услуг» (1993 г.), которым были установлены правовые основы обязательной и добровольной сертификации продукции и услуг, а также права и обязанности участников сертификации. Согласно российскому законодательству, реализация потребителю многих видов товаров стала невозможна без документа, подтверждающего их соответствие обязательным требованиям.

Перечень товаров и услуг, подлежащих обязательной сертификации, был утвержден Постановлением Правительства РФ, на основании которого Госстандартом России разработана «Номенклатура продукции и услуг (работ), в отношении которых законодательными актами Российской Федерации предусмотрена их обязательная сертификация». В этом документе вся продукция представлена кодами Общероссийского классификатора продукции и указаны пункты обязательных требований государственных стандартов, которым она должна соответствовать. Номенклатура является официальным справочным документом Госстандарта России.

Требования к продукции устанавливались главным образом в государственных (ГОСТ Р) и межгосударственных (ГОСТ) стандартах, а на конкретные виды продукции — в технических условиях, по которым выпускается эта продукция.

Закон РФ «О сертификации продукции и услуг», действовавший в течение десяти лет, допускал только две формы подтверждения соответствия — обязательную либо добровольную сертификацию. Многие положения указанного закона перешли в федеральный закон «О техническом регулировании» и действуют в настоящее время.

В соответствии с федеральным законом «О техническом регулировании» на продукцию и услуги, успешно прошедшие процедуру сертификации, выдается подтверждающий это документ — сертификат соответствия, а на саму продукцию или в документацию на нее наносится либо знак системы сертификации — знак соответствия (при прохождении процедуры добровольной сертификации), либо знак обращения на рынке (при обязательной сертификации).

Сертификат соответствия — это документ, удостоверяющий соответствие объекта требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

Знак соответствия — обозначение, информирующее приобретателей о соответствии объекта сертификации требованиям системы добровольной сертификации или национальному стандарту.

Знак обращения на рынке — обозначение, информирующее приобретателей о соответствии выпускаемой в обращение продукции требованиям технических регламентов.

Добровольная сертификация проводится по инициативе юридических лиц и граждан. Добровольной сертификации может подвергаться продукция, для которой стандартами, системами добровольной сертификации или условиями договоров установлены какие-либо требования, причем эти требования не содержатся в числе обязательных и установленных техническими регламентами.

В принципе, добровольную сертификацию вправе осуществлять любое юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, создавшие свою систему добровольной сертификации и знак соответствия и установившие перечень объектов и их характеристик, на соответствие которым производится добровольная сертификация.

Система добровольной сертификации может быть зарегистрирована федеральным органом исполнительной власти по техническому регулированию.

Обязательная сертификация продукции на соответствие требованиям технических регламентов осуществляется аналогично применявшейся до 2003 г. обя-

зательной сертификации продукции на соответствие обязательным требованиям государственных стандартов, но сократилась «Номенклатура продукции и услуг (работ), в отношении которых законодательными актами Российской Федерации предусмотрена их обязательная сертификация». Это объясняется тем, что обязательное подтверждение соответствия части продукции теперь осуществляется в форме декларирования соответствия.

Для испытаний продукции органом по сертификации зарегистрированной системы обязательной сертификации привлекаются аккредитованные испытательные лаборатории (центры); по результатам исследований (испытаний) и измерений органом по сертификации выдается сертификат соответствия; продукция маркируется знаком обращения на рынке; сертификат соответствия вносится в реестр органа по сертификации и в единый реестр федерального органа исполнительной власти по техническому регулированию; орган по сертификации контролирует объект сертификации, если такой контроль предусмотрен соответствующей схемой обязательной сертификации.

Сертификат соответствия включает в себя:

- наименование и местонахождение заявителя;
- наименование и местонахождение изготовителя продукции;
- наименование и местонахождение органа по сертификации;
- информацию об объекте сертификации, позволяющую идентифицировать этот объект;
- наименование технического регламента, на соответствие требованиям которого проводилась сертификация;
- информацию о проведенных исследованиях (испытаниях) и измерениях;
- срок действия сертификата соответствия.

Следует отметить, что средства измерений также следует рассматривать как продукцию, имеющую свои коды по Общероссийскому классификатору продукции (коды ОКП).

В соответствии с «Номенклатурой продукции и услуг...» некоторые группы средств измерений подлежат обязательной сертификации. В эти группы, например, попали амперметры, вольтметры, счетчики электрической энергии, измерительные генераторы, измерительные трансформаторы и т. д.

Процедура сертификации не является подтверждением метрологических характеристик средства измерений, а свидетельствует о том, что оно как продукция главным образом безопасна для людей и в электромагнитном отношении не мешает работать другому оборудованию. Поэтому если на средство измерений выдан сертификат соответствия, то все равно при его использовании в сферах распространения ГМКиН прибор должен иметь сертификат об утверждении типа, а также поверительное клеймо или свидетельство о поверке. Следует также иметь в виду, что при серийном выпуске средств измерений, эксплуатируемых в сферах распространения ГМКиН, поверке подлежит каждый прибор, сертификат об утверждении типа действителен для всех приборов этого типа на срок до 5 лет, а сертификат соответствия чаще всего выдается на партию средств измерений, включающую определенное количество штук (10, 1000 и т. д.).

18.3. Декларирование соответствия

Декларирование соответствия широко применяется в мире и, в частности, в странах Европейского экономического сообщества. В нашей стране декларирование соответствия проходит стадию становления, и однозначных ответов на многие возникающие вопросы по процедуре декларирования пока нет.

