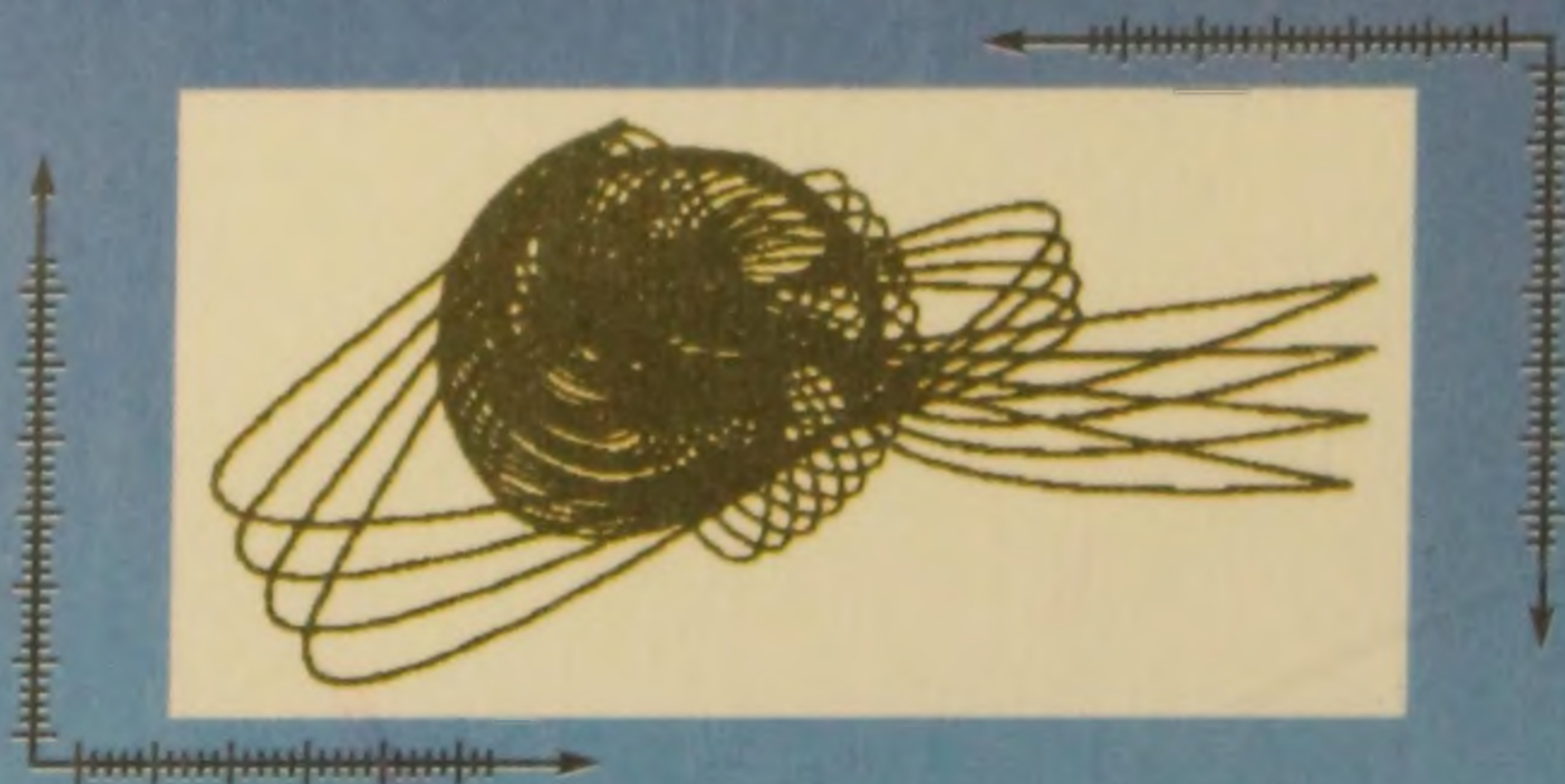


658.51
Т21

Д.Ф. ТАРТАКОВСКИЙ А.С. ЯСТРЕБОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ



Д.Ф. ТАРТАКОВСКИЙ, А.С. ЯСТРЕБОВ

652.51

Т21

У.З

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Допущено
Учебно-методическим
объединением по образованию
в области автоматки,
электроники, микроэлектроники
и радиотехники
в качестве учебника
для студентов вузов



Москва
"Высшая школа"
2002

658.516+658.562+53.08](075.8)

УДК 621.317.08

ББК 30.10

Т 21

Рецензенты:

кафедра «Метрологии» Северо-Западного политехнического института
(зав. кафедрой проф. И. Ф. Шипкин);
засл. деятель науки и техники РФ, проф. Е. Д. Колтик
(ВНИИМ им. Д. И. Менделеева)

Тартаковский, Д. Ф.

Т 21 Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов/Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. — М.: Высш. шк., 2002. — 205 с.: ил.

ISBN 5-06-003796-7

В учебнике рассмотрены основы метрологии, методы и средства измерений электрических и неэлектрических величин, основы стандартизации. Материал представлен с учетом современных достижений и тенденций развития теории измерений и измерительной техники. Изложение базируется на действующей нормативно-технической документации и рекомендациях международных организаций в области метрологии, измерительной техники и стандартизации в объеме, необходимом для квалифицированного решения проблемы метрологического обеспечения производства, конструирования и технологии радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств.

Для студентов радиотехнических, электротехнических, автоматики и вычислительной техники, электронных направлений и специальностей. Может быть полезен студентам других специальностей вузов, а также студентам техникумов, инженерно-техническим работникам и аспирантам.

УДК 621.317.08
ББК 30.10

ISBN 5-06-003796-7

© ФГУП «Издательство «Высшая школа», 2002

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства «Высшая школа», и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия издательства запрещается.

С. Тартаковский
Павлово-Посадский
И 86335

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	6
Введение.....	8
Часть I. Основы метрологии.....	12
Глава 1. Основные понятия и определения.....	12
1.1. Физическая величина.....	12
1.2. Измерение.....	14
1.3. Методы измерений.....	19
1.4. Средства измерений.....	21
1.5. Погрешность измерения.....	22
1.6. Классификация погрешностей.....	24
1.7. Принципы описания и оценивания погрешностей.....	26
Глава 2. Результаты и погрешности измерений.....	28
2.1. Систематические погрешности; обнаружение и исключение.....	28
2.2. Компенсация систематической погрешности в процессе измерения.....	31
2.3. Случайные погрешности. Вероятностное описание результатов и погрешностей.....	33
2.4. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Обработка данных.....	43
2.5. Прямые однократные измерения с точным оцениванием погрешности.....	46
2.6. Однократные измерения с приближенным оцениванием погрешности.....	48
2.7. Косвенные измерения.....	50
2.8. Совместные измерения.....	53
2.9. Оценивание достоверности контроля и погрешности испытаний.....	57
2.10. Международные рекомендации по оцениванию неопределенности результатов измерения.....	61
Часть II. Технические средства и методы измерений.....	63
Глава 3. Измерение электрического тока и напряжения.....	63
3.1. Общие сведения.....	63
3.2. Классы точности средств измерения.....	65
3.3. Электромеханические приборы.....	68
3.4. Компенсаторы постоянного тока.....	79
3.5. Электронные аналоговые вольтметры.....	81
3.6. Цифровые электронные вольтметры.....	84
Глава 4. Осциллографы.....	89
4.1. Электронно-лучевой осциллограф.....	89
4.2. Цифровые осциллографы.....	94

Г л а в а 5. Измерение параметров элементов электрических цепей	96
5.1. Общие сведения.....	96
5.2. Метод вольтметра-амперметра.....	96
5.3. Электронные омметры.....	100
5.4. Измерительные мосты постоянного тока.....	102
5.5. Измерительные мосты переменного тока.....	106
5.6. Резонансный метод измерения.....	107
5.7. Метод дискретного счета. Цифровые приборы.....	109
Г л а в а 6. Измерение частоты электромагнитных колебаний	111
6.1. Общие сведения.....	111
6.2. Измерительные генераторы.....	112
6.3. Резонансный частотомер.....	115
6.4. Электронно-счетный частотомер.....	116
Г л а в а 7. Измерение фазового сдвига	119
7.1. Общие сведения.....	119
7.2. Осциллографические измерения фазового сдвига.....	120
7.3. Способ суммирования напряжений.....	122
7.4. Преобразование фазового сдвига во временной интервал.....	123
Г л а в а 8. Измерение параметров электромагнитной совместимости	125
8.1. Общие сведения.....	125
8.2. Измерение напряженности электромагнитного поля.....	126
8.3. Измерение мощности радиопомех.....	129
8.4. Ваттметры проходящей мощности.....	132
Г л а в а 9. Электрические измерения незлектрических величин	133
9.1. Общие сведения.....	133
9.2. Генераторные измерительные преобразователи.....	134
9.3. Параметрические измерительные преобразователи.....	138
Г л а в а 10. Элементы теории динамических измерений	143
10.1. Общие сведения.....	143
10.2. Полные динамические характеристики средств измерения.....	145
10.3. Коррекция динамических погрешностей.....	148
Г л а в а 11. Измерение геометрических размеров	149
11.1. Общие сведения.....	149
11.2. Механические средства измерения длины.....	150
11.3. Оптико-механические средства измерения длины.....	154
11.4. Средства и методы измерения углов.....	155
11.5. Измерение шероховатости поверхности.....	156
Ч а с т ь III. Основы квалиметрии и стандартизации	163
Г л а в а 12. Измерение и оценивание качества	163
12.1. Понятия и определения.....	163
12.2. Методы определения показателей качества.....	167
12.3. Формирование и аттестация экспертных комиссий.....	168
12.4. Способы получения экспертных оценок.....	170
12.5. Обработка данных экспертных оценок качества продукции.....	172

Глава 13. Государственная система стандартизации.....	174
13.1. Основные понятия и определения в области стандартизации.....	174
13.2. Цели и задачи стандартизации.....	175
13.3. Виды и методы стандартизации.....	176
13.4. Категории и виды стандартов.....	180
13.5. Основные принципы стандартизации.....	182
13.6. Органы и службы стандартизации.....	186
13.7. Государственные и отраслевые системы стандартов на общетехнические нормы, термины и определения.....	189
13.8. Международная стандартизация.....	196
13.9. Сертификация продукции.....	197
Заключение.....	200
Приложение 1.....	201
Приложение 2.....	203
Приложение 3.....	204
Список литературы.....	205

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка, изготовление и эксплуатация радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств неизбежно связаны с выполнением большого числа измерений. При этом получаемая измерительная информация используется как для собственно измерения, так и для выработки соответствующих управляющих сигналов, логических заключений и суждений в таких процедурах, как управление, контроль, диагностирование, идентификация и т.п. Очевидно, что выбор методов и средств измерения в каждом конкретном случае должен обеспечивать получение требуемых показателей качества конечного результата. Таким образом, перед специалистом встает задача правильного выбора метода и средства измерений, должной организации измерительного эксперимента, обработки и представления результатов измерений в соответствии с принципами метрологии и действующими в этой области нормативными документами. Повышение эффективности производства и улучшение качества разработок связано также с широким применением различных форм и методов стандартизации.

Отсюда следует необходимость соответствующей метрологической подготовки специалистов в области конструирования и технологии радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств, чтобы они могли решать многообразные измерительные задачи и обеспечивать соблюдение требований системы стандартов Государственной системы измерений в повседневной практической деятельности. Полученные знания позволят специалисту квалифицированно решать вопросы метрологической подготовки производства, метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации.

Учебник предназначен для подготовки дипломированных специалистов по направлению 654300 (специальностям 200800 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 220500 «Конструирование и технология электронно-вычислительных средств») и подготовки бакалавров и магистров по направлению 551100 «Проектирование и технология электронных средств» в соответствии с требованиями Государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования. Настоящий учебник может быть полезен студентам других технических специальностей и направлений подготовки, а также инженерно-техническим работникам и аспирантам.

Авторы считают приятным долгом выразить глубокую благодарность рецензентам — проф. Е.Д. Колтику и сотрудникам кафедры

«Метрология» (СЗПИ) за ценные замечания, сделанные при рецензировании учебника.

Введение, главы 1, 3 — 7 написаны докт. техн. наук Д.Ф. Тартаковским, главы 2, 8 — 11, заключение — докт. техн. наук А.С. Ястребовым, главы 12 и 13 — совместно Д.Ф. Тартаковским и А.С. Ястребовым.

Пожелания и замечания по содержанию учебника направлять по адресу: 127994, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, ГУП «Издательство «Высшая школа».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

В процессе познавательной деятельности человека возникает множество задач, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о том или ином свойстве объектов материального мира (явления, процесса, вещества, изделия). Основным способом получения такой информации являются измерения, при правильной организации и выполнении которых получают результат измерения с большей или меньшей точностью отражающий интересующие свойства объекта познания. Информация о свойствах и качествах объектов, полученная посредством измерений, называется *измерительной информацией*.

Студенты физических и инженерных специальностей высших учебных заведений, начиная уже с первого семестра, работают в лабораториях, выполняя лабораторные работы по профилю общетехнических и специальных кафедр. При этом в основе большинства лабораторных работ лежат измерения. Результаты любых измерений, как бы тщательно и на каком бы высоком уровне они не выполнялись, неизбежно содержат некоторые погрешности. Абсолютно точных измерений не может быть принципиально. Именно поэтому успешная работа студентов в лабораториях, наряду с изучением методов и средств измерений и приобретением навыков измерений, предполагает также их знакомство с современными методами математической обработки результатов измерений, анализа и оценивания погрешностей.

Подготавливаясь к будущей самостоятельной работе по профилю избранной специальности, студентам необходимо иметь в виду, что сегодня измерения пронизывают все сферы инженерного труда. С измерениями связана деятельность инженера-исследователя и инженера-технолога; инженер-конструктор обязан иметь ясное представление о возможностях измерительной техники, чтобы обеспечить взаимозаменяемость деталей и узлов, контролепригодность разрабатываемого изделия на всех стадиях его жизненного цикла. Измерительная информация является основой для принятия технических и управленческих решений при испытаниях продукции, оценивании ее технического уровня, аттестации и сертификации качества. Поэтому знание современных правил, норм и требований в области измерений также обязательно для специалистов, осуществляющих функции управления и организации производства.

Результат любого измерения заслуживает внимания лишь при условии, что он сопровождается оценкой погрешности измерения, либо дополняется сведениями, позволяющими потребителю измерительной информации оценить точность измерения самостоятельно. С другой сто-

роны, важно не только уметь выполнить измерение и оценить погрешность результата, но и так спланировать и осуществить процедуру измерения, чтобы обеспечить требуемую точность или свести погрешности к минимуму.

Говоря о точности измерений, следует заметить, что уровень точности, к которому надо стремиться, должен определяться критериями технической и экономической целесообразности. Известно, что увеличение точности измерения вдвое удорожает само измерение в несколько раз. В то же время снижение точности измерения в производстве ниже определенной нормы приводит к браку продукции. При назначении точности измерений важно также учитывать их значимость. В одних случаях недостаточная точность получаемой измерительной информации имеет небольшое или локальное значение, в других играет исключительно важную роль: от точности измерения может зависеть научное открытие или жизнь и здоровье людей.

С развитием науки, техники и разработкой новых технологий измерения охватывают все новые и новые физические величины, существенно расширяются диапазоны измерений как в сторону измерения сверхмалых значений, так и в сторону очень больших значений физических величин. Непрерывно повышаются требования к точности измерений; с высокой точностью необходимо измерять параметры и характеристики процессов в частотном диапазоне от инфранизких до сверхвысоких частот; при этом геометрические размеры объектов измерения многократно отличаются друг от друга (изделия микроэлектроники и изделия крупного машиностроения).

В этих условиях, чтобы успешно справиться с многочисленными и разнообразными проблемами измерений, необходимо освоить некоторые общие принципы их решения, нужен единый научный и законодательный фундамент, обеспечивающий на практике высокое качество измерений, независимо от того, где и с какой целью они производятся. Таким фундаментом является *метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

В настоящее время метрология (от греческих слов «метрон» — мера, «логос» — учение) развивается по нескольким направлениям. Если еще в начале XX века под словом метрология понималась наука, главной задачей которой было описание всякого рода мер, применяемых в разных странах, областях, городах, то теперь это понятие приобрело гораздо более широкий научный и практический смысл, расширилось содержание метрологической деятельности. Сформировались и развиваются две взаимосвязанные ветви метрологии: научная и законодательная метрология. Научная метрология, являясь базой измерительной техники, занимается изучением проблем измерения в целом и образующих измерение элементов: средств

измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений и др.

Ежедневно в стране выполняются миллионы измерений. Очевидно, что измерения, производимые с помощью разнообразных по принципу действия, методикам применения и точности средств измерения, могут быть полезны лишь тогда, когда их результатам можно доверять, когда результаты измерения, полученные разными экспериментаторами в разное время и в разных местах, можно при необходимости сопоставить, сравнить между собой. Другими словами — необходимо обеспечить единство измерений в масштабе от небольшого предприятия до государства в целом. Для этого метрология наделена законодательными функциями. Законодательная метрология разрабатывает и внедряет нормы и правила выполнения измерений, устанавливает требования, направленные на достижение единства измерений, порядок разработки и испытаний средств измерений, устанавливает термины и определения в области метрологии, единицы физических величин и правила их применения. Все эти нормы, правила и требования устанавливаются государственными стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (стандарты ГСИ) и другими обязательными к применению нормативно-техническими документами.

В сферу деятельности современной метрологии входит и определение наиболее точных значений важнейших физических констант (скорости света, ускорения силы тяжести и др.), необходимых для многих отраслей науки и техники. Метрология обеспечивает потребителей стандартными образцами веществ и материалов, состав и физико-химические характеристики которых определены с необходимой точностью. Методы метрологии широко используются в смежных отраслях знаний, таких, как оценивание и контроль качества продукции, сертификация промышленной продукции, аттестация программ и алгоритмов обработки данных и др.

Попадая на производство, специалист, будучи прямо или косвенно связан по работе с измерениями, сталкивается с обилием измерительных задач, нормативных документов общетехнического и метрологического содержания, исполнение которых обязательно (стандарты, методические указания, инструкции). Облегчить ему изучение методов и средств измерений и выполнение требований этих документов должно изучение дисциплины «Метрология, стандартизация и технические средства измерений».

Однако само по себе знание метрологических правил и норм еще не дает гарантии успешной инженерной деятельности. Совершенно необходимо изучить и освоить методы измерений и основные принципы построения средств измерения физических величин. При этом на первое место следует поставить знание методов измерения. Это обусловлено тем, что именно методы измерений и физические принципы работы приборов являются наиболее постоянными компонентами, тогда как кон-

кретные схемные решения и элементная база средств измерения непрерывно изменяются и совершенствуются.

В последние годы сформировалось учение о методах и приемах измерения (точнее, оценивания) качества — квалиметрия. Методологическая общность классической метрологии и квалиметрии делает обоснованным изложение элементов квалиметрии в рамках данной дисциплины.

Материал учебника включает в себя четыре взаимосвязанные части, обеспечивающие в совокупности необходимый уровень подготовки специалистов в области конструирования и технологии радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств по метрологии, стандартизации и измерительной технике.

В первой части учебника излагаются основы метрологии, усвоение которых позволит студенту осознанно подойти к изучению методов и средств измерения наиболее распространенных физических величин, к анализу результатов и погрешностей измерений.

Методы и средства измерения физических величин изложены во второй части учебника. Третья часть посвящена основам квалиметрии; в четвертой части рассматриваются вопросы стандартизации, знание которых совершенно необходимо любому инженеру-исследователю, конструктору, технологу.

Часть I

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

Глава I

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА

Бесконечное множество физических объектов, окружающих нас, обладает бесконечным множеством различных качеств и свойств. Из этого огромного количества человек выделяет некоторое ограниченное число свойств, общих в качественном отношении для ряда однородных объектов и достаточных для их описания. В каждом таком качестве, в свою очередь, может быть выделено множество градаций. Если мы в состоянии установить размер градации, т.е. единицу данного свойства, и физически реализовать ее в виде меры или шкалы, то сопоставив размер интересующего нас свойства объекта с такой мерой или со шкалой, мы получим его количественную оценку. Свойства, для которых могут быть установлены и воспроизведены градации определенного размера, называются *физическими величинами*.

В стандарте на термины и определения в области метрологии физическая величина определена как свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них.

Качественная сторона понятия физическая величина определяет «род» величины (длина, как характеристика протяженности вообще; электрическое сопротивление, как общее свойство проводников электричества и т.п.), а количественная — ее «размер» (длина конкретного предмета, сопротивление конкретного проводника). Размер физической величины существует объективно, независимо от того, знаем мы его или не знаем.

Целью измерения и его конечным результатом является нахождение значения физической величины. *Значение физической величины* — оценка физической величины в принятых для измерения данной величины единицах. Понятно, что числовое значение результата измерения будет зависеть от выбора единицы физической величины. Так, в известном мультипликационном фильме «38 попугаев» для измерения длины удава в

качестве единицы длины была выбрана длина попугая и результат измерения составил 38 попугаев. Если же за единицу длины выбрать законенную единицу — метр, то числовое значение длины удава будет иным, хотя размер его остался прежним.

Метрология изучает и имеет дело только с измерениями физических величин, т.е. величин, для которых может существовать физически реализуемая и воспроизводимая единица величины. Однако нередко к измерениям неправомерно относят различного рода оценивания таких свойств, которые формально хотя и подпадают под приведенное определение физической величины, но не позволяют реализовать соответствующую единицу. Так, широко распространенную в психологии оценку умственного развития человека называют измерением интеллекта; оценку качества продукции — измерением качества. И хотя в этих процедурах частично используются метрологические идеи и методы, они не могут квалифицироваться как измерения в том смысле, как это принято в метрологии: невозможно себе представить единицу интеллекта или единицу качества, которые к тому же можно было бы реализовать в виде определенной физической меры. Таким образом, в дополнение к приведенному определению, подчеркнем, что возможность физической реализации единицы является определяющим признаком понятия «физическая величина».

Приведем еще ряд терминов, относящихся к понятию «физическая величина» и используемых в последующих разделах учебника.