Впервые в Российской Федерации декларирование соответствия стало применяться после принятия двух законов — «О качестве и безопасности пищевых продуктов» и «О защите прав потребителей» (в редакции 1999 г.). Постановлением Правительства РФ от 07.07.99 г. (дополнен и изменен в 2002 г.) был утвержден «Перечень продукции, соответствие которой может быть подтверждено декларацией о соответствии», на основании которого Госстандартом России была подготовлена «Номенклатура продукции, соответствие которой может быть подтверждено декларацией о соответствии». Номенклатура является официальным справочным документом Госстандарта России.

В соответствии с федеральным законом «О техническом регулировании» под декларированием соответствия понимается принятие декларации о соответствии самим заявителем, выполненное по определенным правилам.

Декларация о соответствии — это документ, удостоверяющий соответствие выпускаемой в обращение продукции требованиям технических регламентов.

Декларация о соответствии и сертификат соответствия имеют равную юридическую силу независимо от схем обязательного подтверждения соответствия и действуют на всей территории РФ.

Декларирование соответствия осуществляется по одной из следующих схем:

- принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств;
- принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств и доказательств, полученных с участием органа по сертификации и/или аккредитованной испытательной лаборатории (центра).

Вторая схема декларирования соответствия, включающая испытательный центр или орган по сертификации, применяется в том случае, если собственных доказательств недостаточно для принятия декларации о соответствии. Эта схема устанавливается в соответствующем техническом регламенте.

При декларировании соответствия на основании только собственных доказательств заявитель принимает на себя всю полноту ответственности за качество продукции и самостоятельно формирует доказательные материалы в целях подтверждения ее соответствия требованиям технических регламентов. В качестве таких материалов используются:

- техническая документация;
- результаты собственных исследований и измерений;
- другие документы, послужившие мотивированным основанием для подтверждения соответствия продукции требованиям технических регламентов.

Подробный состав доказательных материалов определяется техническим регламентом.

В том случае, если техническим регламентом устанавливается схема декларирования соответствия с привлечением испытательного центра или органа по сер-

тификации, заявитель по своему выбору в дополнение к собственным доказательствам:

- включает в эти материалы протоколы исследований и измерений, выполненных в аккредитованной испытательной лаборатории (центре);
- предоставляет сертификат системы качества, выданный органом по сертификации систем качества на соответствие международным стандартам ISO серии 9000.

Сертификат системы качества может использоваться в составе доказательств при принятии декларации о соответствии любой продукции, для которой техническим регламентом предусмотрено декларирование соответствия.

Декларация о соответствии должна содержать:

- наименование и местонахождение заявителя;
- наименование и местонахождение изготовителя;
- информацию об объекте подтверждения соответствия, позволяющую идентифицировать этот объект;
- наименование технического регламента, на соответствие требованиям которого подтверждается продукция;
- указание на схему декларирования соответствия;
- заявление заявителя о безопасности продукции при ее использовании;
- сведения о проведенных исследованиях и измерениях, сертификате системы качества, других документах, подтверждающих соответствие продукции требованиям технических регламентов;
- срок действия декларации о соответствии;
- иные сведения, предусмотренные техническими регламентами.

Срок действия декларации о соответствии определяется техническим регламентом. Оформленная по установленным правилам декларация о соответствии подлежит регистрации федеральным органом исполнительной власти по техническому регулированию в течение трех дней.

18.4. Системы сертификации. Система сертификации ГОСТ Р

В Российской Федерации деятельность по сертификации осуществляется в системах сертификации. Система сертификации — это совокупность правил выполнения работ по сертификации, ее участников и правил функционирования системы сертификации в целом. Системы сертификации подразделяются на системы обязательной и добровольной сертификации, но независимо от этого должны соответствовать следующим общим критериям:

- иметь область распространения, определенную наименованиями объектов сертификации и нормативных документов, на соответствие требованиям которых проводятся испытания в данной системе;

- ❑ иметь организационную структуру и правила взаимодействия участников сертификации;
- ❑ иметь единые правила и процедуры проведения сертификации;
- ❑ иметь собственные формы сертификата (сертификатов) соответствия и знака (знаков) соответствия;
- ❑ иметь реестр сертифицированных объектов и участников системы сертификации.

В настоящее время Госстандартом России зарегистрированы 18 систем обязательной сертификации и около 70 — добровольной.

Любая система сертификации построена по схеме, приведенной на рис. 18.2.



Рис. 18.2. Структура системы сертификации

Центральный орган системы сертификации организует и координирует работу и устанавливает правила в возглавляемой им системе сертификации, а также рассматривает апелляции заявителей по поводу действий органов по сертификации и испытательных лабораторий.

Орган по сертификации выдает сертификаты и лицензии на применение знака соответствия на основании протокола испытаний, выданного испытательной лабораторией. В права органа по сертификации также входит отмена или приостановление действия выданных им сертификатов.

Испытательная лаборатория (центр) в соответствии со своей областью аккредитации проводит испытания конкретной продукции. Порядок проведения сертификации продукции в Российской Федерации приведен в нормативном документе «Порядок проведения сертификации продукции в Российской Федерации», а также в Изменении № 1 к нему. В этом документе описана последова-

тельность проведения работ участниками сертификации, приведены схемы сертификации и рекомендации по их применению.

Схема сертификации — это совокупность действий, результаты которых рассматриваются в качестве доказательств соответствия продукции (работ, услуг) установленным требованиям.