В теории измерений вводятся понятия истинного измеренного и действительного значения физической величины.

Нахождение *истинного значения измеряемой физической величины* является центральной проблемой метрологии. Стандарт определяет истинное значение как значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Одним из постулатов метрологии является положение о том, что истинное значение физической величины существует, однако определить его путем измерения невозможно.

В обычном представлении под истинным понимается некое детерминированное значение физической величины, отражающее свойство объекта, абсолютно адекватно. Однако измерение как процесс познания количественных определенностей материального мира не должно абстрагироваться от физической природы изучаемых свойств и обязано учитывать те качественные границы, внутри которых те или иные определения имеют смысл.

Рассмотрим пример измерения диаметра круглого диска. Казалось бы, что измерение диаметра диска можно проводить со все более и более высокой точностью, стоит лишь выбрать соответствующие по точности средства измерений. Но когда погрешность средства измерения станет порядка размеров молекулы, мы обнаружим, что наблюдается как бы размывание краев диска, обусловленное хаотическим движением моле-

кул и за каким-то пределом точности само понятие диаметра диска теряет свой первоначальный смысл, и дальнейшее повышение точности измерения бесполезно. Очевидно, что понятие «истинного» значения диаметра в этом случае приобретает совсем иной, вероятностный, смысл и можно лишь с определенной вероятностью установить интервал значений, в котором оно находится. Следовательно, приведенное в стандарте определение истинного значения может быть применено лишь для объектов макромира.

Поскольку истинное значение физической величины определить невозможно, в практике измерений оперируют понятием действительного значения. *Действительное значение* — значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели может быть использовано вместо него. Под *измеренным значением* понимается значение величины, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерения.

Измеряемая физическая величина — физическая величина, подлежащая измерению в соответствии с поставленной измерительной задачей.

Влияющая физическая величина — физическая величина, непосредственно не измеряемая средством измерения, но оказывающая влияние на него или на объект измерения таким образом, что это приводит к искажению результата измерения. Так, например, при измерении сопротивления резистора влияющей величиной может быть температура, если сопротивление резистора зависит от температуры.

Физический параметр — физическая величина, характеризующая частную особенность измеряемой величины. Например, при измерении напряжения переменного тока в качестве параметров напряжения могут выступать амплитуда колебаний, мгновенное значение напряжения, среднее квадратическое значение и др.

Постоянная величина — физическая величина, размер которой по условиям измерительной задачи можно считать не изменяющимся за время, превышающее длительность измерения.

Переменная величина — физическая величина, изменяющаяся по размеру в процессе измерения.

1.2. ИЗМЕРЕНИЕ

Понятие «измерение» интерпретируется по-разному. Чтобы уяснить, что понимается под измерением в метрологии, рассмотрим типы шкал, на основе которых формируется представление об объекте.

Различают четыре типа шкал: шкала наименований, шкала порядка, шкала интервалов и шкала отношений.

Шкала наименований основана на приписывании объекту цифр (знаков), играющих роль простых имен: это приписывание служит для нумерации предметов только с целью их идентификации или для нумерации классов, причем, такой нумерации, что каждому из элементов

соответствующего класса приписывается одна и та же цифра. Такое приписывание цифр выполняет на практике ту же функцию, что и наименование. Поэтому с цифрами, используемыми только как специфические имена, нельзя производить никаких арифметических действий. Если, например, один из резисторов обозначен в схеме R_6 , а другой R_{18} , то из этого нельзя сделать заключение, что значения их сопротивления отличаются втрое, а можно лишь установить, что оба они относятся к классу резисторов.

Шкала порядка предполагает упорядочение объектов относительно какого-то определенного их свойств, т.е. расположение их в порядке убывания или возрастания данного свойства. Полученный при этом упорядоченный ряд называют ранжированным рядом, а саму процедуру *ранжированием*.

По шкале порядка сравниваются между собой однородные объекты, у которых значения интересующих свойств неизвестны. Поэтому ранжированный ряд может дать ответ на вопросы типа — «что больше (меньше)» или, «что лучше (хуже)». Более подробную информацию — насколько больше или меньше, во сколько раз лучше или хуже, шкала порядка дать не может. Очевидно, что назвать процедуру оценивания свойств объекта по шкале порядка измерением можно только с большой натяжкой.

Результаты оценивания по шкале порядка также не могут подвергаться никаким арифметическим действиям. Однако небольшое, казалось бы, усовершенствование шкалы порядка позволило применить ее для числового оценивания величин в тех случаях, когда отсутствует единица величины. Для этого, расположив объекты в порядке возрастания (убывания) того или иного свойства, некоторые точки ранжированного ряда фиксируют в качестве отправных (реперных). Совокупность реперных точек образует некую «лестницу» — шкалу возможных проявлений соответствующего свойства. Реперным точкам могут быть поставлены в соответствие цифры, называемые баллами и, таким образом, появляется возможность оценивания, «измерения» данного свойства в баллах, по натуральной шкале. Так, для измерения скорости ветра в 1805 г. Бофортом была предложена натуральная шкала скорости ветра в «баллах Бофорта» (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Баллы	Название	Действие	Скорость, м/с
0	Штиль	Дым идет вертикально	0–0,9
1	Тихий	Дым идет слегка наклонно	0,9–2,4
2	Легкий	Ощущается лицом, шелестят листья	2,4–4,4
11	Жестокий шторм	Большие разрушения	30,5–34,8
12	Ураган	Опустошительное действие	34,8–39,2

С развитием методов и средств измерения физических величин условным баллам натуральной шкалы ставятся в соответствие числовые значения в принятых для данной величины единицах. Так, шкала Бофорта использовалась до 1964 г., когда международным соглашением был принят ее перевод в скорость ветра, измеряемую в метрах в секунду.

По натуральным шкалам до сих пор оцениваются интенсивность землетрясений, морское волнение, твердость минералов и некоторые другие величины.

Основным недостатком натуральных шкал является полное отсутствие уверенности в том, что интервалы между выбранными реперными точками являются равновеликими, а следовательно, в такой шкале невозможно вычленить единицу величины и оценить погрешность полученной оценки.

Шкала интервалов отличается от натуральной тем, что для ее построения вначале устанавливают единицу физической величины. На шкале интервалов откладывается разность значений физической величины, сами же значения остаются неизвестными.

Примерами шкал интервалов являются шкалы температур. На температурной шкале Цельсия за начало отсчета разности температур принята температура таяния льда. С ней сравниваются все другие температуры. Для удобства пользования шкалой интервал между температурой таяния льда и температурой кипения воды разделен на 100 равных интервалов — градусов. Шкала Цельсия распространяется как в сторону положительных, так и отрицательных интервалов. Когда говорят, что температура воздуха равна 25°C , это означает, что она на 25 градусов выше температуры, принятой за нулевую отметку шкалы (выше нуля).

На температурной шкале Фаренгейта тот же интервал разбит на 180 градусов. Следовательно, градус Фаренгейта по размеру меньше, чем градус Цельсия. Кроме того, начало отсчета интервалов на шкале Фаренгейта сдвинуто на 32 градуса в сторону низких температур.

Деление шкалы интервалов на равные части — градации — устанавливает единицу физической величины, что позволяет не только выразить результат измерения в числовой мере, но и оценить погрешность измерения.

Результаты измерений по шкале интервалов можно складывать друг с другом и вычитать друг из друга, т.е. определять, на сколько одно значение физической величины больше или меньше другого. Определить по шкале интервалов, во сколько раз одно значение величины больше или меньше другого, невозможно, поскольку на шкале не определено начало отсчета физической величины. Но в то же время это может быть сделано в отношении интервалов (разностей). Так, разность температур 25 градусов в 5 раз больше разности температур 5 градусов.

Шкала отношений представляет собой интервальную шкалу с естественным началом. Если, например, за начало температурной шкалы принять абсолютный нуль (более низкой температуры в природе быть не может), то по такой шкале уже можно отсчитывать абсолютное значение температуры и определять не только, на сколько температура T_1 одного тела больше температуры T_2 другого, но и во сколько раз больше или (меньше) по правилу:

$$T_1/T_2 = n.$$

В общем случае, при сравнении между собой двух физических величин X по такому правилу значения n , расположенные в порядке возрастания или убывания, образуют шкалу отношений. Она охватывает интервал значений n от 0 до ∞ и, в отличие от шкалы интервалов, не содержит отрицательных значений.

Шкала отношений является самой совершенной, наиболее информативной. Результаты измерений по шкале отношений можно складывать между собой, вычитать, перемножать или делить.

Прежде чем сформулировать принятое в метрологии определение понятия «измерение», отметим следующее. Измерять можно лишь свойства реально существующих объектов познания, отражаемые физическими величинами. Измерение основывается на экспериментальных процедурах; никакие теоретические рассуждения или расчеты сами по себе не могут классифицироваться, как измерение. Для проведения измерительного эксперимента необходимы особые технические средства — средства измерений. Результатом измерения является оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц. С учетом этих положений принято следующее определение.

Измерение — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

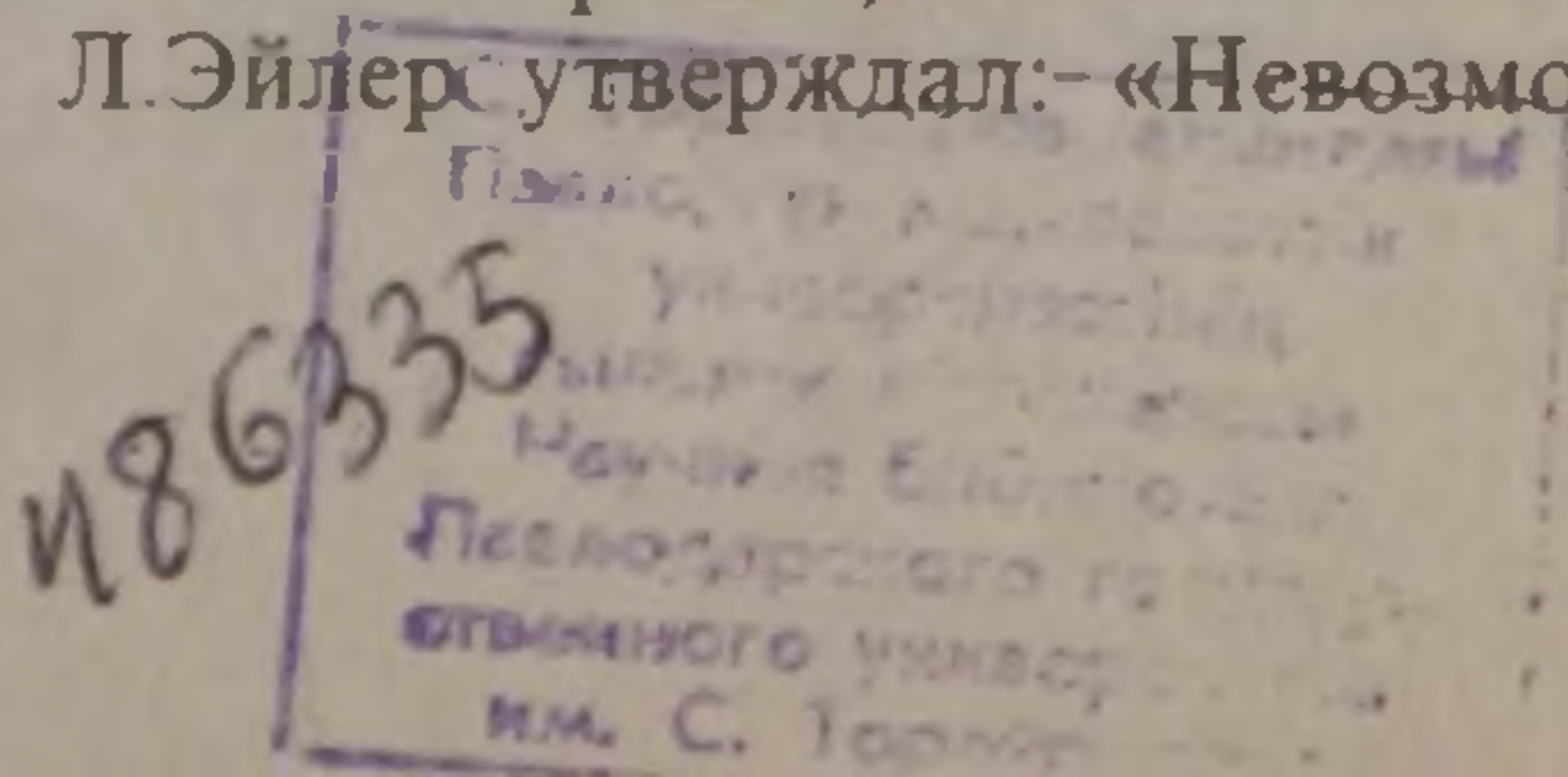
Раскрывая техническую сторону измерения, это определение не отвечает на вопрос о его метрологической сущности. Несмотря на то что измерения непрерывно развиваются, становятся все более и более сложными, а само определение дополняется с использованием терминологии кибернетики и теории информации, их метрологическая суть остается без изменения и сводится к уравнению измерения

$$X = n [x], \text{ или } n = X / [x], \quad (1.1)$$

где X — измеряемая величина, $[x]$ — единица величины, n — число.

Поэтому необходимо понимать, что любое измерение как познавательный процесс заключается в сравнении путем физического эксперимента данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения, т.е. с мерой.

Такой подход выработан практикой измерений, исчисляемой сотнями лет. Еще великий математик Л.Эйлер утверждал: «Невозможно



определить или измерить одну величину иначе как приняв в качестве известной другую величину этого же рода и указав соотношение, в котором они находятся».

Возвращаясь к описанию типов шкал, констатируем, что данному условию (т.е. понятию измерение) отвечают лишь процедуры определения разностей величин по шкале интервалов или величины по шкале отношений.

Основываясь на приведенном определении измерения, можно формально утверждать, что понятию «измерение» соответствует лишь такой информационный процесс, при котором измерительная информация, возникающая при взаимодействии средства измерения с объектом измерения, преобразуется так, чтобы в итоге получить результат измерения в виде именованного числа (220 В, 15 см) в явном виде. Однако в технике широко распространены информационные структуры и процессы, в которых измерительная информация необходима и используется в форме сигнала измерительной информации (например, электрического) и является исходной для решения задач, конечной целью которых является не получение оценки значения физической величины в принятых единицах, а формирование на основе обработки и анализа этого сигнала определенных суждений, логических заключений об объекте (типа «годен — не годен», «исправен — неисправен», «больше — меньше»). К числу таких задач относятся контроль качества, диагностирование технического состояния систем и машин, управление технологическими процессами и др. Процессы получения измерительной информации в форме сигнала измерительной информации также относят к измерениям при условии, что эта информация получена с помощью технических средств путем сравнения измеряемой физической величины с ее единицей.

Измерения, как экспериментальные процедуры весьма разнообразны и классифицируются по разным признакам.

По способу нахождения искомого значения измеряемой величины различают прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения.

Прямое измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно по показаниям средства измерений (измерение тока амперметром, промежутка времени — секундомером).

Косвенное измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят расчетом на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, функционально связанными с искомой и определяемыми посредством измерений. Другими словами, искомое значение физической величины рассчитывают по формуле, а значения величин, входящих в формулу, получают измерениями (измерение мощности, рассеиваемой на сопротивлении, может быть выполнено расчетом по формуле $P = I^2 R$ на основании измерения тока I и сопротивления резистора R).

Совместные измерения — одновременные измерения двух или нескольких разнородных величин для установления зависимости между ними (ряд одновременных, прямых измерений электрического сопротивления проводника и его температуры для установления зависимости сопротивления от температуры).

Совокупные измерения — производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин (нахождение значений массы отдельных гирь набора по известному значению массы одной из гирь: сравнивая массы различных сочетаний гирь, получают систему уравнений, из решения которой находят массу каждой из гирь, входящих в набор).

Значение физической величины может быть найдено посредством однократного ее измерения, либо путем нескольких, следующих друг за другом измерений с последующей статистической обработкой их результатов. В первом случае измерения называют *однократными* или *простыми*, во втором — *измерениями с многократными наблюдениями* или *статистическими*. При этом под наблюдением понимают однократный отсчет показания средства измерений.

По режиму работы средства измерения различают статические и динамические измерения. Любое средство измерений, как материальная система, обладает инерцией (механической, тепловой, электрической) и, следовательно, не может мгновенно реагировать на изменение измеряемой величины. Поэтому при измерении переменной физической величины инерция средства измерения приведет к некоторому отставанию показаний средства измерения от истинного значения величины в каждый момент времени. Очевидно, что это отставание будет зависеть не только от инерционных (динамических) свойств средств измерений, но и от скорости изменения самой измеряемой величины. В том случае, когда показания средства измерения не зависят от его динамических свойств, или когда этой зависимостью можно пренебречь, говорят, что средство измерения работает в статическом режиме, а само измерение называют *статическим*. В противном случае измерение относят к *динамическим*.

1.3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Под методом измерений понимают совокупность приемов использования принципов и средств измерений, выбранную для решения конкретной измерительной задачи. В понятие метода измерений входят как теоретическое обоснование принципов измерения, так и разработка приемов применения средств измерения.

Как известно, искомое значение физической величины находится посредством сопоставления ее с мерой, материализующей единицу этой величины. В зависимости от способа применения меры

различают методы непосредственной оценки и методы сравнения. При измерении *методом непосредственной оценки* искомое значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству средства измерения, которое проградуировано в соответствующих единицах. *Метод сравнения с мерой* — метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (например, сравнение массы на рычажных весах). Отличительной чертой методов сравнения является непосредственное участие меры в процедуре измерения, в то время как в методе непосредственной оценки мера в явном виде при измерении не присутствует, а ее размеры перенесены на отсчетное устройство (шкалу) средства измерения заранее, при его градуировке. Обязательным в методе сравнения является наличие сравнивающего устройства.

Метод сравнения с мерой имеет несколько разновидностей: нулевой метод, дифференциальный метод, метод замещения и метод совпадений.

Нулевой метод (или метод полного уравнивания) — метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и встречного воздействия меры на сравнивающее устройство сводят к нулю.

Пример. Измерение массы на равноплечих весах, когда воздействие на весы массы m_x полностью уравнивается массой гирь m_0 (рис. 1.1, а).

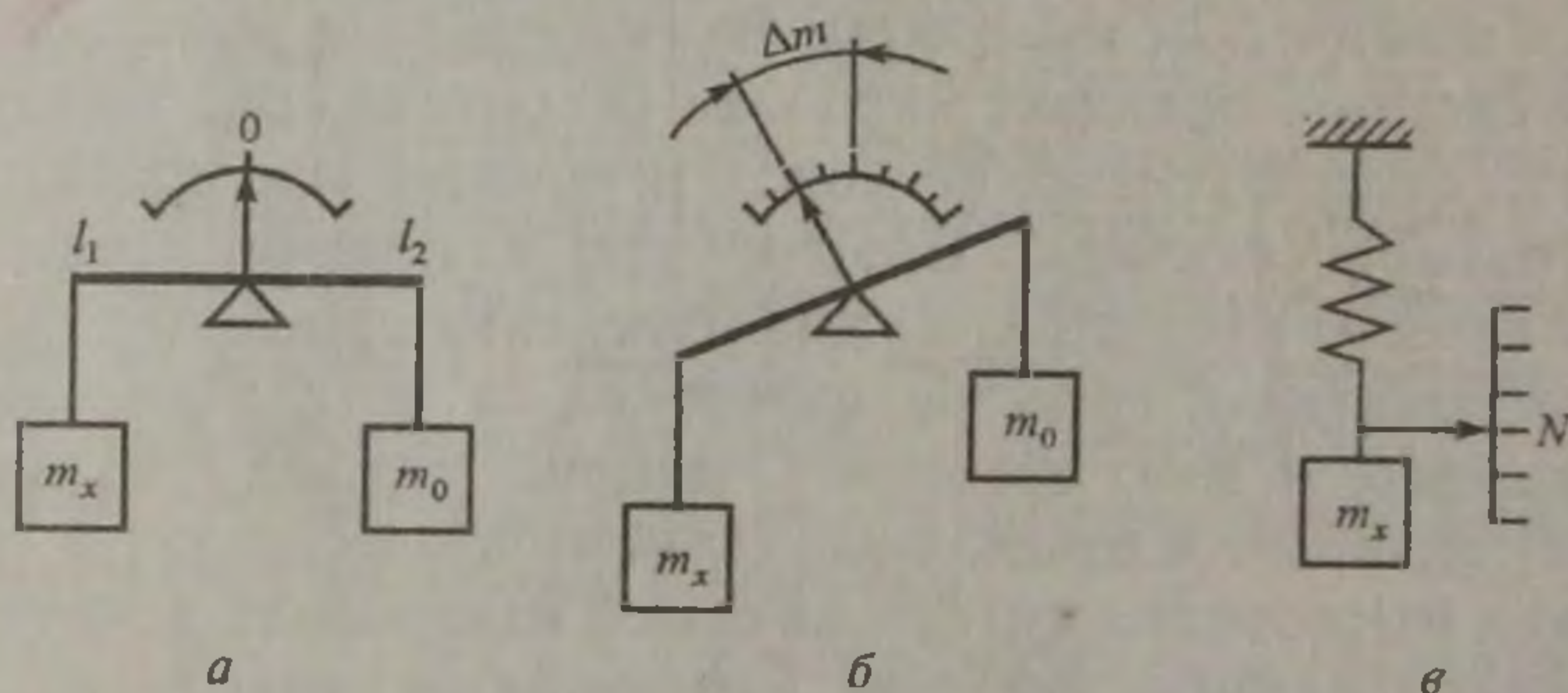


Рис. 1.1. Методы сравнения

При *дифференциальном методе* полное уравнивание не производят, а разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, отсчитывается по шкале прибора.

Пример. Измерение массы на равноплечих весах, когда воздействие массы m_x на весы частично уравнивается массой гирь m_0 , а разность масс отсчитывается по шкале весов, градуированной в единицах массы (рис. 1.1, б). В этом случае значение измеряемой величины $m_x = m_0 + \Delta m$, где Δm — показания весов.