Для проведения обязательной сертификации изготовитель или продавец вправе обратиться в любой орган по сертификации системы обязательной сертификации, аккредитованный на право проведения испытаний конкретной продукции. При сертификации продукции орган по сертификации в общем случае осуществляет следующие операции:

- рассматривает заявку с комплектом документов, представленные заявителем, и принимает (по прошествии не более 15 дней с момента поступления документов) решение по заявке;
- проводит отбор, идентификацию образцов продукции, направляет образцы на испытания в испытательную лабораторию;
- проводит оценку производства (если это предусмотрено выбранной заявителем и согласованной с органом по сертификации схемой сертификации);
- проводит анализ полученных результатов и принимает решение о выдаче (отказе в выдаче) сертификата соответствия;
- в случае, предусмотренном схемой сертификации, проводит инспекционный контроль сертифицированной продукции;
- представляет информацию о результатах сертификации в центральный орган системы сертификации.

Федеральный закон «О техническом регулировании» допускает участие в работах по сертификации в стране различных систем сертификации. Необходимым условием при этом является обязательная государственная регистрация систем обязательной сертификации в федеральном органе исполнительной власти по техническому регулированию (Госстандарт России, современное название которого — Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование)).

Система сертификации может создаваться государственными органами управления, предприятиями и организациями и представляет собой совокупность участников сертификации, проводящих сертификацию по правилам, установленным в этой системе. В систему сертификации могут входить юридические лица независимо от форм собственности, а также общественные объединения (например, общества потребителей). При этом различные системы сертификации могут проводить испытания однородной продукции.

Примером обязательной системы сертификации может служить система сертификации высоковольтного оборудования — Система сертификации «Энергосерт», в которую входят ряд предприятий и НИИ электроэнергетического комплекса. В указанной системе в целях обеспечения бесперебойного снабжения электроэнергией предприятий и населения проводится сертификация всего комплекса высоковольтного оборудования — от изоляторов и кабелей высокого напряжения до электрогенераторов. Система сертификации «Энергосерт» исполь-

зует международные и национальные стандарты; аккредитованные испытательные лаборатории, обеспечивающие проведение сертификационных испытаний; нормативно-техническую документацию, регламентирующую правила и процедуры сертификации продукции.

В качестве примера добровольной системы сертификации можно привести Систему сертификации средств измерений, проводящую испытания измерительной техники на добровольной основе по договорам с юридическими и физическими лицами.

Самой крупной в России системой сертификации как по количеству участников сертификации, так и по объему испытываемой продукции является Система сертификации ГОСТ Р, созданная и возглавляемая Госстандартом России. В системе сертификации ГОСТ Р проводится обязательная сертификация товаров и услуг (работ), подпадающих под действие закона РФ «О защите прав потребителей», федерального закона «Об основах охраны труда в Российской Федерации», закона РФ «О ветеринарии», федерального закона «Об оружии» и др. Практически все продукты питания, современные средства измерений, используемые в сферах ГМКиН, продукция производственно-технического назначения и множество других товаров испытаны в этой системе и имеют сертификат соответствия и маркировку знака соответствия этой системы. Система сертификации ГОСТ Р проводит и добровольную сертификацию. Вид знака соответствия системы сертификации ГОСТ Р приведен на рис. 18.3.



Рис. 18.3. Знак соответствия системы сертификации ГОСТ Р

Нормативную базу сертификации продукции и услуг (работ) в системе сертификации ГОСТ Р составляют государственные стандарты, санитарные правила и нормы, строительные нормы и правила. Основные правила деятельности в системе установлены в «Положении о Системе сертификации ГОСТ Р», зарегистрированном в Минюсте России в 1998 г.

В систему сертификации ГОСТ Р в качестве органов по сертификации входят органы Государственной метрологической службы и научные метрологические центры (НИИ Госстандарта России). Они же, как правило, аккредитуются Госстандартом России в качестве испытательных центров (лабораторий). Такое совмещение функций органов и испытательных центров упрощает и ускоряет процедуру сертификации продукции. Если у органа Государственной метрологической службы или научного метрологического центра отсутствует испытательное оборудование для какого-либо вида испытаний, то ими может быть заключен договор с предприятием или организацией, имеющими необходимое оборудование, об аренде этого оборудования, а в необходимых случаях функции испытательного центра (лаборатории) могут быть (после аккредитации Госстандартом России) поручены этому предприятию или организации.

18.5. Международные стандарты ISO серии 9000. Системы менеджмента качества

Практика международной торговли и сотрудничества показала, что сертификация только продукции предприятий и оказываемых услуг не является гарантией их стабильно высокого качества. Даже заслуженные и уважаемые предприятия могут выпускать продукцию, не соответствующую требованиям нормативных документов. На международном рынке товаров и услуг (на внутрисоюзном тоже) появление некачественных изделий может привести к потере авторитета и, как следствие, к финансовому краху изготовителя (продавца).

Обобщая международный опыт менеджмента качества, международная организация по стандартизации ISO выпустила в 1987 г. ряд стандартов серии 9000 (ISO 9001 — ISO 9004), распространяющихся на системы качества предприятий и организаций. В нашей стране на основе этих стандартов были утверждены государственные стандарты серии ГОСТ 40.9000–88. Стандарты ISO серии 9000 с тех пор дважды пересматривались и переиздавались, и в настоящее время в Российской Федерации действуют стандарты России ГОСТ Р ИСО 9000–2001 — ГОСТ Р ИСО 9004–2001.