Метод замещения — метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

Пример. Взвешивание на пружинных весах. Измерение производят в два приема. Вначале на чашу весов помещают взвешиваемую массу и отмечают положение указателя весов; затем

массу m , замещают массой гирь m_0 , подбирая ее так, чтобы указатель весов установился точно в том же положении, что и в первом случае. При этом ясно, что $m_x = m_0$ (рис. 1.1, в).

В *методе совпадений* разность между измеряемой величиной и величиной воспроизводимой мерой измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов.

Пример. Измерение числа оборотов вала с помощью стробоскопа – вал периодически освещается вспышками света, и частоту вспышек подбирают так, чтобы метка, нанесенная на вал, казалась наблюдателю неподвижной. Метод совпадений, использующий совпадения основной и нониусной отметок шкал, реализуется в штангенприборах, применяемых для измерения линейных размеров.

1.4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Общим термином *средства измерений* называют технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики, т.е. характеристики, влияющие на результаты и на точность измерений. По конструктивному исполнению и форме представления измерительной информации средства измерений подразделяются на меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы, измерительные преобразователи.

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения одного или нескольких фиксированных значений физической величины (мера массы – гиря, мера индуктивности – образцовая катушка индуктивности, многозначная мера индуктивности – магазин индуктивностей).

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. В зависимости от формы представления информации различают аналоговые и цифровые приборы. Аналоговым называют измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией измеряемой величины, например, стрелочный вольтметр, ртутно-стеклянный термометр. В цифровом приборе осуществляется преобразование аналогового сигнала измерительной информации в цифровой код, и результат измерения отражается на цифровом табло.

Измерительная установка — совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем и расположенная в одном месте.

Измерительная система — совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в системах управления, контроля, диагностирования и т.п.

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для преобразования сигналов измерительной информации в

форму, целесообразную для передачи, обработки или хранения. Измерительная информация на выходе измерительного преобразователя, как правило, недоступна для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные преобразователи очень разнообразны, однако, все они обладают нормированными метрологическими характеристиками. Так, к измерительным преобразователям относятся термодпары, измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные усилители и др.

1.5. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Любые измерения направлены на получение результата, т.е. оценки истинного значения физической величины в принятых единицах. Вследствие несовершенства средств и методов измерений, воздействия внешних факторов и многих других причин результат каждого измерения неизбежно отягощен погрешностью. Качество измерения тем выше, чем ближе результат измерения оказывается к истинному значению. Количественной характеристикой качества измерений является *погрешность измерения*, определяемая как разность между измеренным $x_{\text{изм}}$ и истинным $x_{\text{ист}}$ значениями измеряемой величины

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{ист}}, \quad (1.2)$$

где Δx — погрешность измерения.

Строго говоря, применение формулы (1.2) для вычисления погрешности измерения невозможно, поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно. Поэтому это выражение погрешности используется только в теоретических исследованиях, а на практике $x_{\text{ист}}$ заменяется на его оценку — действительное значение величины $x_{\text{д}}$, и погрешность рассчитывается по формуле

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{д}}, \quad (1.3)$$

Поскольку действительное значение измеряемой величины только с той или иной степенью приближения заменяет истинное, то погрешность измерения, найденная относительно действительного значения, будет отличаться от погрешности измерения, которая могла бы быть найдена относительно истинного значения и является приближенной оценкой «истинной» погрешности измерения. При вычислении погрешностей слово оценка излишне и применять его нет необходимости. Имея в виду сказанное, в последующем изложении мы все же будем для простоты применять термин «истинное» значение вместо действительного.

Погрешность, выраженная в соответствии с формулами (1.2) и (1.3), имеет размерность измеряемой величины и называется *абсолютной погрешностью*. Используется также понятие *относительной погрешности* — погрешности, выраженной в долях измеряемой величины. Относительные погрешности выражаются принятыми в системе СИ относительными величинами: безразмерным числом, в процентах и др.

Понятие погрешности характеризует как бы несовершенство измерения. Позитивной характеристикой качества измерений является точность измерения. Точность и погрешность связаны обратной зависимостью — измерение тем более точно, чем меньше его погрешность. Количественно точность выражается числом, равным обратному значению относительной погрешности. Так, если погрешность измерения составляет $2 \cdot 10^{-5}$, то точность его $5 \cdot 10^4$.

Стандартизованной является оценка качества измерения с указанием погрешности. При этом предпочтение отдается выражению погрешности измерения в форме относительной погрешности, как наиболее информативной, дающей возможность объективно сопоставлять результаты и оценивать качество измерений, выполненных в разное время или разными экспериментаторами. В самом деле, измерив длину стержня $l_1 = 1000$ мм с погрешностью 10 мм (т.е. с относительной погрешностью 0,01 или 1%) и расстояние между двумя станциями метро $l_2 = 1$ км с такой же абсолютной погрешностью 10 мм (т.е. с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-5}$ или $1 \cdot 10^{-3}$ %), мы делаем заключение, что хотя абсолютная погрешность измерения в обоих случаях одинакова, первое измерение является достаточно грубым, а второе выполнено с высокой точностью.

Будучи важнейшей характеристикой результата измерения, определяющей степень доверия к нему, погрешность должна быть обязательно оценена. Для разных видов измерений задача оценивания погрешности может решаться по-своему, погрешность результата измерения может оцениваться с разной точностью, на основании разной исходной информации. В соответствии с этим различают измерения с «точным» (в смысле, с наивысшей достижимой точностью), приближенным и предварительным оцениванием погрешностей.

При измерениях с «точным» оцениванием погрешности учитываются индивидуальные метрологические свойства и характеристики каждого из примененных средств измерения, анализируется метод измерений, контролируются условия измерений с целью учета их влияния на результат измерения.

При измерениях с приближенным оцениванием погрешностей учитывают лишь нормативные, типовые метрологические характеристики средств измерения и оценивают влияние на результат измерения лишь отклонений условий измерения от нормальных.

Измерения с предварительным оцениванием погрешностей выполняются по типовым методикам выполнения измерений, регламентированным нормативно-технической документацией, в которых указываются методы и условия измерений, типы и погрешности используемых средств измерений и, на основе этих данных, заранее оценена и указана в методике возможная погрешность результата.

В инженерной практике обычно имеют дело с двумя последними видами измерений и приемами оценивания погрешностей результата измерения, относящимся к категории — технические измерения.

1.6. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Погрешность результата каждого конкретного измерения складывается из многих составляющих, обязанных своим происхождением различным факторам и источникам. Традиционный аналитический подход к оцениванию погрешностей результата состоит в выделении этих составляющих, изучении их по отдельности и последующем суммировании. Зная свойства и оценив количественные характеристики составляющих погрешностей, можно правильно учесть их при оценивании погрешности результата или, если это возможно, ввести поправки в результат измерения. Выделив и оценив отдельные составляющие погрешности, иногда оказывается возможным так организовать измерение, чтобы эти составляющие не оказали влияния на результат. Естественно, что классифицировать составляющие погрешности можно по многим признакам. В целях единообразия подхода к анализу и оцениванию погрешностей в метрологии принята следующая классификация.

По характеру проявления во времени выделяют систематические и случайные составляющие погрешности (далее, для краткости, будем опускать слово составляющие там, где в этом нет необходимости).

Систематической погрешностью измерения называется погрешность, которая при повторных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях остается постоянной или закономерно изменяется.

Случайной погрешностью измерения называют погрешность, которая при повторных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях изменяется случайным образом по знаку и (или) величине. Источником систематической погрешности может послужить, например, неточное нанесение отметок на шкалу стрелочного прибора, деформация стрелки. Случайная составляющая погрешности возможна из-за трения в опорах подвижной части прибора, колебаний температуры окружающего воздуха, влияния магнитных и электрических промышленных помех и т.п.

Обязательными компонентами любого измерения являются средство измерения, метод измерения и человек, проводящий измерение. Несовершенство каждого из этих компонентов приводит к появлению своей составляющей погрешности результата. В соответствии с этим, по источнику возникновения различают *инструментальные, методические и личные погрешности*.

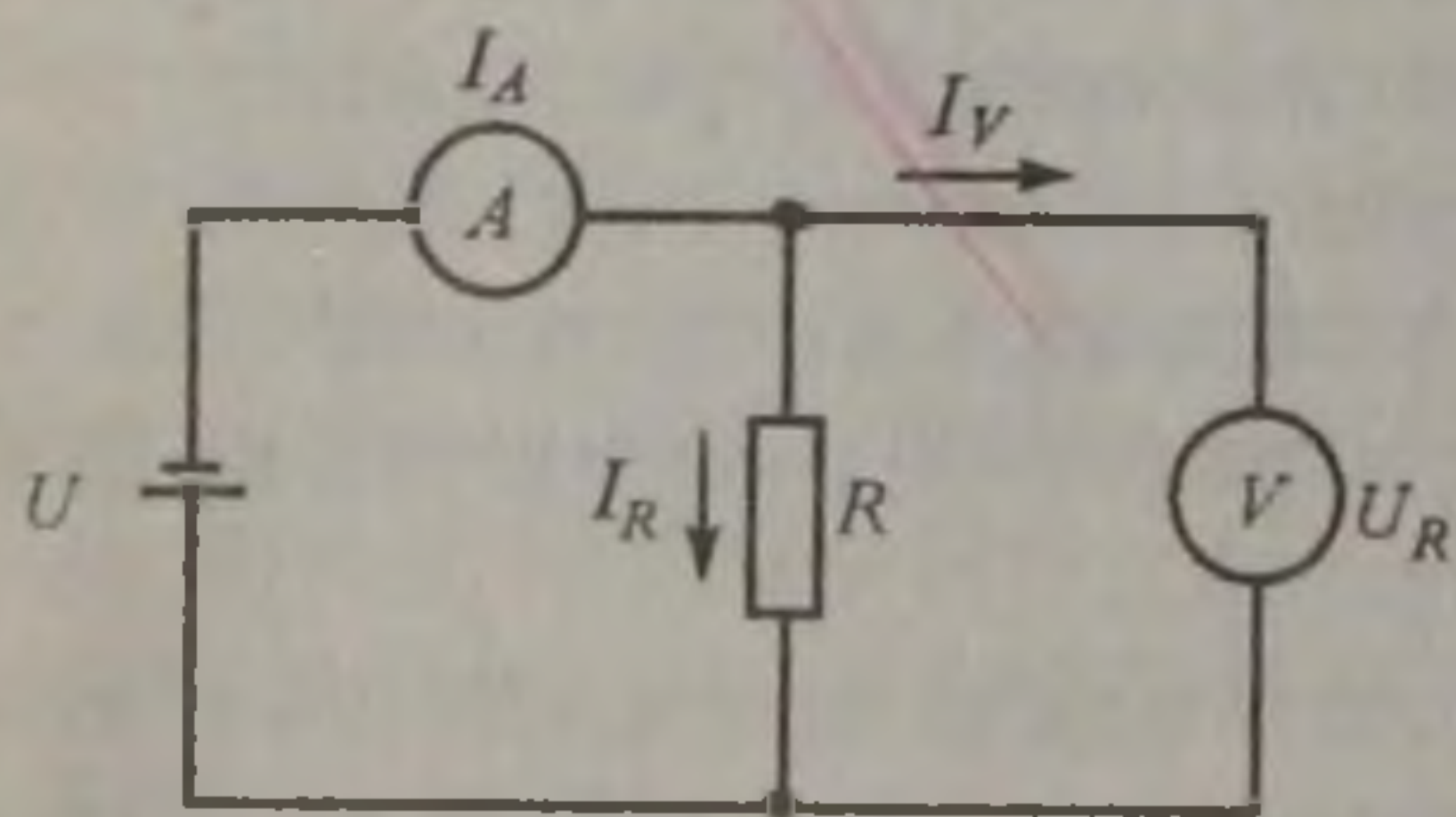


Рис. 1.2. Измерение сопротивления

Пример. На рис. 1.2 приведен вариант измерения сопротивления резистора методом вольтметра-амперметра. Для нахождения сопротивления R резистора необходимо измерить ток I_R , протекающий через резистор и падение напряжения U_R на резисторе. В приведенном варианте схемы, реализующей принятый метод, падение напряжения измеряется вольтметром действительно на резисторе, тогда как амперметр измеряет суммарный ток, протекающий через рези-

стор и через вольтметр. В результате, измеренное значение сопротивления будет не $R = \frac{U_R}{I_R}$, а $R' = \frac{U_R}{I_R + I_V}$ и методическая погрешность $\Delta R = R' - R$. Методическая погрешность стремится к нулю при $I_V \rightarrow 0$, т.е. при сопротивлении вольтметра $R_V \rightarrow \infty$.

Каждому из приборов, использованных при измерении, присущи определенные погрешности, причем в общей погрешности прибора может присутствовать и систематическая, и случайная составляющие. Очевидно, что эти составляющие окажут свое влияние на результат измерения, и их следует классифицировать как инструментальные. И, наконец, из-за отсутствия правильных навыков работы с приборами экспериментатор может внести в результат измерения личную составляющую погрешности из-за неточности отсчета доли деления по шкале, неточности отсчета из-за параллакса, невнимательности и др.

По условиям возникновения у средств измерения различают *основную и дополнительные погрешности*. Каждое средство измерений предназначено для работы в определенных условиях, указываемых в нормативно-технической документации. При этом отдельно указывают нормальные условия применения средств измерения, т.е. условия, при которых величины, влияющие на погрешности данного средства измерения, находятся в пределах нормальной области значений и рабочие условия применения — условия работы, при которых значения влияющих величин выходят за пределы нормальных, но находятся в пределах рабочих областей. Погрешность средства измерения, определенная при нормальных условиях, называется *основной*. Погрешность, обусловленную выходом значений влияющих величин за пределы нормальных значений, называют *дополнительной*.

Пример. Амперметр предназначен для измерения переменного тока с номинальной частотой (50 ± 5) Гц. Отклонение частоты за эти пределы приведет к дополнительной погрешности измерения.

Для оценивания дополнительных погрешностей в документации на средство измерений обычно указывают нормы изменения показаний при выходе условий измерения за пределы нормальных.

Выше мы определили статический и динамический режимы работы средства измерения. Соответственно, выделяют *статические и динамические составляющие погрешности*. Динамическая составляющая погрешности возникает при работе средства измерения в динамическом режиме и определяется двумя факторами: динамическими (инерционными) свойствами средства измерений и характером (скоростью) изменения измеряемой величины. При измерениях детерминированных сигналов динамические погрешности обычно рассматриваются как систематические. При случайном характере измеряемой величины динамические погрешности приходится рассматривать как случайные.

У средств измерений часто можно выделить составляющие погрешности, не зависящие от значения измеряемой величины и погрешности, изменяющиеся пропорционально измеряемой величине. Такие составляющие называют, соответственно, *аддитивными* и *мультипликативными* погрешностями. Аддитивной, например, является систематическая погрешность, вызванная неточной установкой нуля у стрелочного прибора с равномерной шкалой; мультипликативной — погрешность измерения отрезков времени отстающими или спешащими часами. Эта погрешность будет возрастать по абсолютной величине до тех пор, пока владелец часов не выставит их правильно по сигналам точного времени. Такая операция называется градуированием погрешности.

1.7. ПРИНЦИПЫ ОПИСАНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В основе современных подходов к оцениванию погрешностей лежат принципы, обеспечивающие выполнение требований единства измерений.

Для целей исследования и оценивания погрешность описывается с помощью определенной модели (систематическая, случайная, методическая, инструментальная и др.). На выбранной модели определяют характеристики, пригодные для количественного выражения тех или иных ее свойств. Задачей обработки данных при измерениях и является нахождение оценок этих характеристик.

Характеристики погрешности (показатели точности) оценивают приближенно; точность оценок согласовывается с целью измерения.

Погрешности (показатели точности) оценивают сверху; в то же время, верхняя оценка погрешности должна быть реалистичной, не слишком завышенной.

Выбор модели погрешности обусловлен сведениями об ее источниках как априорными, так и полученными в ходе измерительного эксперимента. Модели разделяют на детерминистские и недетерминистские (случайные). Для систематических погрешностей справедливы детерминистские модели, при которых систематическая погрешность по определению может быть представлена постоянной величиной, либо известной зависимостью (линейная, периодическая и другие функции от времени или номера наблюдения). Общей моделью случайной погрешности служит случайная величина, обладающая функцией распределения вероятностей.

Характеристики случайной погрешности делят на точечные и интервальные. Для описания погрешностей результата измерения чаще всего используют *интервальные оценки*. Это означает, что границы, в которых может находиться погрешность, находят как отвечающие некоторой вероятности. В этом случае границы погрешности называют доверительными границами, а вероятность, соответствующую доверительной погрешности, — доверительной вероятностью. Однако в некоторых случаях, когда нет возможности или необ-

ходимости оценить доверительные границы погрешности (например, неизвестна функция распределения вероятностей погрешности), используют точечные характеристики. Так, точечной характеристикой являются среднее квадратическое отклонение случайной погрешности, дисперсия.

В целях единообразия представления результатов и погрешностей измерений показатели точности и формы представления результатов измерений стандартизованы.

Сформулированные положения определяют особенности обработки данных, получаемых при измерениях, как прикладной математической задачи: во-первых, обработке подвергают принципиально неточные данные; во-вторых, точность методов обработки должна быть согласованна с требуемой точностью результата измерения и точностью исходных данных.

Распространенной ошибкой при оценивании результатов и погрешностей измерений является вычисление их и запись с чрезмерно большим числом значащих цифр. Этому способствует использование для расчетов средств вычислительной техники, позволяющих практически без лишних затрат труда и времени получать результаты расчета с четырьмя и более значащими цифрами.

Необходимо помнить, что поскольку погрешности измерений определяют лишь зону недоверности, неопределенность результатов, т.е. дают представление о том, какие цифры в числовом значении результата являются сомнительными, их (погрешности) не требуется знать очень точно. Для технических измерений допустимой считается погрешность оценивания погрешности в 15...20%.

В самом деле, вычислив значение погрешности равным 0,43293 и результата измерения 19,82256, следует задуматься, имеет ли смысл запись результата с такой погрешностью. Ведь если исходить из того, что недоверность результата уже характеризуется десятными долями (0,4...), то очевидно, что вклад последующих значащих цифр в оцененную погрешность будет все менее и менее весом и ничего не прибавит к информации об измеряемой величине. С учетом этого необходимо ограничивать и число значащих цифр в записи результата измерения.

Стандартом установлено, что в численных показателях точности измерений (в том числе и в погрешности) должно быть не более двух значащих цифр.

При записи результатов измерений наименьшие разряды числовых значений результата измерения и численных показателей точности должны быть одинаковы. В приведенном примере, следовательно, оценка погрешности должна быть записана как 0,43 или 0,4, а результат измерения как 19,82 или 19,8 соответственно. Расчет погрешностей округления погрешности показывает, что при округлении до двух значащих цифр она составляет не более 5%, а при округлении до одной значащей цифры — не более 50%.

Практикой выработаны следующие правила округления результатов и погрешностей измерений.

1. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерения оканчивается нулями, то нули отбрасываются только до того разряда, который соответствует разряду погрешности, например, результат 2,0700, погрешность 0,001; результат округляют до 2,070.

2. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остающиеся цифры числа не изменяют, например, число 253435 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 235400, число 235,435 — до 235,4.

3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу, например, при сохранении трех значащих цифр число 18598 округляют до 18600, число 152,56 — до 153.

4. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная и увеличивают, если она нечетная, например, число 22,5 при сохранении двух значащих цифр округляют до 22, а число 23,5 — до 24.

Глава 2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ; ОБНАРУЖЕНИЕ И ИСКЛЮЧЕНИЕ

Источниками систематических составляющих погрешности измерения могут быть все его компоненты: метод измерения, средства измерения и экспериментатор. Оценивание систематических составляющих представляет достаточно трудную метрологическую задачу. Важность ее определяется тем, что знание систематической погрешности позволяет внести соответствующую поправку в результат измерения и тем самым повысить его точность. Трудность же заключается в сложности обнаружения систематической погрешности, поскольку она не может быть выявлена путем повторных измерений (наблюдений). В самом деле, будучи постоянной по величине для данной группы наблюдений, систематическая погрешность никак визуально не проявится при повторных измерениях одной и той же величины и, следовательно, экспериментатор затруднится ответить на вопрос — имеется ли систематическая погрешность в наблюдаемых результатах. Таким образом, проблема обнаружения систематических погрешностей едва ли не главная в борьбе с ними.

Постоянные инструментальные систематические погрешности обычно выявляют посредством поверки средства измерения. *Поверкой* называют

определение метрологическим органом погрешностей средства измерения и установление пригодности средства измерения к применению. Поверка производится путем сравнения показаний поверяемого прибора с показаниями более точного (образцового) средства измерения. Если на поверяемой отметке шкалы показания поверяемого прибора $x_{\text{пов}}$, а образцового $x_{\text{обр}}$, то погрешность поверяемого прибора на этой отметке

$$\Delta x_{\text{пов}} = x_{\text{пов}} - x_{\text{обр}}. \quad (2.1)$$

Поверка средств измерения производится в соответствии с требованиями, устанавливаемыми в нормативно-технической документации, а ее результаты указываются в свидетельстве о поверке или в паспорте прибора. Обнаруженные таким образом систематические погрешности исключаются из результата измерения путем введения поправки. Из (2.1) следует, что истинное значение величины ($x_{\text{обр}}$) равно

$$x_{\text{обр}} = x_{\text{пов}} - \Delta x_{\text{пов}},$$

т.е. поправка ($-\Delta x_{\text{пов}}$) представляет собой погрешность, взятую с противоположным знаком.

Пример. При измерении напряжения в сети показания вольтметра 225 В. В свидетельстве о поверке указано, что на этой отметке шкалы систематическая погрешность вольтметра равна +3 В. С учетом поправки напряжение в сети равно $225 - 3 = 222$ В.

Для обнаружения изменяющейся систематической погрешности рекомендуется построить график, на котором нанесены результаты наблюдений в той последовательности, в какой они были получены. Общая картина расположения полученных точек позволяет обнаружить наличие закономерного изменения результатов наблюдений и сделать вывод о присутствии в них систематической погрешности. Простейшим, но частым случаем погрешности, изменяющейся по определенному закону, является погрешность, прогрессирующая по линейному закону, например, пропорционально времени. Такие погрешности могут быть оценены и исключены следующим образом. Если известно, что при измерении постоянной величины x_0 (из физических соображений, например) систематическая погрешность изменяется линейно во времени, т.е. $x_{\text{изм}} = x_0 + Ct$ (где $C = \text{const}$), то для ее исключения достаточно сделать два наблюдения x_1 и x_2 с фиксацией времени t_1 и t_2 (рис. 2.1). Тогда искомое значение величины будет

$$x_0 = \frac{x_1 t_2 - x_2 t_1}{t_2 - t_1}. \quad (2.2)$$

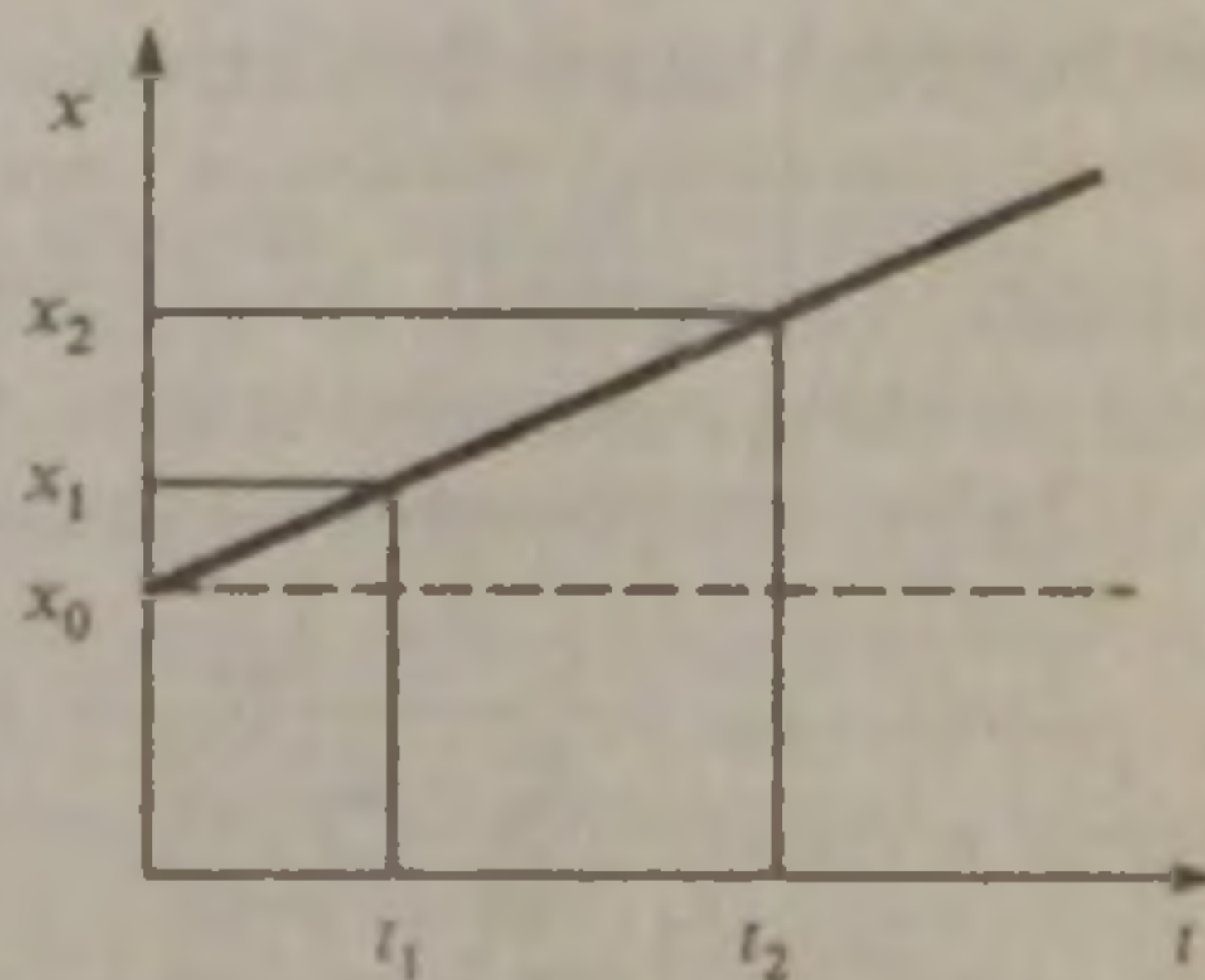


Рис. 2.1. Линейное изменение систематической погрешности

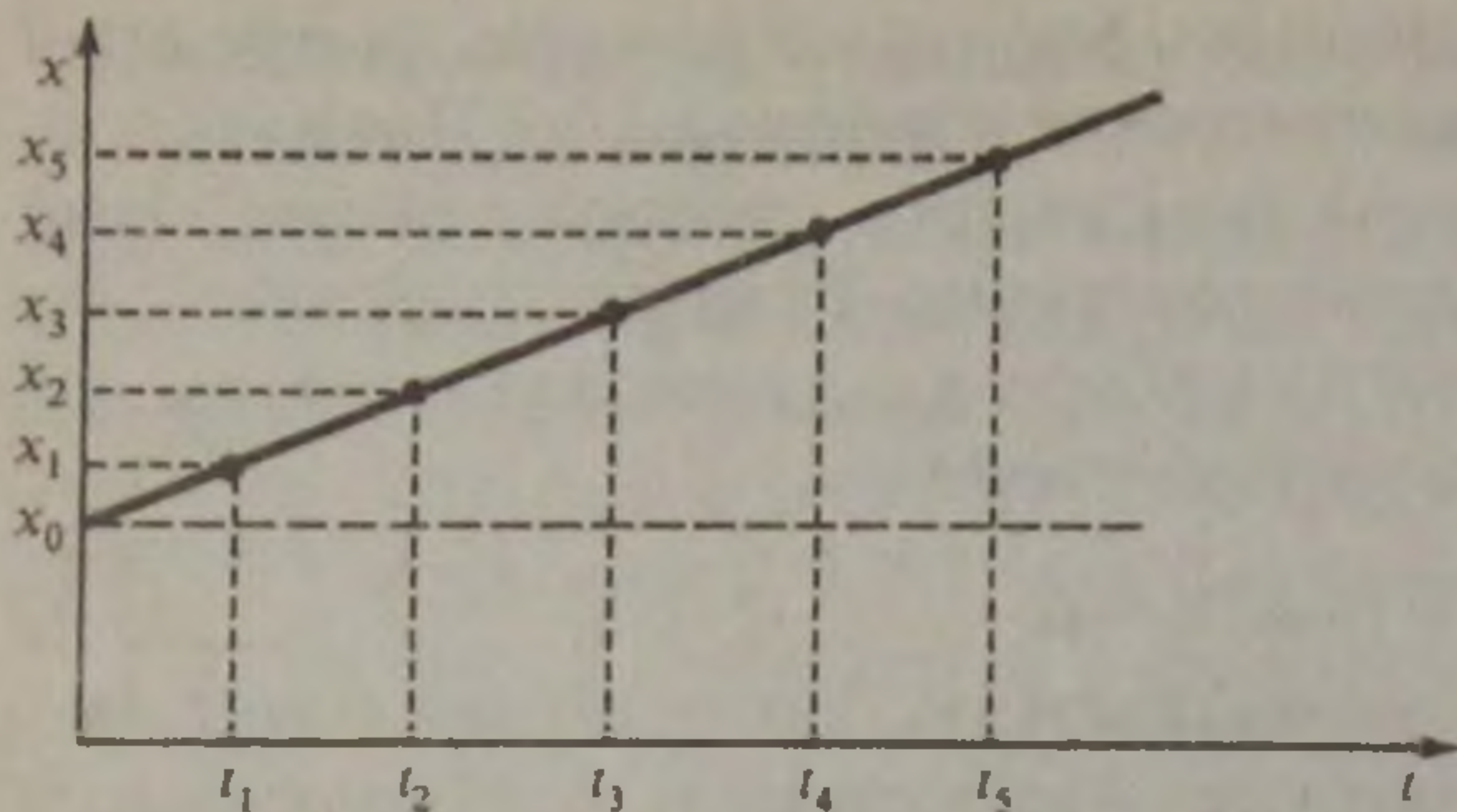


Рис. 2.2. Метод симметричных наблюдений

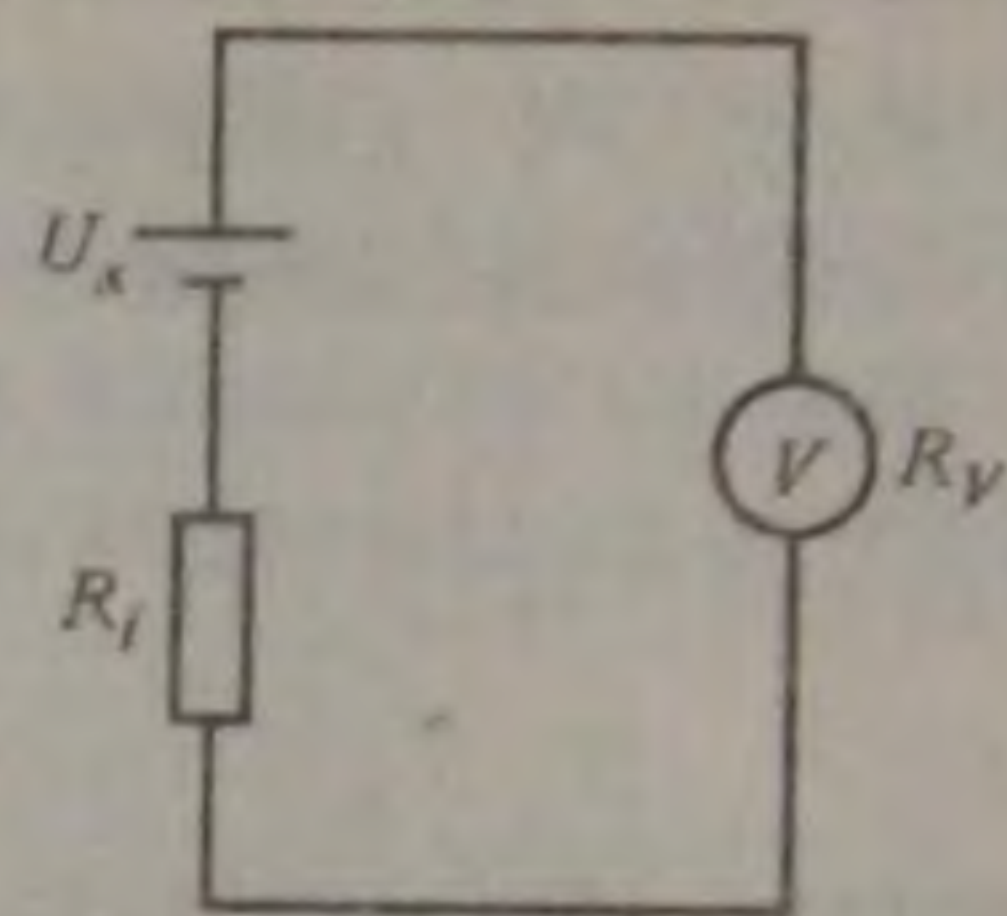


Рис. 2.3. Измерение напряжения источника вольтметром

Однако предполагая, что изменение систематической погрешности происходит по линейному закону, не всегда можно быть полностью уверенным, что это именно так. В этом случае для контроля систематической погрешности применяют метод симметричных наблюдений. Несколько наблюдений выполняют через равные промежутки времени и затем вычисляют средние арифметические симметрично расположенных отсчетов (рис. 2.2), например $\frac{x_1 + x_5}{2}$ и $\frac{x_2 + x_4}{2}$.

Теоретически, при линейной зависимости погрешности от времени, эти средние арифметические должны быть равны — это и дает возможность контролировать ход изменения погрешности. Убедившись, что погрешность изменяется по линейному закону, по формуле (2.2) находят результат измерения.

Систематические составляющие, обусловленные несовершенством методов измерения, ограниченной точностью расчетных формул, положенных в основу измерений, влиянием средств измерений на объект, свойства которого измеряются, относятся к методическим погрешностям. Единых рекомендаций по обнаружению и оцениванию методических составляющих систематической погрешности нет. Поэтому, задача решается в каждом конкретном случае индивидуально, на основе анализа примененного метода измерений, результаты которого часто зависят от квалификации и опыта экспериментатора.

Пример. Оценим систематическую погрешность измерения напряжения U_x источника, обусловленную наличием внутреннего сопротивления вольтметра (рис. 2.3). Внутреннее сопротивление источника напряжения $R_i = 50$ Ом; сопротивление вольтметра $R_v = 5$ кОм; показание вольтметра $U_{изм} = 12,2$ В.

Здесь $U_{изм} = \frac{R_v}{R_v + R_i} U_x$ и относительная систематическая погрешность, определяемая как $\frac{\Delta_c}{U_x} = \frac{U_{изм} - U_x}{U_x} \cdot 100 = -\frac{R_i}{R_i + R_v} \cdot 100$ составит 0,99%. Это достаточно ощутимая

погрешность, и ее следует учесть введением поправки. Поправка ∇ равна погрешности, взятой с обратным знаком, или в единицах измеряемой величины

$$\nabla = 0,99 \cdot 10^{-2} \cdot 12,2 = +1,2 \text{ В.}$$

Таким образом, напряжение источника будет $12,2 + 1,2 = 13,4 \text{ В.}$

Отметим, что полученная оценка систематической погрешности, в свою очередь, имеет некоторую погрешность из-за погрешностей в определении R_V и R_I , а также из-за наличия инструментальной погрешности вольтметра. Эта погрешность при введении поправки не исключается и называется *неисключенным остатком систематической погрешности* (неисключенной систематической погрешностью). Вопросы учета неисключенного остатка систематической погрешности будут рассматриваться в следующих главах.

Личные систематические погрешности связаны с индивидуальными особенностями наблюдателя. При проектировании современных средств измерения принимаются меры к тому, чтобы максимально исключить возможность появления личных погрешностей. По-видимому, по этой причине принято считать личные погрешности пренебрежимо малыми и при анализе погрешностей не принимать их в расчет. Однако безоговорочно согласиться с таким подходом нельзя. Неточные действия наблюдателя могут привести к запаздыванию или опережению фиксации моментов времени при отсчете показаний, неточности отсчитывания значений измеряемой величины по шкале стрелочного прибора из-за параллакса и др. Поэтому для того чтобы избежать личных погрешностей, необходимо точно соблюдать правила эксплуатации средств измерений и иметь навыки работы с измерительной техникой.

2.2. КОМПЕНСАЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В практике измерений применяется несколько методов, позволяющих за счет некоторого усложнения процедуры измерений получить результат измерения свободным от систематической погрешности. К ним относятся метод замещения, метод противопоставления и метод компенсации погрешности по знаку.

Метод замещения. Этот метод дает наиболее полное решение задачи компенсации постоянной систематической погрешности и представляет собой разновидность метода сравнения. Сравнение производится путем замены измеряемой величины известной величиной и так, чтобы воздействием известной величины привести средство измерения в то состояние, которое оно имело при воздействии измеряемой величины.

Пример. Взвешивание на пружинных весах, у которых имеется постоянная систематическая погрешность (из-за смещения шкалы, например). Взвешивание производится в два приема (см. рис. 1.1, в). Вначале на чашу весов помещают взвешиваемое тело массой m_x и отмечают положение указателя (на отметке N). Затем взвешиваемое тело замещают гирями такой массы m_0 , чтобы вновь добиться прежнего отклонения указателя N .

Очевидно, что при одинаковости отклонений указателя $m_x = m_0$ и систематическая погрешность весов не скажется на результате взвешивания.

Метод противопоставления. Рассмотрим данный метод на следующем примере.

Пример. Взвешивание на рычажных равноплечих весах (см. рис. 1.1, а). Условие равновесия весов $m_x l_1 = m_0 l_2$, отсюда $m_x = m_0 \frac{l_2}{l_1}$. Если длины плеч l_1, l_2 одинаковы, то $m_x = m_0$. Если же $l_1 \neq l_2$ (из-за технологического разброса длин плеч при их изготовлении, например), то при взвешивании каждый раз возникает систематическая погрешность

$$\Delta_c = m_0 \left(\frac{l_2}{l_1} - 1 \right).$$

Для исключения этой погрешности взвешивание производится в два этапа. Сначала взвешивают груз m_x , уравновешивая весы гирями массой m_{01} . При этом $m_x l_1 = m_{01} l_2$. Затем взвешиваемый груз перемещают на ту чашу весов, где прежде были гири и вновь уравновешивают весы массой m_{02} гирь. Теперь получим $m_{02} l_1 = m_x l_2$. Исключив из равенств отношение l_2 / l_1 найдем

$$m_x = \sqrt{m_{01} \cdot m_{02}}.$$

Как видно из формулы, 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 полусумму показаний — систематические погрешности при этом взаимно компенсируются.

Суммирование систематических погрешностей. Независимо от того, к какому виду относится измерение, является ли оно прямым, косвенным, совместным или совокупным, систематическая погрешность результата измерения оценивается, как правило, по ее известным составляющим. Поскольку в каждом конкретном случае каждая систематическая составляющая получает конкретную реализацию (она либо постоянная, либо известен закон ее изменения), то результирующая, суммарная систематическая погрешность представляет собой алгебраическую сумму составляющих:

$$\Delta_{c\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta_{c_i}. \quad (2.3)$$

2.3. СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ. ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПОГРЕШНОСТЕЙ

Когда при проведении с одинаковой тщательностью и в одинаковых условиях повторных наблюдений одной и той же постоянной величины получаем результаты, отличающиеся друг от друга, это свидетельствует о наличии в них случайных погрешностей. Каждая такая погрешность возникает вследствие одновременного воздействия на результат наблюдения многих случайных возмущений и сама является случайной величиной. В этом случае предсказать результат отдельного наблюдения и исправить его введением поправки невозможно. Можно лишь с определенной долей уверенности утверждать, что истинное значение измеряемой величины находится в пределах разброса результатов наблюдений от x_{\min} до x_{\max} , где x_{\min} , x_{\max} — соответственно, нижняя и верхняя границы разброса. Однако остается неясным, какова вероятность появления того или иного значения погрешности, какое из множества лежащих в этой области значений величины принять за результат измерения и какими показателями охарактеризовать случайную погрешность результата. Для ответа на эти вопросы требуется принципиально иной, чем при анализе систематических погрешностей, подход. Подход этот основывается на рассмотрении результатов наблюдений, результатов измерений и случайных погрешностей как случайных величин. Методы теории вероятностей и математической статистики позволяют установить вероятностные (статистические) закономерности появления случайных погрешностей и на основании этих закономерностей дать количественные оценки результата измерения и его случайной погрешности.

Для характеристики свойств случайной величины в теории вероятностей используют понятие закона распределения вероятностей случайной величины. Различают две формы описания закона распределения: интегральную и дифференциальную. В метрологии преимущественно используется дифференциальная форма — закон распределения плотности вероятностей случайной величины.

Рассмотрим формирование дифференциального закона на примере измерений с многократными наблюдениями. Пусть произведено n последовательных наблюдений одной и той же величины x и получена группа наблюдений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Каждое из значений x_i содержит ту или иную случайную погрешность. Расположим результаты наблюдений в порядке их возрастания, от x_{\min} до x_{\max} и найдем размах ряда $L = x_{\max} - x_{\min}$. Разделив размах ряда на k равных интервалов $\Delta l = L/k$, подсчитаем количество наблюдений n_k , попадающих в каждый интервал. Изобразим полученные результаты графически, нанеся на оси абсцисс значения физической величины и обозначив границы интервалов, а по оси ординат — относительную частоту попаданий n_k/n . Построив на диаграмме прямоугольники, основанием которых является ширина интервалов, а

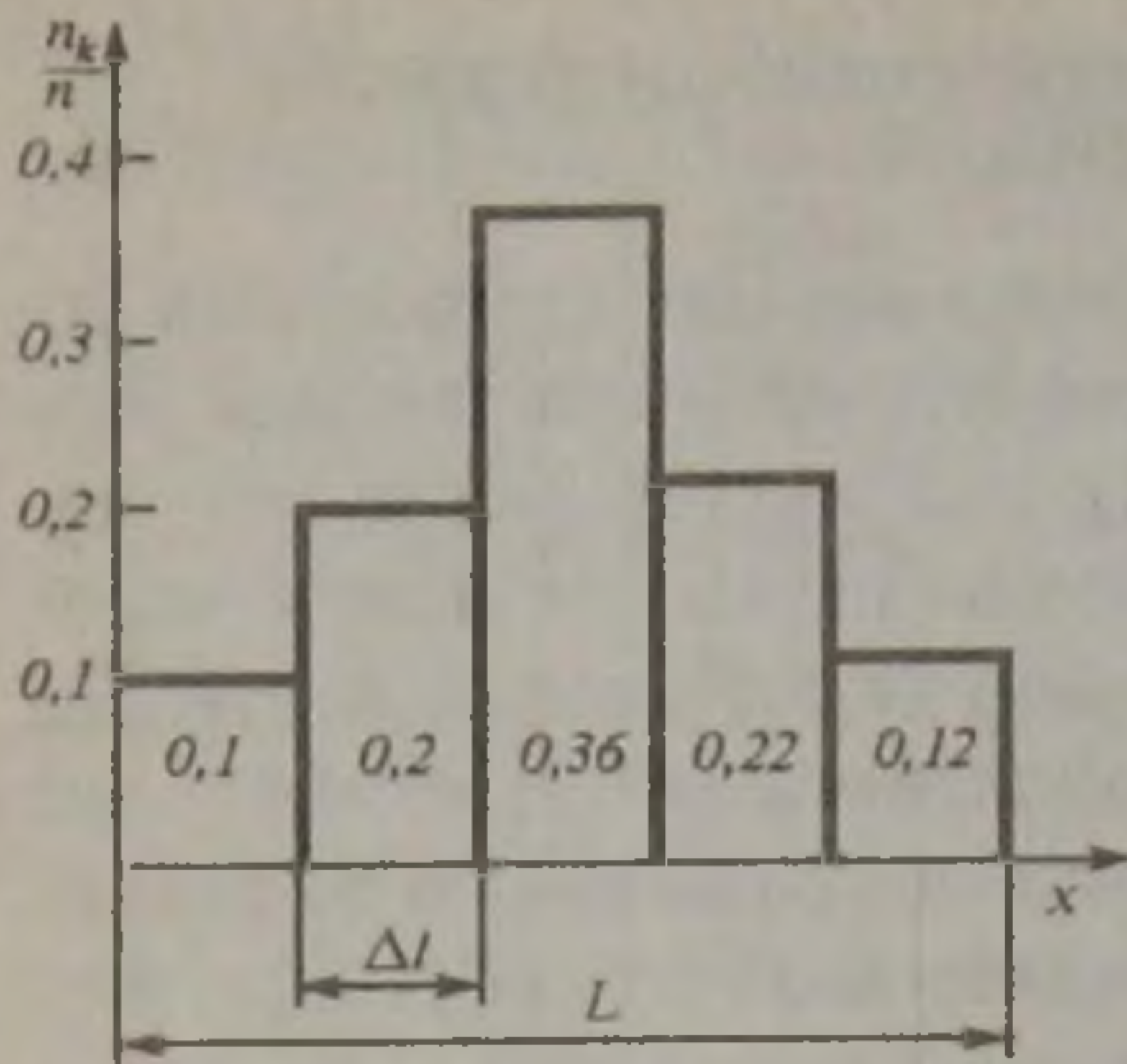


Рис. 2.4. Гистограмма

Номер интервала	1	2	3	4	5
n_k	5	10	18	11	6
n_k/n	0,1	0,2	0,36	0,22	0,12

высотой n_k/n , получим гистограмму, дающую представление о плотности распределения результатов наблюдений в данном опыте.