Система менеджмента качества предполагает подготовку всех стадий технологического процесса (от входного контроля до проверки качества готовой продукции) и доведение их до такого уровня, что на всех этапах производства становится невозможным отклонение характеристик продукции больше допустимых значений. В результате внедрения менеджмента качества на предприятии его продукция должна быть стабильно высокого качества и отвечать всем требованиям нормативных документов.

Подтверждением способности предприятия выпускать продукцию только высокого качества является сертификация систем качества предприятия в одной или нескольких российских или зарубежных системах сертификации. Сертификат соответствия, выданный органом по сертификации систем качества от имени авторитетной системы сертификации, служит признанием того, что указанная система своим авторитетом подтверждает соответствие системы качества предприятия всем требованиям международных стандартов ISO серии 9000. В современных условиях все это служит пропуском на международный рынок товаров и услуг.

Сертификация систем качества включает в себя аттестацию каждого рабочего места, от работника охраны до руководителя предприятия, аттестацию отдельных подразделений и технологического процесса и аттестацию всего предприятия в целом. Каждый работник на своем рабочем месте должен знать не только свои обязанности, но и общую политику предприятия в области качества продукции. Ответственность работника за результаты своего труда, руководителя подразделения — за свое подразделение и руководителя предприятия — за слаженность работы всего предприятия являются необходимым условием менеджмента качества. Руководитель предприятия не должен вмешиваться в рабочий процесс подразделений, а должен решать вопросы, касающиеся политики в области качества предприятия в целом. Это же относится и к другим ступеням административного управления.

Главный принцип менеджмента качества — ориентация на потребителя.

Процесс подготовки к сертификации предприятия состоит из следующих этапов:

- создание и обучение коллектива разработчиков системы качества, внутренних экспертов — аудиторов и преподавателей;
- разработка систем административного управления в соответствии с требованиями стандарта ISO 9004 и организация постоянного обучения персонала предприятия;
- разработка и экспертиза должностных инструкций, документов общего менеджмента и контрактных (то есть тех, которые подлежат сертификации);
- выбор системы и органа по сертификации.

Работы по сертификации систем качества в нашей стране начались с начала 1990-х гг., и с тех пор количество сертифицированных предприятий увеличивается в геометрической прогрессии. На российском рынке сертификации систем качества в числе других действуют: Российский морской регистр судоходства (Морской регистр); Lloyd's Register Quality Assurance (LRQA, или регистр Ллойда, Великобритания); Bureau Veritas Quality International (BVQI, Великобритания); Det Norske Veritas (DNV, Норвегия), TÜV-CERT (Германия), а также Система сертификации ГОСТ Р.

Система сертификации ГОСТ Р в настоящее время включена в международную сеть по сертификации систем качества IQNet, в которую в качестве участников входят 35 организаций по сертификации из разных стран мира.

Следует отметить, что требований обязательной сертификации систем качества не выдвигается. Международные стандарты ISO серии 9000 носят рекомендательный характер, и каждое конкретное предприятие само решает вопрос, проводить сертификацию или нет. Но международная и отечественная практика показывает, что процесс сертификации систем качества необратим, и, вероятно, в скором будущем нельзя будет найти покупателя на товар или услуги без того, чтобы предварительно не представить доказательства высокой культуры и качества производства. Одним из таких доказательств является сертификат соответствия на систему качества, выданный уважаемым в мире органом по сертификации.

Сертификат соответствия на систему качества используется в качестве доказательства и при процедуре декларирования соответствия.

18.6. Аттестация испытательного оборудования

Для испытаний продукции при ее сертификации или собственных исследований при декларировании соответствия используется испытательное оборудование, представляющее собой комплекс средств, воспроизводящих условия испытаний, и средств измерений, контролирующих условия испытаний и действительные характеристики сертифицируемого объекта.

Так, например, испытательная установка для проверки электрической прочности изоляции должна состоять из регулируемого источника высокого напряжения и средств измерений, обеспечивающих контроль значений высокого напряжения на выходе установки во время испытаний и измерение режимов и пара-

метров объекта испытаний (ток утечки, сопротивление изоляции и т. п.). Такое оборудование подлежит первичной аттестации при вводе в эксплуатацию в данном испытательном подразделении и периодической аттестации в процессе последующей эксплуатации. На аттестацию испытательного оборудования распространяется ГОСТ Р 8.568–97 «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения».

Следует отметить, что часто даже специалисты-метрологи не различают понятия *аттестация испытательного оборудования* и применявшееся ранее *метрологическая аттестация средства измерений*, вследствие чего подменяют один термин другим.

Метрологическая аттестация нестандартизованных средств измерений проводилась ранее по ГОСТ 8.326–89 «ГСИ. Метрологическая аттестация средств измерений», который был отменен Госстандартом России на территории Российской Федерации с 01.01.1998 г. (как межгосударственный стандарт ГОСТ 8.326–89 продолжает действовать в странах СНГ).

Нестандартизованным является любое средство измерений, не прошедшее процедуру испытаний для целей утверждения типа и вследствие этого не внесенное в Государственный реестр средств измерений. Это может быть как серийно выпускаемое средство измерений, так и средство измерений, изготовленное в одном экземпляре для какой-то конкретной цели. Это может быть и прибор, тип которого утвержден и внесен в государственный реестр, но с метрологическими характеристиками, отличающимися от указанных в описании типа.