На рис. 2.4 показана полученная в одном из опытов гистограмма, построенная на основании результатов 50 наблюдений, сгруппированных в табл. 2.1.

В данном опыте в первый и последующие интервалы попадает соответственно 0,1; 0,2; 0,36; 0,22 и 0,12 от общего количества наблюдений; при этом очевидно, что сумма этих чисел равна единице.

Если распределение случайной величины x статистически устойчиво, то можно ожидать, что при повторных сериях наблюдений той же величины, в тех же условиях, относительные частоты попаданий в каждый интервал будут близки к первоначальным. Это означает, что единожды построив гистограмму, при последующих сериях наблюдений можно с определенной долей уверенности заранее предсказать распределение результатов наблюдений по интервалам. Приняв общую площадь, ограниченную контуром гистограммы и осью абсцисс, за единицу, $S_0 = 1$, относительную частоту попаданий результатов наблюдений в тот или иной интервал можно определить, как отношение площади соответствующего прямоугольника шириной Δl к общей площади.

При бесконечном увеличении числа наблюдений $n \rightarrow \infty$ и бесконечном уменьшении ширины интервалов $\Delta l \rightarrow 0$, ступенчатая кривая,

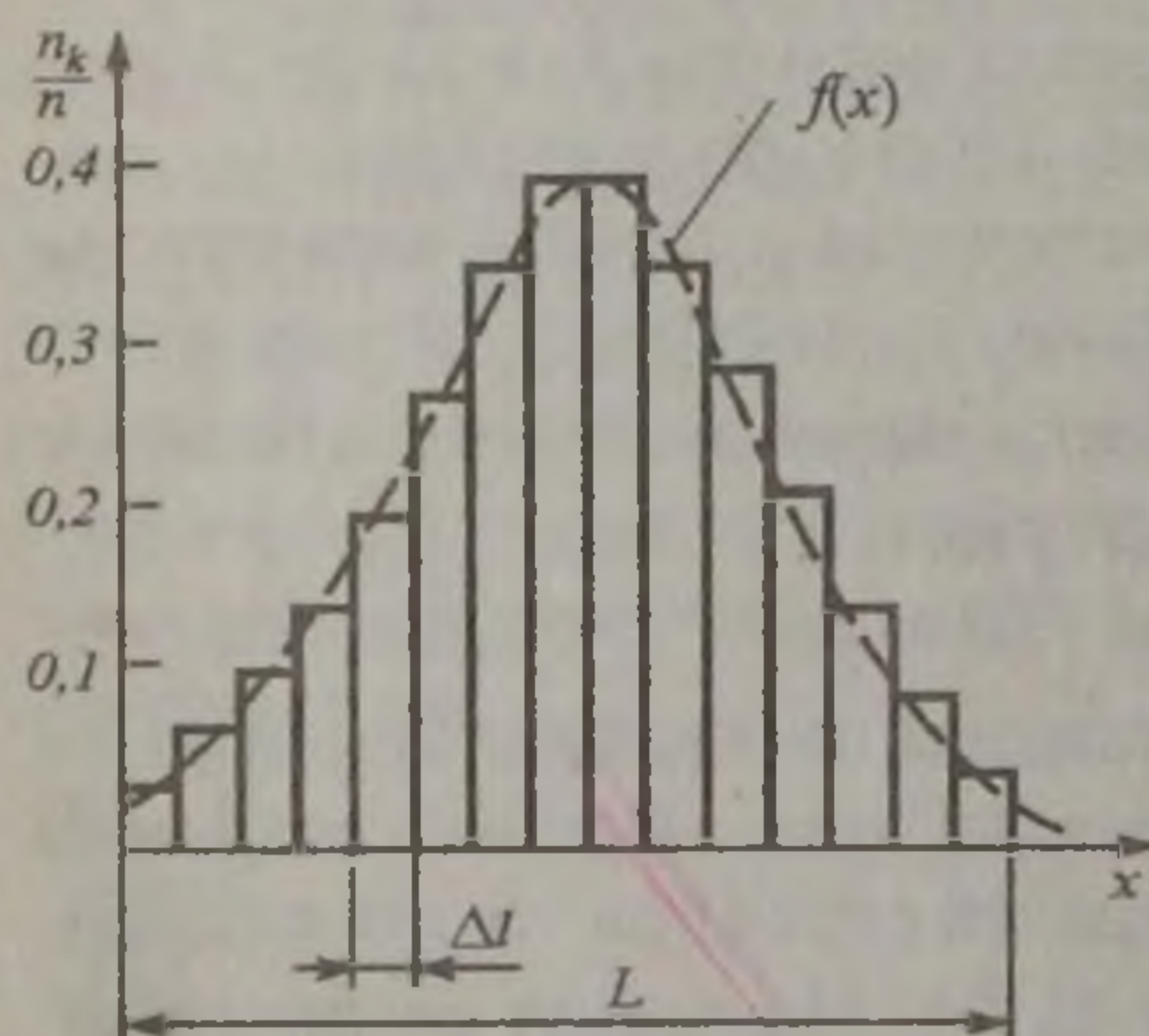


Рис. 2.5. Кривая плотности распределения вероятностей

оглибающая гистограмму, перейдет в плавную кривую $f(x)$ (рис. 2.5), называемую *кривой плотности распределения вероятностей случайной величины*, а уравнение, описывающее ее, — дифференциальным законом распределения. Кривая плотности распределения вероятностей всегда неотрицательна и подчинена условию нормирования в виде

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

Закон распределения дает полную информацию о свойствах случайной величины и позволяет ответить на поставленные вопросы о результате измерения и его случайной погрешности. Если известен дифференциальный закон распределения случайной величины $f(x)$, то вероятность P ее попадания в интервал от x_1 до x_2

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

Графически эта вероятность выражается отношением площади, лежащей под кривой $f(x)$ в интервале от x_1 до x_2 к общей площади, ограниченной кривой распределения.

Кроме непрерывных случайных величин в метрологической практике встречаются и дискретные случайные величины. Пример распределения дискретной случайной величины приведен на рис. 2.6.

Для описания частных свойств случайной величины используют числовые характеристики распределений. В качестве числовых характеристик выступают моменты случайных величин: начальные и центральные. Все они представляют собой некоторые средние значения; причем, если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, моменты называются начальными, а если от центра закона распределения — то центральными.

Начальный момент k -го порядка определяется формулами

$$m_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k f(x) dx;$$

$$m_k = \sum_{i=1}^n x_i^k p_i,$$

где p_i — вероятность появления дискретной величины.

Здесь и ниже первая формула относится к непрерывным, а вторая — к дискретным случайным величинам.

Из начальных моментов наибольший интерес представляет математическое ожидание случайной величины ($k = 1$),

$$m_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx;$$

$$m_1 = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \tag{2.4}$$

Центральные моменты k -го порядка рассчитываются по формулам

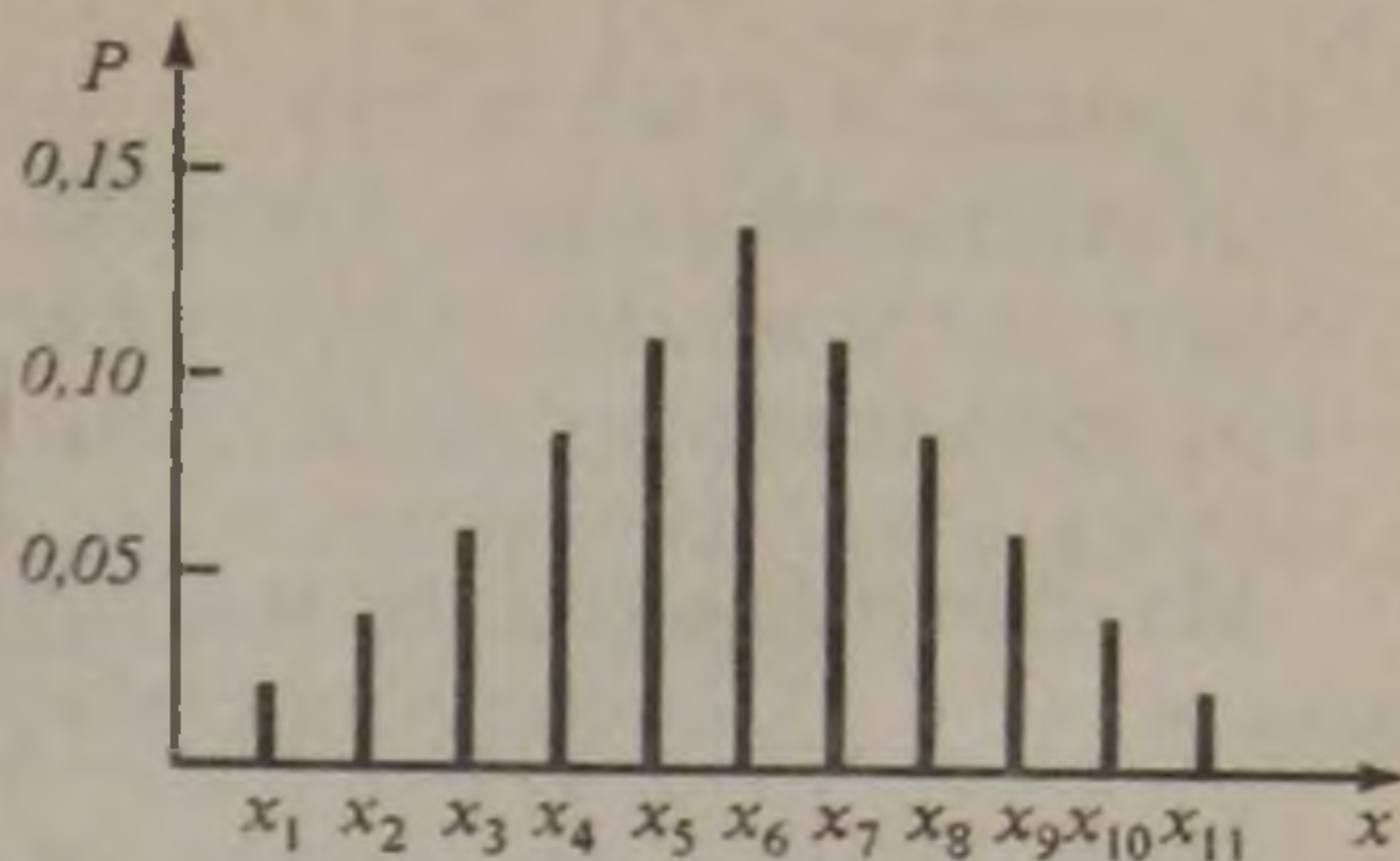


Рис. 2.6. Распределение дискретной случайной величины

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^k f(x) dx;$$

$$\mu_k = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^k p_i.$$

Из центральных моментов особенно важную роль играет второй момент ($k = 2$), дисперсия случайной величины D

$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^2 f(x) dx; \tag{2.5}$$

$$D = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2 p_i.$$

Дисперсия случайной величины характеризует рассеяние отдельных ее значений. Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины и выражает как бы мощность рассеяния относительно постоянной составляющей. Однако чаще пользуются положительным корнем квадратным из дисперсии — средним квадратическим отклонением (СКО), которое имеет размерность самой случайной величины.

Оценка результата измерения. Задача состоит в том, чтобы по полученным экспериментальным путем результатам наблюдений, содержащим случайные погрешности, найти оценку истинного значения измеряемой величины — результат измерения. Будем полагать, что систематические погрешности в результатах наблюдений отсутствуют или исключены.

К оценкам, получаемым по статистическим данным, предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности. Оценка называется *состоятельной*, если при увеличении числа наблюдений она стремится к истинному значению оцениваемой величины.

Оценка называется *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. Чем меньше дисперсия оценки, тем более *эффективной* считают эту оценку.

Способы нахождения оценок результата зависят от вида функции распределения и от имеющихся соглашений по этому вопросу, регламентируемых в рамках законодательной метрологии. Общие соображения по выбору оценок заключаются в следующем.

Распределения погрешностей результатов наблюдений, как правило, являются симметричными относительно центра распределения, поэтому истинное значение измеряемой величины может быть определено как координата центра рассеивания $x_{ц}$, т.е. центра симметрии распределения случайной погрешности (при условии, что систематическая погрешность исключена). Отсюда следует принятое в метрологии правило оценивания случайной погрешности в виде интервала, симметричного относительно

результата измерения ($x_{ц} \pm \Delta x$). Координата $x_{ц}$ может быть найдена несколькими способами. Наиболее общим является определение центра симметрии из принципа симметрии вероятностей, т.е. нахождение такой точки на оси x , слева и справа от которой вероятности появления различных значений случайных погрешностей равны между собой и составляют $P_1 = P_2 = 0,5$. Такое значение $x_{ц}$ называется медианой.

Координата $x_{ц}$ может быть определена и как центр тяжести распределения, т.е. как математическое ожидание случайной величины.

При ассиметричной кривой плотности распределения вероятностей оценкой центра распределения может служить абсцисса моды распределения, т.е. координата максимума плотности. Однако есть распределения, у которых не существует моды (например, равномерное), и распределения, у которых не существует математического ожидания.

В практике измерений встречаются различные формы кривой закона распределения, однако чаще всего имеют дело с нормальным и равномерным распределением плотности вероятностей.

Учитывая многовариантность подходов к выбору оценок и в целях обеспечения единства измерений, правила обработки результатов наблюдений обычно регламентируются нормативно-техническими документами (стандартами, методическими указаниями, инструкциями). Так, в стандарте на методы обработки результатов прямых измерений с многократными наблюдениями указывается, что приведенные в нем методы обработки установлены для результатов наблюдений, принадлежащих нормальному распределению.

Нормальное распределение. Нормальное распределение плотности вероятности (рис. 2.7) характерно тем, что, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, такое распределение имеет сумма бесконечно большого числа бесконечно малых случайных возмущений с любыми распределениями. Применительно к измерениям это означает, что нормальное распределение случайных погрешностей возникает тогда, когда на результат измерения действует множество случайных возмущений, ни одно из которых не является преобладающим. Практически, суммарное воздействие даже сравнительно небольшого числа возмущений приводит к закону распределения результатов и погрешностей измерений, близкому к нормальному.

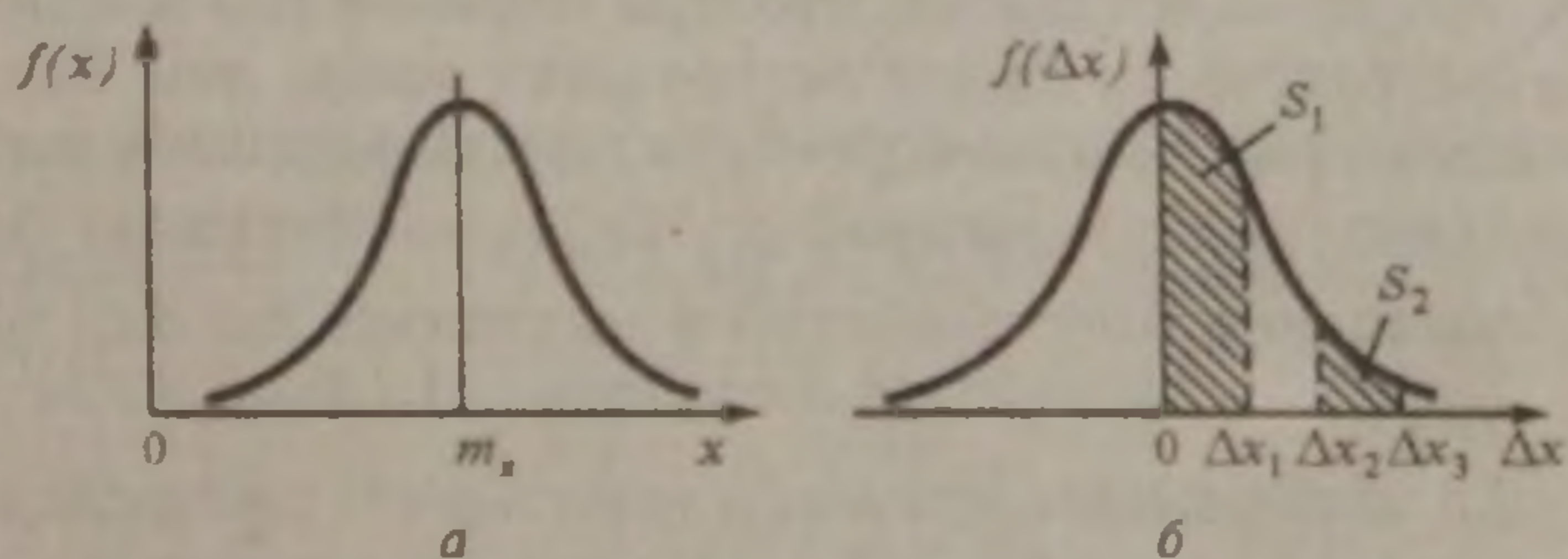


Рис. 2.7. Кривые нормального распределения

В аналитической форме нормальный закон распределения выражается формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2.6)$$

где x — случайная величина; m_x — математическое ожидание случайной величины; σ — среднее квадратическое отклонение.

Перенеся начало координат в центр распределения m_x и откладывая по оси абсцисс погрешность $\Delta x = x - m_x$, получим кривую нормального распределения погрешностей

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (2.7)$$

Для группы из n наблюдений, распределенных по нормальному закону

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (2.8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}}. \quad (2.9)$$

Обратим внимание на несколько свойств нормального распределения погрешностей.

Кривая нормального распределения погрешностей симметрична относительно оси ординат. Это означает, что погрешности, одинаковые по величине, но противоположные по знаку, имеют одинаковую плотность вероятностей, т.е. при большом числе наблюдений встречаются одинаково часто. Математическое ожидание случайной погрешности равно нулю.

Из характера кривой следует, что при нормальном законе распределения малые погрешности будут встречаться чаще, чем большие. Так, вероятность появления погрешностей, укладываемых в интервал от 0 до Δx_1 , характеризуемая площадью S_1 , будет значительно больше, чем вероятность появления погрешностей в интервале от Δx_2 до Δx_3 (площадь S_2).

На рис. 2.8 изображены кривые нормального распределения с различными средними квадратическими отклонениями, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Сравнивая кривые между собой можно убедиться, что чем меньше СКО, тем меньше рассеяние результатов наблюдений и тем больше вероятность того, что большинство случайных погрешностей в них будет мало. Естественно заключить, что качество измерений тем выше, чем меньше СКО случайных погрешностей.