Согласно ГОСТ 8.326–89, каждое нестандартизованное средство измерений в индивидуальном порядке могло быть подвергнуто процедуре метрологической аттестации, которая представляла собой упрощенный аналог государственных испытаний средств измерений (или испытаний для целей утверждения типа) и проводилась с целью определения их действительных метрологических характеристик. После такой процедуры измерительный прибор или измерительная установка получали официальный статус и могли в дальнейшем допускаться к обычной периодической поверке, предусмотренной для средств измерений, внесенных в государственный реестр.

Таким образом, процедуры метрологической аттестации в Российской Федерации в настоящее время не существует, по крайней мере для средств измерений, используемых в сферах распространения ГМКиН, то есть подлежащих обязательной периодической поверке в процессе эксплуатации. (В рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29–99 термин «метрологическая аттестация» сохранен, но только для средств измерений, используемых вне сфер распространения ГМКиН.)

Испытательная установка, в отличие от измерительной (метрологической), предназначена для проверки каких-либо неметрологических характеристик объекта испытаний, например электрической прочности изоляции или устойчивости к внешним климатическим, механическим, электромагнитным воздействиям.

Согласно ГОСТ Р 8.568–97, при аттестации испытательного оборудования проверяется его способность обеспечить в течение заданного промежутка времени необходимые условия испытаний. Так, при аттестации испытательной установки для проверки электрической прочности изоляции в общем случае должно быть установлено следующее:

- установка безопасна для персонала и окружающей среды;
- диапазон воспроизводимых напряжений установки соответствует указанному в ее в нормативной документации;
- искажения формы кривой напряжения (или пульсации для постоянного напряжения) не превышают значений, требующихся для испытаний продукции;
- мощность источников напряжения установки достаточна для проведения конкретных испытаний;
- стабильность напряжения за время, необходимое для испытаний продукции (обычно 1 или 5 минут), не хуже некоторого установленного значения;
- средства измерений, входящие в состав установки, имеют действующие свидетельства о поверке или сертификаты о калибровке и обеспечивают необходимый уровень точности измерений.

Первичную аттестацию испытательного оборудования на месте его эксплуатации проводит комиссия, назначенная руководителем предприятия, на котором испытывается продукция. В состав комиссии включают представителей:

- подразделения предприятия, проводящего испытания на данном испытательном оборудовании;
- метрологической службы предприятия;
- государственных научных метрологических центров и/или органов государственной метрологической службы, если испытательное оборудование используется для целей обязательной сертификации продукции или при выпуске продукции, поставляемой по контрактам для государственных нужд.

Аттестацию испытательного оборудования могут также проводить организации, аккредитованные на право проведения такой работы.

Для первичной аттестации оборудования, используемого для целей обязательной сертификации продукции, или при выпуске продукции, поставляемой по контрактам для государственных нужд, должны использоваться только поверенные средства измерений. Для аттестации испытательного оборудования, используемого в других сферах, могут применяться как поверенные, так и калиброванные средства измерений.

Первичная аттестация заключается в экспертизе нормативной документации на испытательное оборудование и экспериментальном определении его действительных технических характеристик. Аттестацию проводят по разработанным программам и методикам аттестации на конкретное оборудование.

Результаты первичной аттестации оформляют протоколом, и при положительных результатах аттестации на испытательное оборудование выдается аттестат установленного образца.

Периодическую аттестацию в процессе эксплуатации проводят сотрудники подразделения, в котором установлено оборудование, уполномоченные для этой работы руководителем подразделения, и представители метрологической службы предприятия. Аттестация проводится по программе и в объеме, установленном при первичной аттестации.

Результаты периодической аттестации испытательного оборудования оформляют протоколом, который утверждает руководитель подразделения.

Литература

1. Квантовый эффект Холла // Новое в жизни, науке, технике. М.: Знание, 1986. (Сер. «Физика». № 9).
2. *Гейлор Дж.* Введение в теорию ошибок / Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
3. *Шишкин И. Ф.* Основы метрологии, стандартизации и контроля качества: Учебное пособие. М.: Изд-во стандартов, 1987.
4. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. М. Душин и др.; Под ред. Е. М. Душина. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Электрические измерения: Учебник для вузов / Л. И. Байда, Н. С. Добровторский, Е. М. Душин и др.; Под ред. А. В. Фремке. 4-е изд. Л.: Энергия, 1973.
6. *Спектор С. А.* Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
7. *Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф.* Качество измерений: Метрологическая справочная книга. Л.: Лениздат, 1987.
8. *Колтик Е. Д.* Создание и развитие метрологии электрических измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2001. № 4.
9. *Сергеев А. Г., Латышев М. В., Терегеря В. В.* Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие. М.: Логос, 2003.
10. *Алексеев Г. А.* Стандартизация в технических системах: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Сев.-Зап. технич. ун-та, 2001.
11. *Грановский В. А.* Системная метрология: метрологические системы и метрология систем. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1999.
12. *Тартаковский Д. Ф., Ястребов А. С.* Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2001.
13. Российская метрологическая энциклопедия. СПб.: ИИФ «Лики России», 2001.
14. *Новицкий П. В., Зограф И. А.* Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1991.