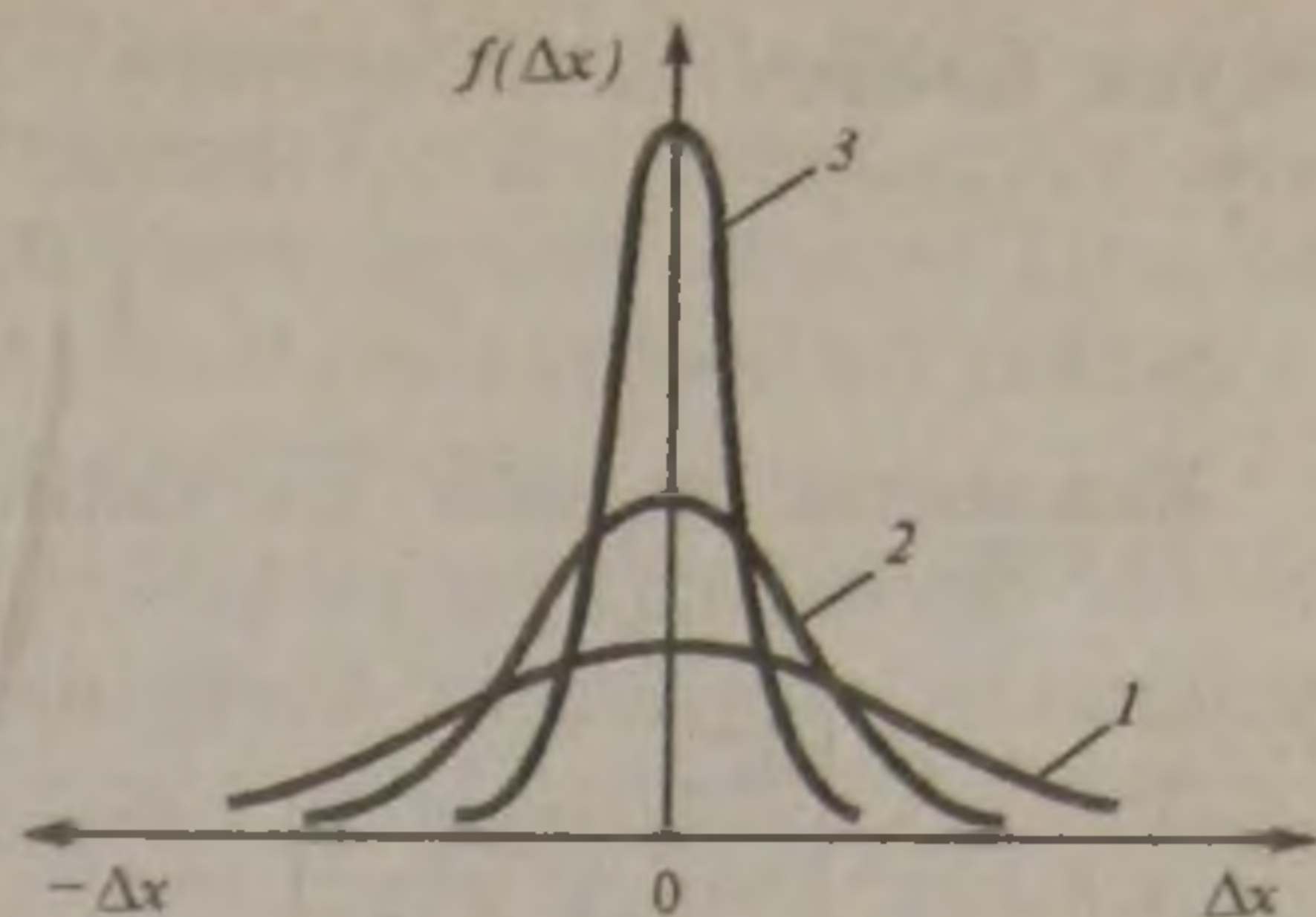


Рис. 2.8. Рассеяние результатов наблюдений

Если случайная величина x принимает значения лишь в пределах некоторого конечного интервала от x_1 до x_2 с постоянной плотностью вероятностей (рис. 2.9), то такое распределение называется равномерным и описывается соотношениями

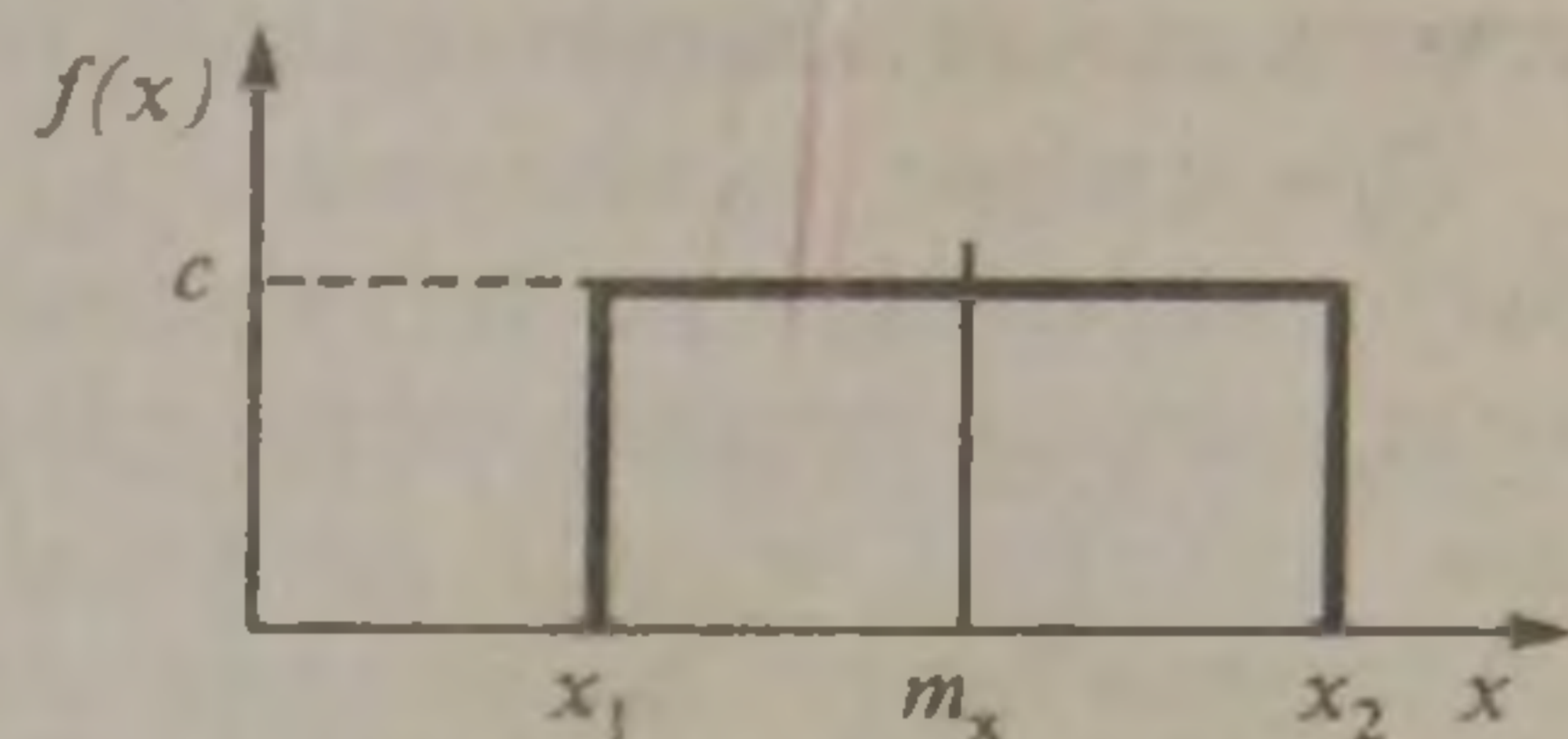


Рис. 2.9. Равномерное распределение случайной величины

$$\begin{cases} f(x) = c, & \text{при } x_1 \leq x \leq x_2; \\ f(x) = 0, & \text{при } x < x_1 \text{ и } x > x_2. \end{cases} \quad (2.10)$$

Так как площадь, ограниченная кривой распределения равна единице, то

$$c(x_2 - x_1) = 1$$

и

$$c = \frac{1}{x_2 - x_1}. \quad (2.11)$$

С учетом (2.11) плотность распределения

$$\begin{cases} f(x) = \frac{1}{x_2 - x_1}, & \text{при } x_1 \leq x \leq x_2; \\ f(x) = 0, & \text{при } x < x_1, x > x_2. \end{cases}$$

Математическое ожидание величины x

$$m_x = \frac{x_1 + x_2}{2}.$$

В силу симметрии равномерного распределения медиана величины x также равна $\frac{x_1 + x_2}{2}$. Моды закон равномерной плотности не имеет.

Дисперсия величины x определяется по формуле:

$$D_x = \frac{(x_2 - x_1)^2}{12},$$

откуда СКО

$$\sigma = \frac{x_2 - x_1}{2\sqrt{3}}$$

Варианты оценки случайных погрешностей. Для количественной оценки случайных погрешностей и установления границ случайной погрешности результата измерения могут использоваться: предельная погрешность, интервальная оценка, числовые характеристики закона распределения. Выбор конкретной оценки определяется необходимой полнотой сведений о погрешности, назначением измерений и характером использования их результатов. Комплексы оценок показателей точности установлены стандартами.

Предельная погрешность Δ_m — погрешность, больше которой в данном измерительном эксперименте не может появиться. Теоретически, такая оценка погрешности правомерна только для распределений, границы которых четко выражены и существует такое значение $\pm\Delta_m$, которое ограничивает возможные значения случайных погрешностей с обеих сторон от центра распределения (например, равномерное).

На практике такая оценка есть указание наибольшей погрешности, которая может встретиться при многократных измерениях одной и той же величины.

Недостатком такой оценки является то, что она не содержит информации о характере закона распределения случайных погрешностей. При арифметическом суммировании предельных погрешностей получаемая сумма может значительно превышать действительные погрешности.

Более универсальными и информативными являются квантильные оценки. Площадь, заключенная под всей кривой плотности распределения погрешностей, отражает вероятность всех возможных значений погрешности и по условиям нормирования равна единице. Эту площадь можно разделить вертикальными линиями на части. Абсциссы таких линий называются квантилями. Так, на рис. 2.10 Δx_1 есть 25 %-ная квантиль, так как площадь под кривой $f(\Delta x)$ слева от нее составляет 25% всей площади. Абсцисса Δx_2 соответствует 75 %-ной квантили. Между Δx_1 и Δx_2 заключено 50% всех возможных значений погрешности, а остальные лежат вне этого интервала.

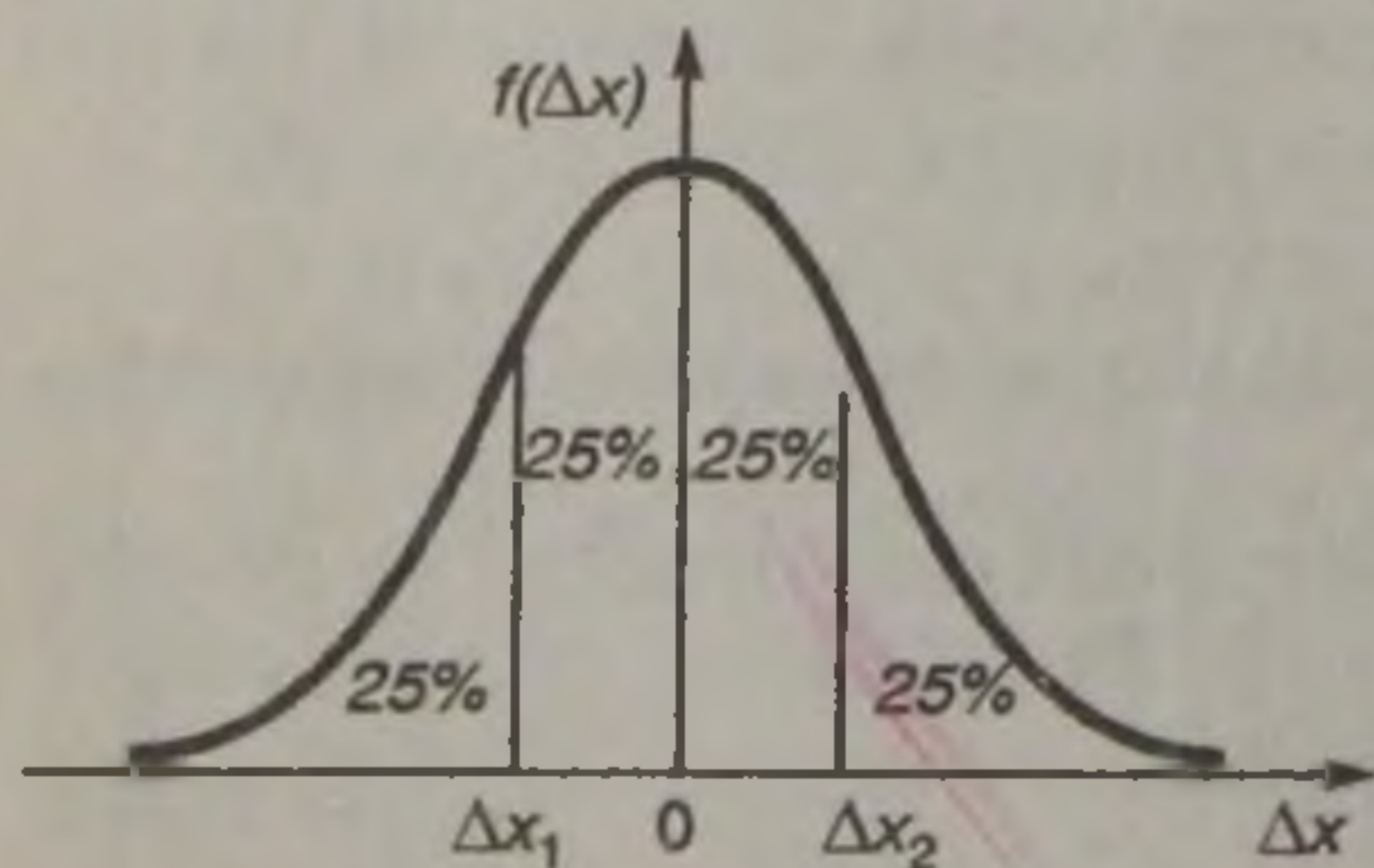


Рис. 2.10. Квантильные оценки случайной величины

Квантильная оценка погрешности представляется интервалом от $-\Delta x(P)$ до $+\Delta x(P)$, на котором с заданной вероятностью P встречаются $P \cdot 100\%$ всех возмож-

ных значений случайной погрешности. Интервал с границами $\pm\Delta x(P)$ называется *доверительным интервалом* случайной погрешности, а соответствующая ему вероятность — *доверительной вероятностью*. Принято границы доверительного интервала (доверительные границы) указывать симметричными относительно результата измерения.

Так как квантили, ограничивающие доверительный интервал погрешности могут быть выбраны различными, то при оценивании случайной погрешности доверительными границами необходимо одновременно указывать значение принятой доверительной вероятности (например, $\pm 0,3B$ при $P = 0,95$).

Доверительные границы случайной погрешности $\Delta x(P)$, соответствующие доверительной вероятности P , находят по формуле

$$\Delta x(P) = t\sigma, \quad (2.12)$$

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

На графике нормального распределения погрешностей (рис. 2.11) по оси абсцисс отложены интервалы с границами $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$, $\pm 4\sigma$. Доверительные вероятности для этих интервалов приведены в табл. 2.2.

Как видно из этой таблицы, оценка случайной погрешности группы наблюдений интервалом $\pm 1\sigma$ соответствует доверительной вероятности 0,68. Такая оценка не дает уверенности в высоком качестве измерений, поскольку 32% от всего числа наблюдений может выйти за пределы указанного интервала, что совершенно неприемлемо при однократных измерениях и дезинформирует потребителя измерительной информации. Доверительному интервалу $\pm 3\sigma$ соответствует $P = 0,997$. Это означает, что практически с вероятностью очень близкой к единице ни одно из возможных значений погрешности при нормальном законе ее распределения не выйдет за границы интервала. Поэтому, при нормальном распределении погрешностей, принято считать случайную погрешность с границами $\pm 3\sigma$ предельной (максимально возможной) погрешностью. Погрешности, выходящие за эти границы, классифицируют как грубые или промахи.

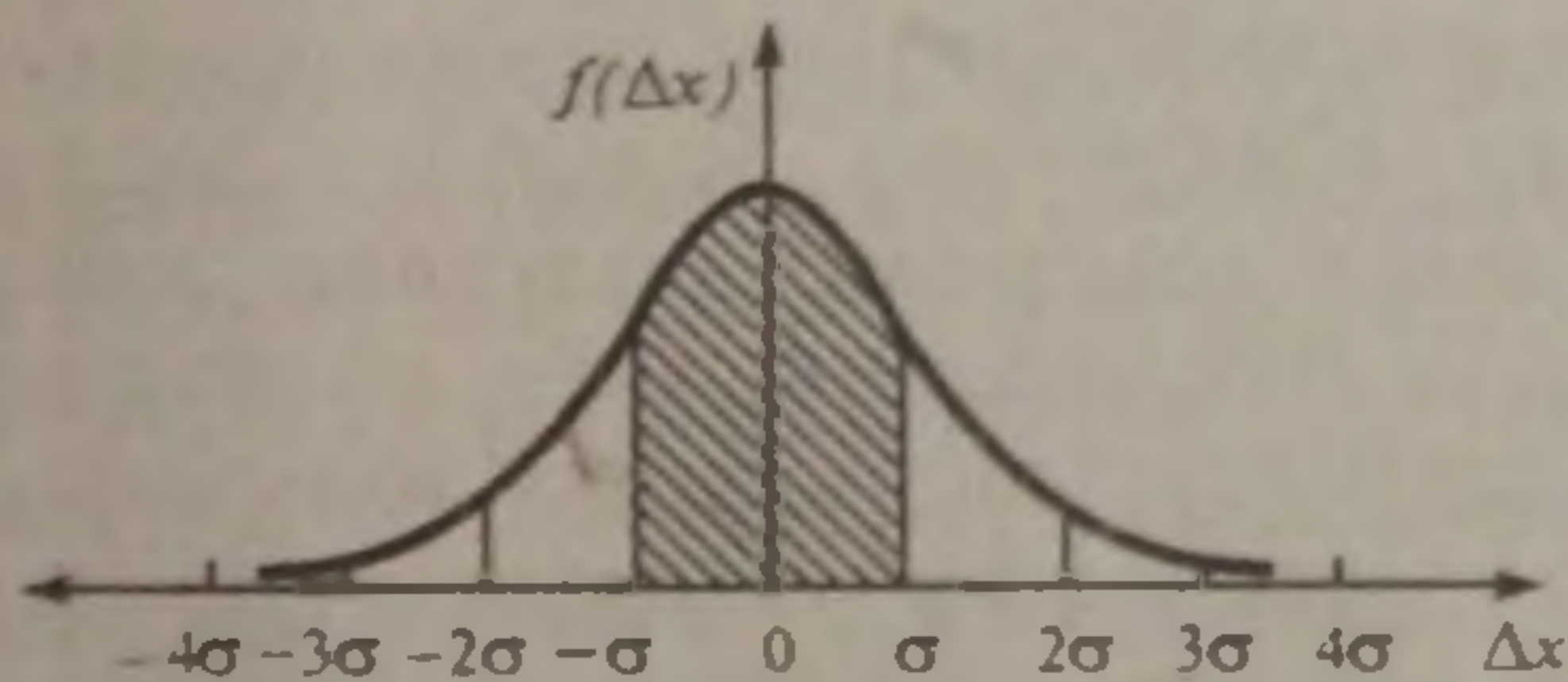


Таблица 2.2

$t\sigma$	P
$\pm 1\sigma$	0,68
$\pm 2\sigma$	0,95
$\pm 3\sigma$	0,997
$\pm 4\sigma$	0,999

Рис. 2.11. К понятию доверительных интервалов

В целях единообразия в оценивании случайных погрешностей интервальными оценками при технических измерениях доверительная вероятность принимается равной 0,95. Лишь для особо точных и ответственных измерений (важных, например, для безопасности и здоровья людей) допускается применять более высокую доверительную вероятность.

Недостатком оценивания случайной погрешности доверительным интервалом при произвольно выбираемых доверительных вероятностях является невозможность суммирования нескольких погрешностей, так как доверительный интервал суммы не равен сумме доверительных интервалов. В то же время необходимость в суммировании случайных погрешностей существует, когда нужно оценить погрешность суммированием ее составляющих, подчиняющихся к тому же разным законам распределения.

В теории вероятностей показано, что суммирование статистически независимых случайных величин осуществляется путем суммирования их дисперсией

$$D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n D_i$$

или

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} . \quad (2.13)$$

Таким образом, для того чтобы отдельные составляющие случайной погрешности можно было суммировать расчетным путем, они должны быть представлены своими СКО, а не предельными или доверительными границами.

Формула (2.13) правомерна только для некоррелированных случайных величин. В том случае, когда суммируемые составляющие погрешности коррелированы, расчетные соотношения усложняются, так как требуется учет корреляционных связей. Методы выявления корреляционных связей и их учет являются предметом изучения в теории вероятностей.

Рассмотренные свойства распределений следует понимать как «идеальные», полученные на основе бесконечно большого числа опытов. В реальных условиях результат измерения получают либо путем обработки ограниченной группы наблюдений, либо на основе однократного измерения. Правила обработки данных для получения оценок результата и погрешности статистических измерений определены стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений.

2.4. ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С МНОГОКРАТНЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Рассмотрим группу из n независимых результатов наблюдений случайной величины x , подчиняющейся нормальному распределению. Оценка рассеяния единичных результатов наблюдений в группе σ относительно среднего их значения m_x вычисляется по формуле (2.9).

Поскольку число наблюдений в группе, на основании которых вычислено среднее арифметическое m_x , ограничено, то, повторив заново серию наблюдений этой же величины, мы получили бы новое значение среднего арифметического. Повторив многократно серии наблюдений и, вычисляя каждый раз их среднее арифметическое значение, принимаемое за результат измерения, мы убедимся в рассеянии средних арифметических значений. Характеристикой этого рассеяния является среднее квадратическое отклонение среднего арифметического $S_{\bar{x}}$.

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (2.14)$$

Среднее квадратическое отклонение $S_{\bar{x}}$ используется для оценки погрешности результата измерений с многократными наблюдениями.

Теория показывает, что если рассеяние результатов наблюдений в группе подчиняется нормальному закону, то и их среднее арифметическое тоже подчиняется нормальному закону распределения при достаточно большом числе наблюдений ($n > 50$). Отсюда следует, что при одинаковой доверительной вероятности, доверительный интервал среднего арифметического в \sqrt{n} раз уже доверительного интервала результата наблюдений. Теоретически, при $n \rightarrow \infty$ случайную погрешность результата измерения можно было бы свести к нулю. Однако это невозможно, и стремиться беспредельно уменьшать случайную погрешность результата измерения не имеет смысла, так как рано или поздно определяющим становится не рассеяние среднего арифметического, а недостоверность поправок на систематическую погрешность (неисключенная систематическая погрешность).

При нормальном законе распределения плотности вероятностей результатов наблюдений и небольшом числе наблюдений среднее арифметическое подчиняется закону распределения Стьюдента с тем же средним арифметическим значением m_x . Особенностью этого распределения является то, что доверительный интервал с уменьшением числа наблюдений расширяется, по сравнению с нормальным законом распределения при той же доверительной вероятности. В формуле (2.12) для оценки доверительных границ случайной погрешности это отражается введением коэффициента t_q вместо t . Коэффициент t_q распределения Стьюдента за-

висит от числа наблюдений и выбранной доверительной вероятности и находится по таблице (Приложение 3). Так, при числе наблюдений $n = 14$ и доверительной вероятности $P = 0,95$ $t_q = 2,16$.