15. *Новицкий П. В.* Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968.
16. *Чертов А. Г.* Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): Справочник. М.: Аквариум, 1997.
17. *Лифиц И. М.* Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт-М, 2001.
18. *Брянский Л. Н., Дойников А. С., Крутин Б. Н.* Метрология. Шкалы, эталоны, практика / Под общ. ред. канд. физ.-мат. наук М. В. Балаханова. М.: ВНИИФТРИ, 2004.
19. Guide to Expression of Uncertainty in Measurement. Switzerland, Genève: ISO, 1993.
20. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. под ред. В. А. Слава. СПб.: ОНТИ «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 1999.
21. *Бурдун Г. Д., Марков Б. Н.* Основы метрологии: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., доп. М.: Изд-во стандартов, 1975.
22. *Веников В. А.* Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): Учебное пособие для вузов. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Высш. шк., 1976.
23. *Тюрин Н. И.* Введение в метрологию. М.: Изд-во стандартов, 1985.
24. *Камке Д., Кремер К.* Физические основы единиц измерения. М.: Мир, 1980.
25. *Шабалин С. А.* Прикладная метрология в вопросах и ответах. М.: Изд-во стандартов, 1986.
26. *Широков К. П., Богуславский М. Г.* Международная система единиц / Под ред. д-ра техн. наук проф. Ю. В. Тарбеева. М.: Изд-во стандартов, 1984.
27. *Владимиров В. Л.* Беседы о метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1988.
28. *Козлов М. Г.* Метрология и стандартизация. М.; СПб.: Изд-во СПб. ин-та печати, 2001.
29. *Сергеев А. Г., Крохин В. В.* Метрология: Учебное пособие для вузов. М.: Логос, 2000.
30. *Сена Л. А.* Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1988.

Алфавитный указатель

А

агрегат, 340
агрегатные комплексы, 289
адмитанс, 275
акселерометры, 310
амперметры
 ферродинамический, 191
 электродинамический, 191
аналого-цифровой
 преобразователь, 248, 260
арретир, 165

Б

безразмерная величина, 28

В

вакуумметры, 305
ваттметры
 ферродинамические, 193
 электродинамические, 193
веберметр, 294
 фотогальванометрический, 295
 цифровой, 296
величина
 идеальная, 20
 нефизическая, 20
 реальная, 20
 физическая, 20
 действительное значение, 56
 измеряемая, 21
 истинное значение, 56
 оцениваемая, 21
взвешенная сумма, 63
внеочередная поверка, 128

Вольтметры

амплитуды импульсов, 268
время-импульсные, 265
импульсные, 210
интегрирующие, 266
интегропотенциометрический, 270
кодowo-импульсные, 272
переменного тока, 274
селективные, 211
следающий, 271
универсальные, 209
циклический, 270
время-импульсный вольтметр, 265
вторичный эталон, 121
выпрямительные приборы, 177

Г

газоанализаторы, 306
гальванометры, 170
 баллистический, 174
гармонизация стандарта, 336
генераторные преобразователи, 302

Д

датчики, 85
действительное значение меры, 148
декады, 150
декларация о соответствии, 350
декларирование соответствия, 17, 346
демпферы, 165
дешифраторы, 262
диаграммная бумага, 235
динамическая составляющая
 погрешности, 45
динамическое измерение, 45

дискретизация, 248
 дисперсия, 64
 добровольная сертификация, 348
 доверительная вероятность, 72
 доверительный интервал, 72

Е

единство измерений, 14
 емкостные преобразователи, 306

З

закон распределения случайной
 величины, 63
 знак обращения на рынке, 348
 знак соответствия, 348
 знаковые индикаторы, 262
 газоразрядные, 262
 сегментные, 262
 значение меры
 действительное, 148
 номинальное, 148

И

измерение, 15
 динамическое, 45
 контрольное, 45
 косвенное, 44, 103
 максимально возможной
 точности, 45
 многократное, 43
 неравноточное, 46
 однократное, 43, 100
 прямое, 43
 равноточное, 45
 совместное, 44, 105
 совокупное, 44, 107
 статическое, 45
 техническое, 45
 измерительная информационная
 система, 281
 измерительная катушка, 294
 измерительная система, 86
 измерительная установка, 86
 измерительная шкала
 абсолютная, 27
 интервалов, 25
 наименований, 24

измерительная шкала (*продолжение*)
 отношений, 26
 порядка, 25
 измерительно-вычислительные
 комплексы, 291
 измерительное преобразование, 24
 измерительные преобразователи
 масштабные, 153
 измерительные системы
 ближнего действия, 283
 многоканальные, 283
 многоточечные, 284
 мультиплицированные, 283
 сканирующие, 283
 дальнего действия, 284
 измерительный преобразователь, 85
 масштабный, 85
 неэлектрической величины, 300
 первичный, 85
 промежуточный, 85
 электромеханический, 161
 измерительный прибор, 85
 аналоговый, 86
 цифровой, 248
 иммитанс, 275
 импеданс, 275
 импульсные вольтметры, 210
 индикаторы, 87
 индуктивные преобразователи, 307
 индукционные преобразователи, 310
 индукционные приборы, 199
 преобразователь, 293
 инспекционная поверка, 128
 интегральная функция
 распределения, 65
 интегральный закон
 распределения, 65
 интегрирующий вольтметр, 266, 269
 интегропотенциометрический
 вольтметр, 270
 информационная теория
 измерений, 111
 источник опорного напряжения, 142
 компенсационный, 145
 параметрический, 145
 исходная энтропия, 113