Правила обработки результатов измерения с многократными наблюдениями учитывают следующие факторы:

- обрабатывается ограниченная группа из n наблюдений;
- результаты наблюдений x_i могут содержать систематическую погрешность;
- в группе наблюдений могут встречаться грубые погрешности;
- распределение случайных погрешностей может отличаться от нормального.

Обработка результатов наблюдений производится в следующей последовательности:

1. Исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений (введением поправки).

2. Вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

3. Вычислить оценку среднего квадратического отклонения результатов наблюдения

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n-1}}.$$

Вычислив оценку СКО результата наблюдений, целесообразно проверить наличие в группе наблюдений грубых погрешностей, помня, что при нормальном законе распределения ни одна случайная погрешность $x_i - X$, с вероятностью практически равной единице, не может выйти за пределы $\pm 3\sigma$. Наблюдения, содержащие грубые погрешности, исключают из группы и заново повторяют вычисления X и σ .

4. Вычислить оценку СКО результата измерения $S_{\bar{x}}$ по формуле (2.14).

5. Проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению.

Приблизительно о характере распределения можно судить, построив гистограмму. Строгие методы проверки гипотез с использованием специальных критериев (χ^2 — Пирсона, ω^2 — Мизеса-Смирнова и др.) рассматриваются в специальных дисциплинах.

При числе наблюдений $n < 15$ принадлежность их к нормальному распределению не проверяют, а доверительные границы случайной погрешности результата определяют лишь в том случае, если достоверно известно, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону.

6. Вычислить доверительные границы ε случайной погрешности результата измерения при заданной вероятности P :

$$\varepsilon = t_q S_{\bar{x}},$$

где t_q — коэффициент Стьюдента.

7. Вычислить границы суммарной неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерений.

Неисключенная систематическая погрешность результата образуется из неисключенных систематических погрешностей метода, средств измерений, погрешностей поправок и др.

При суммировании эти составляющие рассматриваются как случайные величины. При отсутствии данных о виде распределения неисключенных составляющих систематических погрешностей их распределения принимают за равномерные. При равномерном распределении неисключенных систематических погрешностей границы неисключенной систематической погрешности результата измерения θ вычисляют по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2}, \quad (2.15)$$

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

Доверительную вероятность для вычисления границ НСП принимают той же, что при вычислении границ случайной погрешности результата измерения.

8. Вычислить доверительные границы погрешности результата измерения.

Анализ соотношения между неисключенной систематической погрешностью и случайной погрешностью показывает, что если $\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} < 0,8$, то неисключенной систематической погрешностью можно пренебречь и принять границы погрешности результата Δ равным $\pm \varepsilon$. Если $\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} > 8$, то случайной погрешностью можно пренебречь и принять границы погрешности результата Δ равным $\pm \theta$.

Если оба неравенства не выполняются, вычисляют СКО результата как сумму неисключенной систематической погрешности и случайной составляющей:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3} + S_{\bar{x}}^2}. \quad (2.16)$$

Границы погрешности результата измерения в этом случае вычисляют по формуле

$$\Delta = \pm K S_{\Sigma}.$$

Коэффициент K вычисляют по эмпирической формуле

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S_{\bar{x}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3}}}.$$

Стандартом регламентирована и форма записи результатов измерений. При симметричном доверительном интервале погрешности результат измерения представляют в форме $X \pm \Delta, P$, где X — результат измерения.

При отсутствии данных о видах функции распределения составляющих погрешности результата или при необходимости дальнейшей обработки результатов, результат измерения представляют в форме X, S_x, n, θ .

2.5. ПРЯМЫЕ ОДНОКРАТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ТОЧНЫМ ОЦЕНИВАНИЕМ ПОГРЕШНОСТИ

Подавляющее большинство технических измерений являются однократными. В обычных производственных условиях их точность может быть вполне приемлемой, а простота, высокая производительность (количество измерений в единицу времени) и низкая стоимость ставят однократное измерение вне конкуренции с любыми другими.

При однократных измерениях для получения результата измерения используется одно-единственное значение отсчета показаний прибора. Будучи по сути дела случайным, однократный отсчет x включает в себя инструментальную, методическую и личную составляющие погрешности измерения, в каждой из которых могут быть выделены систематические и случайные составляющие.

При измерении с точным оцениванием погрешности проблема заключается в выявлении и оценке систематических и случайных составляющих погрешностей с последующим их раздельным суммированием.

Особенностью однократного измерения является то, что законы распределения случайных составляющих неизвестны и представление о них

приходится формировать на основе ограниченной априорной информации, а иногда и волевым порядком.

Сравнительно легко, путем поверки или по паспортным данным может быть получена оценка систематической погрешности прибора, а анализом метода измерения — оценка систематической погрешности методического происхождения. При наличии в документации на прибор сведений о дополнительных систематических погрешностях, обусловленных влияющими величинами, эти погрешности также оцениваются и учитываются.

После исключения из отсчета всех известных систематических погрешностей можно полагать, что погрешность исправленного результата $x_{\text{испр}}$ состоит из неисключенных остатков систематических погрешностей и случайных составляющих погрешностей. Неисключенные систематические погрешности переводят в категорию случайных и оценивают каждую составляющую своими границами. При этом рекомендуется распределение вероятностей принимать равномерным, если погрешности заданы границами и нормальным, если заданы средним квадратическим отклонением.

В качестве границ составляющих неисключенной систематической погрешности принимают, например, пределы допустимых основных и дополнительных погрешностей средств измерений применявшихся при поверке в качестве образцовых, погрешности расчетных поправок и др.

Если неисключенные систематические погрешности оценены своими границами θ , то доверительные границы суммарной неисключенной систематической погрешности определяют по формуле (2.15).

Составляющие случайных погрешностей могут быть заданы средними квадратическими отклонениями σ_i , найденными предварительно опытным путем по результатам многократных наблюдений, либо доверительными границами Δx_i . В первом случае доверительные границы ε результирующей случайной погрешности результата определяются по формуле

$$\varepsilon = t \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2},$$

где σ_i — оценка СКО i -й составляющей, t — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности и числа наблюдений. В качестве t можно использовать коэффициент Стьюдента, соответствующий оценке той составляющей, которая вычислена по меньшему числу наблюдений.

Если же случайные составляющие погрешности заданы доверительными границами Δx_i , отвечающими одной и той же вероятности, то доверительные границы случайной погрешности результата вычисляют по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta x_i^2}.$$

Получив по отдельности оценки неисключенной систематической и случайной погрешностей результата однократного измерения, целесообразно сопоставить их между собой. В случае, когда оказывается необходимым учитывать обе составляющие, суммирование их выполняется по формуле (2.16).

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 отсчеты не подвергаются. Результат однократного измерения записывается в форме $x_{\text{испр}} \pm \Delta$.

2.6. ОДНОКРАТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ПРИБЛИЖЕННЫМ ОЦЕНИВАНИЕМ ПОГРЕШНОСТИ

Для таких измерений в качестве результата измерения принимают значение отсчета x , а оценивание погрешностей производится на основе нормативных данных о свойствах используемых средств измерений (пределов допускаемой основной погрешности, дополнительных погрешностей и др.). Поскольку эти данные относятся к множеству средств измерения данного типа, то у конкретного экземпляра прибора, используемого в измерении, действительные свойства могут значительно отличаться от нормированных. Тем не менее, не имея другой достоверной информации о реальных метрологических характеристиках, мы вынуждены производить оценку погрешности измерения на основе предельных норм. Такие оценки хотя и грубо, но все же дают возможность оценить погрешность сверху; но для корректировки результата измерения, для введения поправок они недостаточно надежны.

Общую схему оценивания погрешностей можно представить следующим образом. Выбрав, исходя из условий измерительной задачи, необходимое средство измерения (прибор), уточняют условия измерения (нормальные, рабочие) и оценивают возможные дополнительные погрешности прибора, возникающие от воздействия влияющих величин.

В результате для оценивания погрешности измерения имеем сведения о погрешностях средства измерения:

предел допускаемой основной погрешности прибора $\Delta_{\text{пр}}$;

дополнительные погрешности Ψ_1, \dots, Ψ_m .

Методические погрешности должны быть учтены заранее. Личные погрешности при измерениях предполагаются малыми и их не учитывают.

Таким образом, задача сводится к суммированию составляющих погрешности $\Delta_{\text{пр}}, \Psi_1, \dots, \Psi_m$.

Верхняя оценка погрешности результата измерения Δ_{Σ} (без учета знака) может быть найдена суммированием составляющих по абсолютной величине:

$$\Delta_{\Sigma} = |\Delta_{\text{пр}}| + \sum_{i=1}^m |\Psi_i|. \quad (2.17)$$

Более реальная оценка погрешности может быть получена статистическим сложением составляющих погрешности. Поскольку основная и дополнительные погрешности средства измерения заданы границами, то, считая их случайными величинами с равномерным распределением, границы их суммы вычислим по формуле (2.15).

Пример. Выполнено однократное измерение напряжения U_x (рис. 2.12.) на участке электрической цепи сопротивлением $R = 4$ Ом вольтметром с пределом допускаемой погрешности 0,5% от верхнего предела измерения ($U_V = 1,5$ В). Условия измерения: температура 20°C; магнитное поле до 400 А/м. Показание вольтметра 0,90 В. Сопротивление вольтметра $R_V = 1000$ Ом. Найдем результат и погрешность измерения.

Инструментальная составляющая погрешности измерения определяется основной и дополнительной погрешностями. При показании вольтметра 0,90 В предел допускаемой относительной погрешности вольтметра на этой отметке в процентах равен

$$\delta = \frac{0,5 \cdot 1,5}{0,90} = 0,83\% .$$

Дополнительная погрешность от влияния магнитного поля подсчитана по паспортным данным и находится в пределах $\pm 0,75\%$, дополнительная температурная погрешность отсутствует, так как измерение произведено при нормальной температуре (20 ± 5) °С.

Методическая погрешность определяется соотношением между сопротивлением участка цепи R и сопротивлением вольтметра R_V . При подключении вольтметра к цепи его показание будет

$$U = U_x \frac{R}{R + R_V} .$$

Отсюда относительная методическая погрешность

$$\delta_u = \frac{\Delta U}{U} = - \frac{100R}{R + R_V} = - \frac{100 \cdot 4}{1004} = -0,4\% .$$

Эта методическая погрешность является систематической и должна быть исключена из результата измерения путем введения поправки

$$\nabla = 0,9 \cdot 0,4/100 = 0,004 \text{ В} .$$

Результат измерения с учетом поправки на систематическую погрешность будет

$$U_x = 0,90 \text{ В} + 0,004 \text{ В} = 0,904 \text{ В} .$$

Найдем границы погрешности результата измерения суммированием

$$\delta_x = 0,83 + 0,75 = 1,58\% .$$

или переходя к абсолютной погрешности

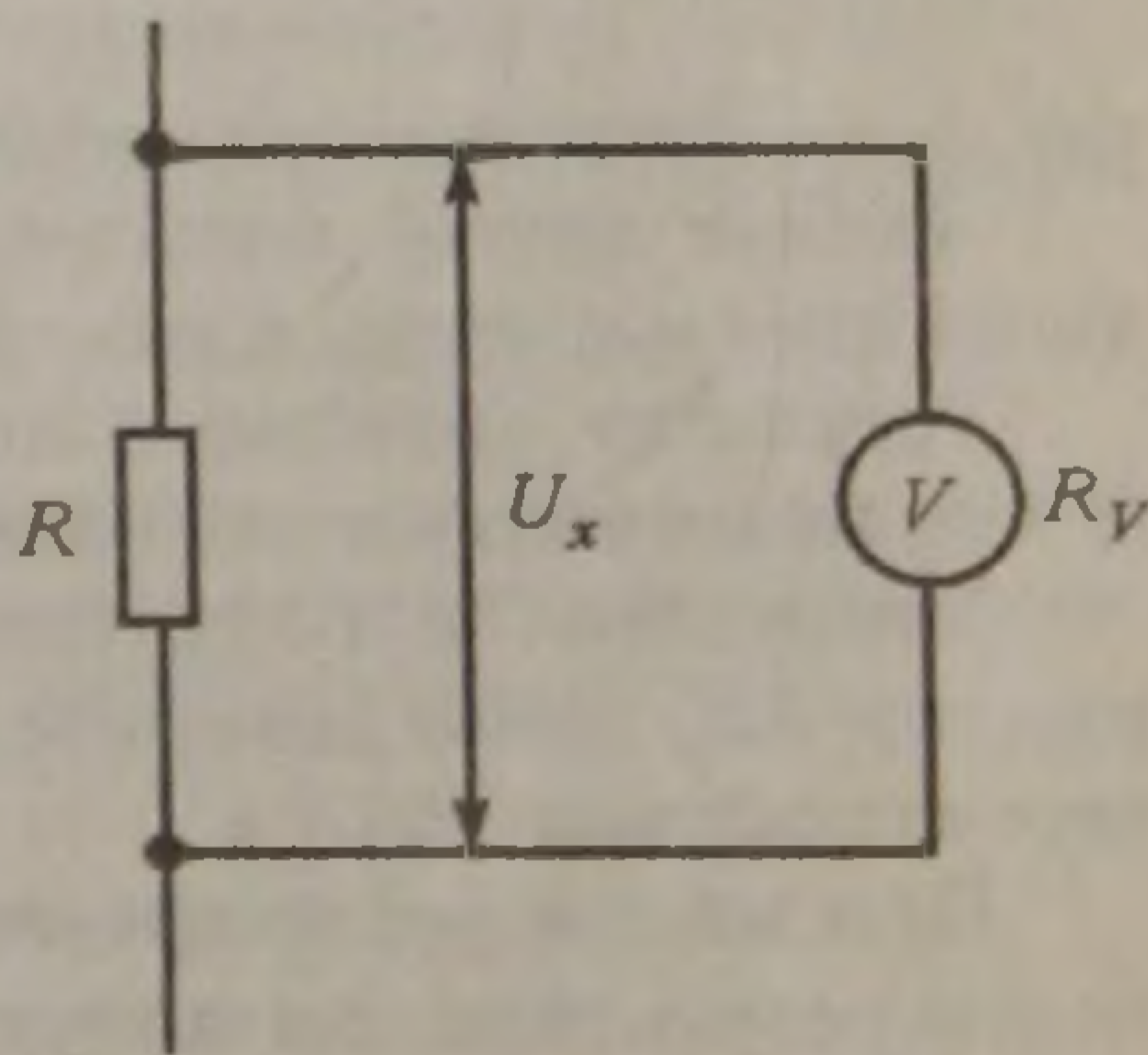


Рис. 2.12. Измерение напряжения на участке цепи

$$\Delta = \pm 0,014 \text{ В.}$$

Применив же статистическое суммирование по формуле (2.15), получим

$$\delta = 1,1 \sqrt{0,83^2 + 0,75^2} = 1,28\%.$$

Переходя к абсолютной погрешности, $\Delta = \pm 0,012 \text{ В.}$

Округляя, результат измерения можно представить в форме

$$U_r = (0,90 \pm 0,01) \text{ В.}$$

2.7. КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

При косвенных измерениях искомое значение величины находят расчетом на основе измерения других величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью

$$A = f(a_1, \dots, a_m). \quad (2.18)$$

Результатом косвенного измерения является оценка величины A , которую находят подстановкой в формулу (2.18) оценок аргументов a_i .

Поскольку каждый из аргументов a_i измеряется с некоторой погрешностью, то задача оценивания погрешности результата сводится к суммированию погрешностей измерения аргументов. Однако особенность косвенных измерений состоит в том, что вклад отдельных погрешностей измерения аргументов в погрешность результата зависит от вида функции (2.18).

Для оценки погрешностей существенно разделить косвенные измерения на линейные и нелинейные косвенные измерения. При линейных косвенных измерениях уравнение измерений имеет вид

$$A = \sum_{i=1}^m b_i a_i, \quad (2.19)$$

где b_i — постоянные коэффициенты при аргументах a_i .

Любые другие функциональные зависимости (2.18) относятся к нелинейным косвенным измерениям.

Результат линейного косвенного измерения вычисляют по формуле (2.19), подставляя в нее измеренные значения аргументов.

Погрешности измерения аргументов могут быть заданы своими границами Δa_i , либо доверительными границами $\Delta a(P)_i$ с доверительными вероятностями P_i .

При малом числе аргументов (меньше пяти) простая оценка погрешности результата ΔA получается суммированием предельных погрешностей (без учета знака), т.е. подстановкой границ $\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_m$ в выражение

$$\Delta A = \Delta a_1 + \Delta a_2 + \dots + \Delta a_m. \quad (2.20)$$

Однако эта оценка является излишне завышенной, поскольку такое суммирование фактически означает, что погрешности измерения всех аргументов одновременно имеют максимальное значение и совпадают по знаку. Вероятность такого совпадения практически равна нулю. Для нахождения более реалистичной оценки переходят к статистическому суммированию погрешностей аргументов. Полагая, что в заданных границах погрешности аргументов распределены равномерно, доверительные границы $\Delta A(P)$ погрешности результата измерения рассчитывают по формуле

$$\Delta A(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \Delta a_i^2}, \quad (2.21)$$

где коэффициент k определен в (2.15).

Если погрешности измерения аргументов заданы доверительными границами с одинаковыми доверительными вероятностями, то полагая распределение этих погрешностей нормальным, доверительные границы результата находят по формуле

$$\Delta A(P) = \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 [\Delta a_i(P)]^2}. \quad (2.22)$$

При различных доверительных вероятностях погрешностей аргументов их необходимо привести к одному и тому же значению P .

Нелинейные косвенные измерения характеризуются тем, что результаты измерений аргументов подвергаются функциональным преобразованиям. Но, как показано в теории вероятностей, любые, даже простейшие функциональные преобразования случайных величин, приводят к изменению законов их распределения.

Пример. Результат измерения аргумента a подчиняется нормальному распределению плотности вероятностей, кривая которого $f(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{a^2}{2}}$ показана на рис. 2.13, а.

При возведении измеренного значения величины в квадрат $q = a^2$ график плотности распределения претерпевает изменения и принимает вид, показанный на рис. 2.13, б (вывод формулы опускаем). Уравнение кривой в этом случае имеет следующий вид:

$$f(q) = \frac{1}{5\sqrt{q}} \cdot e^{-\frac{q}{2}}.$$

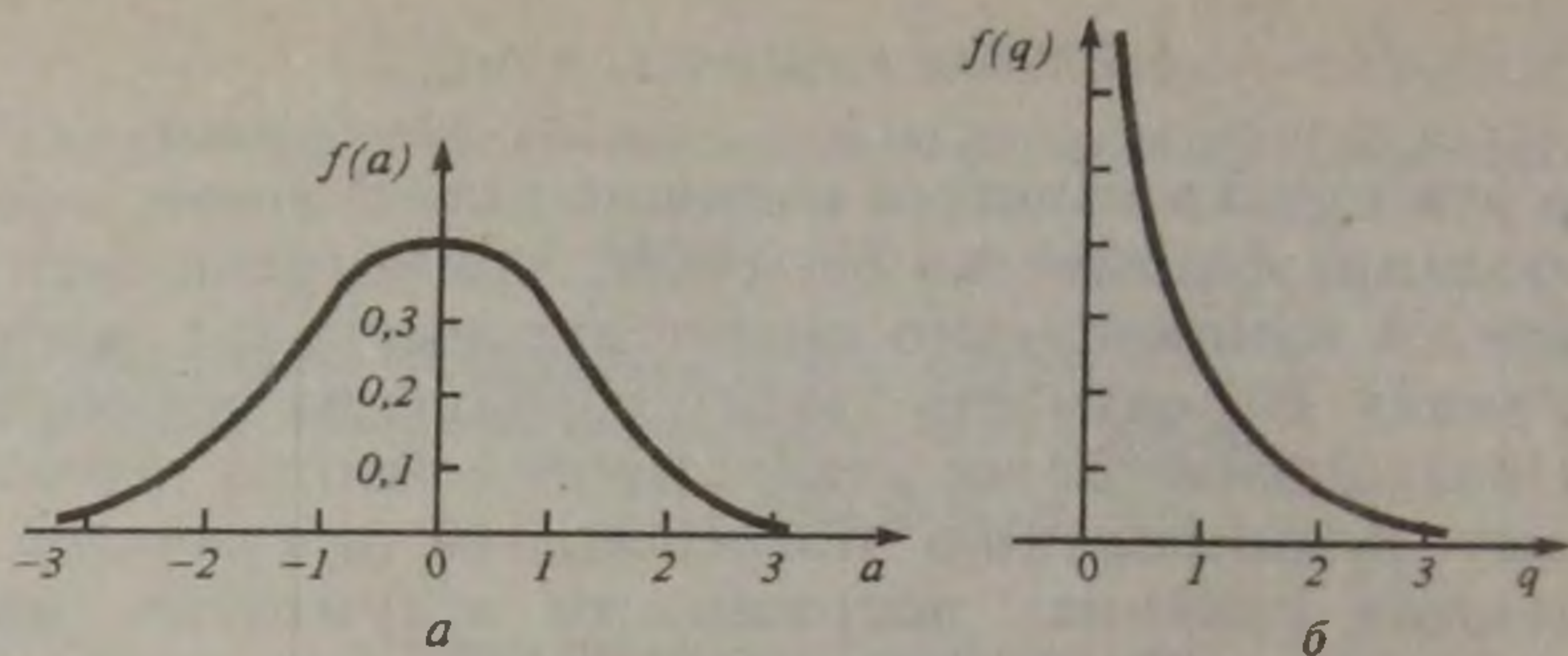


Рис. 2.13. Графики плотности распределения вероятности результата измерения, подчиняющегося нормальному закону, и квадрата этого результата измерения

При сложной функции (2.18) и в особенности если это функция нескольких аргументов, отыскание закона распределения погрешности результата связано со значительными математическими трудностями. Поэтому при нелинейных косвенных измерениях приходится отказываться от использования интервальных оценок погрешности результата, ограничиваясь приближенной верхней оценкой ее границ. В основе приближенного оценивания погрешности нелинейных косвенных измерений лежит линеаризация функции (2.18) и дальнейшая обработка результатов, как при линейных измерениях.