К

- калибраторы напряжения и силы тока, 146
- калибровка средства измерений, 126
- квантили, 72
- квантильные оценки, 72
- квантование по уровню, 249
- квантовая метрология, 46
- класс систем единиц, 31
- класс точности, 90
- ключи, 259
- код, 248
 - двоично-десятичный, 252
 - двоичный, 250
 - единично-десятичный, 252
 - единичный, 251
 - единичный позиционный, 251
 - параллельный, 250
 - последовательный, 250
 - тетрадно-десятичный, 252
- кодо-импульсный вольтметр, 272
- компаратор, 86, 258
- компенсаторы, 219
 - измерительные, 230
- комплекс стандартов, 330
- контроль, 123
- контрольное измерение, 45
- корректор, 165
- косвенное измерение, 44
- коэффициент охвата, 110
- коэффициенты подобия, 51
- кремниевые стабилитроны, 142
- критерии подобия, 51

Л

- ленточные самописцы, 235
- линейное измерительное преобразование, 21
- линии связи, 284
- логические элементы, 259
- логометры, 162
 - магнитоэлектрические, 175
 - электродинамические, 198

М

- магазины
 - емкости, 150
 - магнитной индуктивности, 151
 - сопротивлений, 150
- магнитоизмерительные приборы, 293
- магнитоэлектрические приборы, 166
 - применение, 176
- масштабы, 51
- математическое моделирование, 53
- математическое ожидание, 64
- менеджмент качества, 355
- мера, 84
 - многозначная, 85
 - набор, 85
 - однозначная, 84
- меры
 - действительное значение, 148
 - емкости, 150
 - индуктивности, 151
 - напряжения, 143
 - номинальное значение, 148
 - сопротивления, 148
 - сопротивления, емкости и индуктивности, 148
 - ЭДС, 140
- метод измерений, 46
 - аналоговый, 94
 - цифровой, 94
- методика выполнения измерений, 16
- методы стандартизации
 - агрегатирование, 340
 - типизация, 340
 - унификация, 339
- метрическая система мер, 34
- метрологические характеристики, 84
- метрология, 14
- микропроцессор, 289
- микропроцессорные системы, 289
- многократное измерение, 43
- моделирование
 - аналогиями, 53
 - математическое, 53
 - физическое, 53
- моменты, 68
 - начальный, 68
 - центральный, 69
- морской регистр, 347

мосты, 219

переменного тока, 224

постоянного тока

двойные, 223

одинарные, 221

универсальные, 228

Н

наборы мер, 148

надзор, 123

национальная система

стандартизации, 331

национальные стандарты, 329

неопределенность измерения, 109

неравноточное измерение, 46

несмещенная оценка, 70

номинальная нагрузка, 158

номинальное значение меры, 148

нормальный элемент, 140

устройство, 141

нормативный документ, 329

нормирование, 331

О

область стандартизации, 320

объект исследований, 15

объект стандартизации, 320

обязательная сертификация, 346, 348

однократное измерение, 43

округление

погрешности, 60

результатов измерений, 60

омметры, 274

основополагающий стандарт, 331

оценка

квантильная, 72

несмещенная, 70

состоятельная, 70

эффективная, 70

неопределенности, 108

по типу А, 109

по типу В, 109

погрешности измерения, 16

П

параметр, 330

параметрические преобразователи, 302

параметрический ряд, 330

первичная

аттестация, 357

поверка, 127

передаточное число, 202

пересчетные устройства, 258

периодическая

аттестация, 357

поверка, 128

периодомер, 264

плотность распределения

вероятности, 65

поверка

внеочередная, 128

инспекционная, 128

первичная, 127

периодическая, 128

экспертная, 128

поверка средства измерений, 126

поверочная схема, 119

государственная, 119

локальная, 119, 122

погрешность

абсолютная, 57

грубая, 58

динамическая, 257

измерения динамическая

составляющая, 45

инструментальная, 88

исключение, 77

квантования, 256

округление, 60

относительная, 57

предельная, 72

приведенная, 57

прогрессирующая, 59

реализации уровней

квантования, 255

результата измерения, 57

систематическая, 59

случайная, 59

средства измерения, 57

подтверждение соответствия, 345

добровольное, 346

обязательное, 346

показатель размерности, 28

полигон, 97
полоса погрешностей
 аддитивная, 90
 мультипликативная, 90
помехи
 нормального вида, 257
 общего вида, 257
поправка, 74
поправочный множитель, 74
пороговое несоответствие, 55
потенциометры, 219
предельная погрешность, 72
преобразователи
 генераторные, 302
 масштабные
 делители напряжения, 155
 добавочные сопротивления, 154
 измерительные усилители, 156
 трансформаторы тока
 и напряжения, 156
 шунты, 153
 параметрические, 302
преобразователь, 181
приборы сравнения, 219
 компенсаторы, 219
 мосты, 219
 неуравновешенные, 221
 уравновешенные, 220
принцип измерений, 46
принятие декларации
 о соответствии, 346
пробой *p-n*-перехода, 144
промахи, 58
прямое измерение, 43
пьезоэлектрические
 преобразователи, 311

Р

равноточное измерение, 45
разделение каналов связи, 284
размер физической величины, 27, 29
расширенная неопределенность, 110
регистрирующие приборы, 234
 ленточные самописцы, 235
 электронно-лучевые
 осциллографы, 235

результат измерения, 57
 исправленный, 74
 неисправленный, 74
реостатные преобразователи, 303
реоход, 222

С

самоход, 203
свойство объекта, 20
селективные вольтметры, 211
селекция, 340
сертификат соответствия, 348
 на систему качества, 356
сертификация, 17
 добровольная, 348
 обязательная, 346, 348
симплификация, 339
система сертификации, 351
системы автоматического контроля, 288
системы единиц физических величин
 абсолютная практическая, 35
 МКГСС, 35
 МКСА, 36
 МТС, 35
 СГС, 35
системы естественных единиц
 Планка, 41
 релятивистская, 41
 Хартри, 41
системы технической диагностики
 детерминированные, 289
 диагностические, 288
 прогнозирующие, 288
 статистические, 289
системы физических величин, 27
следающий вольтметр, 271
случайные величины
 дискретные, 61
 непрерывные, 61
совместное измерение, 44
совокупное измерение, 44
состоятельная оценка, 70
сравнивающие устройства, 257
среднее квадратическое отклонение, 64
средняя квадратическая
 погрешность, 71

средства измерений, 84
 калибровка, 126
 класс точности, 90
 поверка, 126
 средства измерительной техники, 84
 средство измерений, 15
 стандарт, 329
 гармонизация, 336
 на методы контроля, 332
 на продукцию (услугу), 331
 на работы (процессы), 332
 национальный, 329
 организации, 330
 основополагающий, 331
 отрасли, 330, 333
 предприятия, 330, 334
 стандартизация, 320
 параметрическая, 341
 правила, 330
 рекомендации, 330
 стандартная неопределенность, 109
 стандартные образцы
 свойств, 135
 состава, 135
 стандартные справочные данные, 46
 статическое измерение, 45
 схема
 сертификации, 353
 совпадения, 259
 сходимость моста, 220
 счетчики электрической энергии
 индукционные, 199
 ферродинамические, 197
 электродинамические, 197
 счетчики электроэнергии, 216

Т

тахометры, 310
 телеизмерительные системы, 284
 время-импульсные, 285
 кодowo-импульсные, 285
 линии связи, 284
 токовые, 284
 частотные, 285
 тензорезисторы, 303
 тензочувствительные
 преобразователи, 303

теория подобия, 51
 термоанемометры, 305
 терморезисторы, 304
 термостатирование, 78
 термочувствительные
 преобразователи, 304
 термоэлектрические
 преобразователи, 309
 термоэлектрические приборы, 179
 тесламетр, 296
 с преобразователем Холла, 296
 сверхпроводниковый, 298
 ферромодуляционный, 297
 ядерно-резонансный, 298
 технические условия, 335
 технический регламент, 17
 общий, 317
 специальный, 317
 техническое измерение, 45
 техническое регулирование, 17, 314
 типизация, 340

У

узаконенные единицы, 14
 универсальные вольтметры, 209
 универсальные постоянные, 47
 унификация, 339
 уровнемеры, 307
 условная энтропия, 113
 успокоители, 165
 устранение систематических
 погрешностей, 79, 82
 замещение, 79
 компенсация погрешности
 по знаку, 81
 перестановка, 80

Ф

фазометр, 198, 264
 ферродинамические приборы, 188
 физическая величина, 15
 внесистемная, 31
 действительное значение, 56
 единица измерения, 29
 внесистемная, 41
 когерентная, 31
 значение, 24, 29

физическая величина (*продолжение*)

- истинное значение, 56
- размер, 24, 29
- размерность, 27
- системная, 31
- шкалы, 22

физические величины, 21

- физические константы, 46
 - универсальные постоянные, 47
 - фундаментальные, 47

физическое моделирование, 53

- функция распределения вероятности, 64

Х

- хронометр, 263

Ц

- циклический вольтметр, 270
- цифроаналоговые преобразователи, 248, 259
- цифровое отсчетное устройство, 248
- цифровые измерительные приборы, 248
- цифровые осциллографы, 277

Ч

- частотомер, 264, 269
- чувствительность моста, 221

Ш

- шаг дискретизации, 249
- шкала
 - абсолютная, 27
 - измерений, 24
 - интервалов, 25
 - наименований, 24

шкала (*продолжение*)

- отношений, 26
- порядка, 25
- физической величины, 22, 24
- условная, 24

Э

- экспертная поверка, 128
- электродинамические приборы, 188
- электромагнитные приборы, 181
- электромеханические измерительные преобразователи, 161
- электронно-лучевая трубка, 236
 - характеристики, 237
- электронно-лучевые осциллографы, 235
- электронные
 - ваттметры, 214
 - вольтметры, 204
 - омметры, 212
 - счетчики активной энергии, 216
 - фазометры, 217
 - частотомеры, 216
- электростатические приборы, 184
- энтропия
 - исходная, 113
 - условная, 113
- эталон единицы величины, 118
 - вторичный, 121
 - копия, 122
 - свидетель, 122
 - сравнения, 122
 - государственный, 118
 - первичный, 121
 - специальный, 121
 - рабочий, 122
- эффективная оценка, 70

*Константин Константинович Ким,
Геннадий Николаевич Анисимов,
Владимир Юрьевич Барбарович,
Борис Яковлевич Литвинов*

**Метрология, стандартизация, сертификация
и электроизмерительная техника:
Учебное пособие**

Заведующий редакцией
Руководитель проекта
Редактор
Художник
Корректор
Верстка

*А. Кривцов
В. Шачин
Н. Рощина
Е. Дьяченко
Н. Викторова
И. Смаришева*

Лицензия ИД № 05784 от 07.09.01.

Подписано в печать 01.02.06. Формат 70×100/16. Усл. п. л. 29,67.

Тираж 4000 экз. Заказ № 222.

Питер Принт, 194044, Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., д. 29а.

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции ОК 005-93, том 2;
953005 — литература учебная.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ФГУП «Печатный двор» им. А. М. Горького
Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям.
197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 15.