Запишем выражение для полного дифференциала функции A :

$$dA = \frac{\partial A}{\partial a_1} da_1 + \frac{\partial A}{\partial a_2} da_2 + \dots + \frac{\partial A}{\partial a_m} da_m. \quad (2.23)$$

По определению полный дифференциал функции — это приращение функции, вызванное малыми приращениями ее аргументов.

Учитывая, что погрешности измерения аргументов всегда являются малыми величинами по сравнению с номинальными значениями аргументов, можно заменить в (2.23) дифференциалы аргументов da_i на погрешности измерений Δa_i , а дифференциал функции dA на погрешность результата измерения ΔA :

$$\Delta A = \frac{\partial A}{\partial a_1} \Delta a_1 + \frac{\partial A}{\partial a_2} \Delta a_2 + \dots + \frac{\partial A}{\partial a_m} \Delta a_m. \quad (2.24)$$

Полагая, как и прежде, что распределения погрешностей аргументов подчиняются равномерному закону, при числе слагаемых $m < 5$ границы погрешности результата можно определить по формуле (2.20). В том случае, когда погрешности аргументов заданы их доверительными границами, оценку погрешности результата измерения вычисляют по (2.22). В обоих случаях роль коэффициентов b_1, b_2, \dots, b_m выполняют частные

производные $\frac{\partial A}{\partial a_i}$.

Применив формулу (2.24), получим несколько простых правил оценивания погрешности результата косвенного измерения.

П р а в и л о 1. Погрешности в суммах и разностях. Если a_1 и a_2 измерены с погрешностями Δa_1 и Δa_2 и измеренные значения используются для вычисления суммы или разности $A = a_1 \pm a_2$, то суммируются абсолютные погрешности (без учета знака):

$$\Delta A = \Delta a_1 + \Delta a_2.$$

П р а в и л о 2. Погрешности в произведениях и частных. Если измеренные значения a_1 и a_2 используются для вычисления $A = a_1 \cdot a_2$ или $A = a_1 / a_2$, то суммируются относительные погрешности $\delta A = \delta a_1 + \delta a_2$, где $\delta a = \Delta a / a$.

П р а в и л о 3. Измеренная величина умножается на точное число. Если a используется для вычисления произведения $A = B \cdot a$, в котором B не имеет погрешности, то $\delta A = |B| \delta a$.

П р а в и л о 4. Возведение в степень. Если a используется для вычисления степени $A = a^n$, то $\delta A = n \delta a$.

П р а в и л о 5. Погрешность в произвольной функции одной переменной. Если a используется для вычисления функции $A(a)$, то

$$\delta A = \frac{dA}{da} \delta a.$$

Вывод этих правил не приводится и может быть легко сделан самостоятельно. Использование правил позволяет получить не слишком завышенную оценку предельной погрешности результата нелинейного косвенного измерения при не слишком большом числе аргументов ($m < 5$).

Пример. Производится косвенное измерение электрической мощности, рассеиваемой на резисторе сопротивлением R при протекании по нему тока I . Так как $P = I^2 R$, то, применяя правила 2 и 4, получим $\delta P = \delta R + 2 \delta I$.

Пример. Измерением найдено значение угла $\theta = (20 \pm 3)^\circ$. Необходимо найти $\cos \theta$. Наилучшая оценка для $\cos 20^\circ = 0,94$. Погрешность $\Delta \theta$ должна быть выражена в радианах, т.е. $\Delta \theta = 3^\circ = 0,05$ рад. Тогда по правилу 5 $\delta(\cos \theta) = (\sin 20^\circ) \cdot 0,05 = 0,34 \cdot 0,05 = 0,02$. Окончательно $\cos \theta = 0,94 \pm 0,02$.

2.8. СОВМЕСТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Целью совместных измерений является установление функциональной зависимости между величинами, например, зависимости сопротивления проводника от температуры.

Для отыскания зависимости $y = f(x)$ между переменными x и y необходимо последовательно устанавливая и измеряя значения x , одновре-

менно измерять величину y , получив таким образом координаты исследуемой зависимости (x_i, y_i) . Так как 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 могут отклоняться от истинной зависимости из-за наличия случайных погрешностей. Поэтому при выполнении совместных измерений, во-первых, возникает задача аппроксимации зависимости $y = f(x)$ по экспериментальным данным так, чтобы она наилучшим образом описывала истинную зависимость. Во-вторых, необходимо ответить на вопрос — действительно ли аппроксимирующая функция наилучшим образом приближается к искомой зависимости и какой мерой можно оценить приближение экспериментальной зависимости к истинной.

Подход к решению подобных задач возможен на основе применения метода наименьших квадратов. В этом методе оценки параметров зависимости определяют из условия, что сумма квадратов отклонений расчетных значений аппроксимирующей функции от экспериментальных значений должна быть минимальна.

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

- значения аргументов x_i известны точно;
- систематические погрешности исключены и результаты измерений y_i содержат лишь случайные погрешности, которые независимы и имеют одинаковые дисперсии;
- погрешности измерения y_i имеют нормальное распределение.

При этих условиях метод наименьших квадратов дает несмещенные оценки параметров зависимости, имеющие минимальные дисперсии.

Рассмотрим важный для практики случай построения методом наименьших квадратов линейной зависимости $y = A + Bx$, где A и B — постоянные. График функции — прямая линия с наклоном B , пересекающая ось ординат в точке A (рис. 2.14).

Выполнив совместные измерения x_i и y_i с абсолютной точностью, можно было бы ожидать, что каждая точка (x_i, y_i) легла бы на теоретическую линию. В действительности, большее, на что можно надеяться, — это то, что каждая экспериментальная точка попадает в поле прямоугольника со сторонами, соответствующими границам погрешностей измерения x_i и y_i .

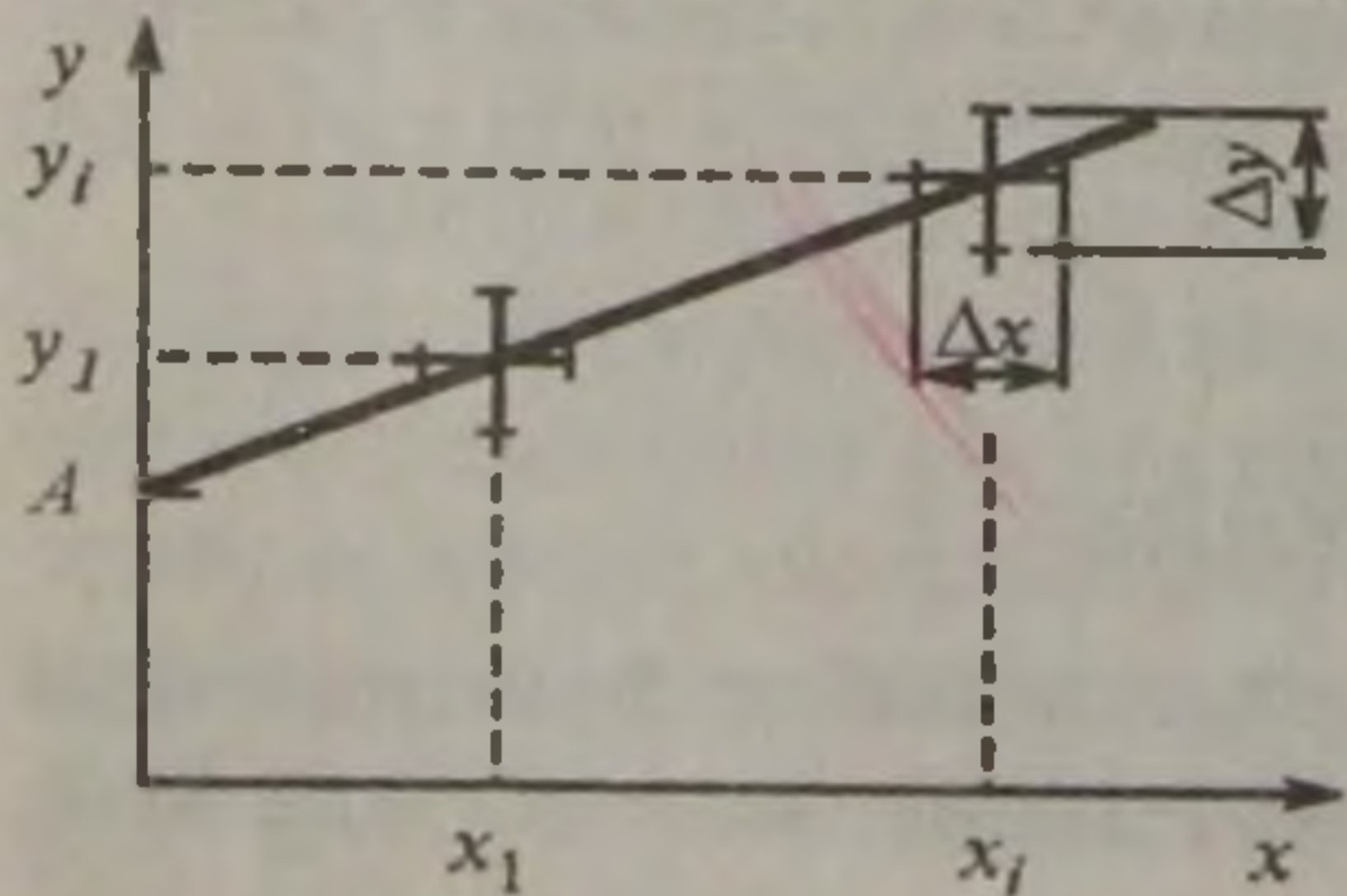


Рис. 2.14. График линейной зависимости

Если же погрешности измерения x_i малы и ими можно пренебречь, экспериментальные точки будут иметь отклонения от идеальной прямой только в пределах погрешности измерения y_i . Примем до-

пущение о малости погрешностей измерения x_i , что не является слишком жестким, поскольку всегда можно организовать измерения так, чтобы обеспечить требуемое соотношение погрешностей.

Задача определения наилучшей прямой линии, аппроксимирующей набор из m экспериментальных точек $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$, сводится к нахождению значений постоянных A и B .

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

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{[y_i - (A + Bx_i)]^2}{\sigma_y^2} \quad (2.25)$$

где σ_y — среднее квадратическое отклонение погрешности измерения y .

Продифференцировав (2.25) по A и B и приравняв производные нулю, получим систему уравнений для определения A и B . Опуская математические преобразования, приведем выражения для расчета оценок постоянных:

$$A = \frac{\left(\sum_{i=1}^m x_i^2\right)\left(\sum_{i=1}^m y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i\right)\left(\sum_{i=1}^m x_i y_i\right)}{G} \quad (2.26)$$

и

$$B = \frac{m\left(\sum_{i=1}^m x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i\right)\left(\sum_{i=1}^m y_i\right)}{G}, \quad (2.27)$$

где

$$G = m\left(\sum_{i=1}^m x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i\right)^2. \quad (2.28)$$

Формулы (2.26) и (2.27) дают оценки постоянных A и B для прямой линии $y = A + Bx$, основанные на m точках, полученных совместными измерениями.

Представление о приближении аппроксимирующей функции к истинной зависимости получим, оценив погрешности в определении постоянных A и B . Такие оценки возможно выполнить, если обратить внимание на то, что оценки (2.26) и (2.27) для A и B — точно определенные функции измеренных значений y_1, \dots, y_m . Погрешности A и B определяются расчетом по правилам косвенных измерений, исходя из погрешностей измерения $\Delta y_1, \dots, \Delta y_m$

Среднее квадратическое отклонение погрешности измерения σ_y может быть известно до начала измерений, либо вычислено по результатам измерения, как

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{m-2} \sum_{i=1}^m [y_i - (A + Bx_i)]^2. \quad (2.29)$$

Тогда

$$\sigma_A^2 = \sigma_y^2 \sum_{i=1}^m x_i^2 / G \quad (2.30)$$

и

$$\sigma_B^2 = m \sigma_y^2 / G, \quad (2.31)$$

где G определено по (2.28).

Пример. Необходимо установить зависимость сопротивления металлического проводника от температуры. Известно, что теоретическая зависимость $R_t = f(t)$ имеет вид

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (2.32)$$

где R_0 — сопротивление проводника при 0°C ; α — температурный коэффициент сопротивления проводника; t — температура.

Преобразуем (2.32) к виду

$$R_t = A + Bt,$$

где $A = R_0$; $B = R_0\alpha$.

Результаты совместных измерений:

$t, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40
$R_t, \text{Ом}$	10,3	10,9	11,3	11,6

Расчет по (2.26) и (2.27) дает следующие значения A и B :

$$A = 9,95 \text{ Ом}; B = 0,043 \text{ Ом/град.}$$

По оценке на основе паспортных данных средства измерения $\sigma_{R_t} = 0,2 \text{ Ом}$.

Расчет по (2.30) и (2.31) дает

$$\sigma_A = 0,24 \text{ Ом}; \sigma_B = 0,009 \text{ Ом/град.}$$

И, окончательно

$$A = (9,95 \pm 0,24) \text{ Ом}; B = (0,043 \pm 0,009) \text{ Ом/град.}$$

Задача аппроксимации результатов совместных измерений линейной зависимостью — только частный случай широкого класса задач по аппроксимации результатов измерений, многие из которых могут решаться методом наименьших квадратов. Так, на основе этого метода решается задача аппроксимации зависимостей, выражаемых полиномами вида $y = A + Bx + Cx^2 + \dots + Hx^m$, экспоненциальными функциями вида $y = Ae^{Bx}$ (где A, B, C, \dots, H — постоянные). Конкретные методики аппроксимации этих и других зависимостей рассматриваются в специальной литературе.

2.9. ОЦЕНИВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ И ПОГРЕШНОСТИ ИСПЫТАНИЙ

Испытания образцов продукции. Согласно принятому определению, испытания — это экспериментальное определение характеристик продукции в заданных условиях ее функционирования. Например, измерение характеристик бытовой радиоаппаратуры при номинальных значениях температуры окружающей среды -50°C и $+60^{\circ}\text{C}$ с целью проверки их соответствия установленным нормам.

Испытания являются важнейшим этапом создания образцов техники, а их результаты служат основанием для принятия ответственных решений.

Цель испытаний, с метрологической точки зрения, заключается в нахождении посредством измерения истинного значения контролируемого параметра и оценивании степени доверия к нему.

Как и при любых измерениях, результат измерения контролируемого параметра (результат испытания) отличается от своего истинного значения. Но не только потому, что имеет место погрешность измерения параметра, но и потому, что невозможно абсолютно точно установить (выдержать) заданные номинальные условия испытаний. Так, в приведенном примере установить и поддерживать заданную температуру в термостате можно лишь с определенной погрешностью и, следовательно, результат измерения при испытаниях будет содержать составляющую погрешности от неточности установки испытательного воздействия.

Для оценки качества результата испытания введено понятие *погрешности испытания* $\Delta x_{\text{исп}}$. По аналогии с погрешностью измерения, погрешность испытания характеризуется степенью отличия результата испытания $x_{\text{исп}}$ от истинного значения контролируемого параметра $x_{\text{ист}}$, т.е. того, которое он имел бы при отсутствии погрешностей измерения и установки условий испытания

$$\Delta x_{\text{исп}} = x_{\text{исп}} - x_{\text{ист}}$$

Формирование погрешности испытания иллюстрируется рис. 2.15.

Требуется определить истинное значение контролируемого параметра изделия M в условиях, характеризуемых номинальным значением испытательного воздействия x_n . Положим, что зависимость $M = M(x)$ линейна.

Пусть погрешности измерения параметра M и погрешность установки x_n заданы своими пределами $\Delta_{\text{изм}}$ и Δ_x .

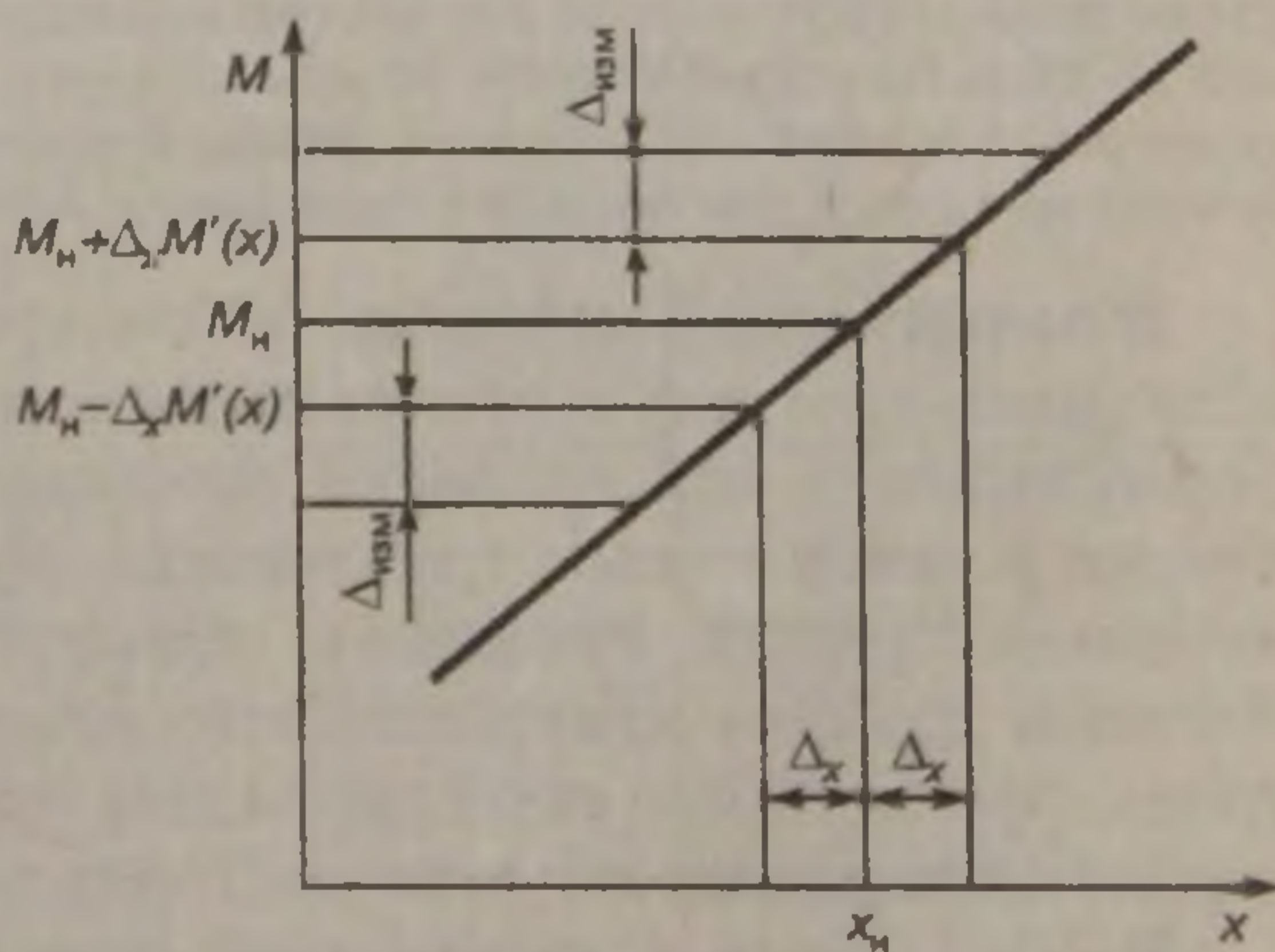


Рис. 2.15. Формирование погрешности испытания

Если бы погрешность измерения параметра $\Delta_{\text{изм}}$ отсутствовала, то возможный результат испытаний находился бы в пределах $M_n \pm \Delta_x M'(x)$. Наличие погрешности измерения приводит к расширению интервала неопределенности результата испытания. С учетом погрешности $\Delta_{\text{изм}}$ измерения параметра M наибольшее по абсолютной величине значение погрешности испытания будет

$$\Delta_{\text{исп}} = \Delta_{\text{изм}} + \Delta_x M'(x), \quad (2.33)$$

где $M'(x)$ производная от $M(x)$ и

$$M = M_{\text{изм}} \pm \Delta_{\text{исп}}.$$

В общем случае, когда при испытаниях требуется задавать и поддерживать m параметров испытательных воздействий

$$\Delta_{\text{исп}} = \Delta_{\text{изм}} + \sum_{i=1}^m \Delta_{\text{уст}i} M'(x_i),$$

где $\Delta_{\text{уст}i}$ — погрешность установки i -го параметра условий испытаний.

Считают, что погрешности испытаний обладают всеми принципиальными свойствами погрешностей измерений. Поэтому они могут описываться теми же характеристиками, что и погрешности измерений.

Пример. Проводится испытание источника питания. Контролируемый параметр — выходное напряжение должно быть $U_n = (20 \pm 0,5)$ В при температуре 20°C . Температура испытаний поддерживается равной $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Изменение напряжения источника при изменении температуры составляет 1% на градус. Измерение напряжения производится вольтметром с погрешностью $\Delta_{\text{изм}} = \pm 0,3$ В. Показания вольтметра $U_{\text{изм}} = 19,9$ В. Погрешность испытаний оценим по формуле (2.33). Отклонение испытательной температуры от номинальной на один градус приводит к изменению выходного напряжения на $(20 \cdot 1)/100 = 0,2$ В. Тогда получим:

$$\Delta_{\text{исп}} = 0,3 + 0,2 = 0,5 \text{ В.}$$

Результат испытания $U = (19,9 \pm 0,5)$ В. Судя по результатам испытания, источник не удовлетворяет требованиям, так как нижний порог напряжения $19,9 - 0,5 = 19,4$ В выходит за пределы установленной нормы. Однако, такой результат обусловлен не плохим качеством источника, а слишком большой погрешностью вольтметра. Используя более точный вольтметр, убедимся, что напряжение источника соответствует норме.

Измерительный контроль. Стандартом на термины и определения в области испытаний и контроля качества продукции понятие контроль формулируется как проверка соответствия показателей качества продукции установленным требованиям. Контроль, осуществляемый с применением средств измерения, называется *измерительным контролем*. Частным случаем измерительного контроля является допусковой контроль, при котором ставится задача установить, находится ли контролируемый параметр объекта контроля в пределах заданного допуска.

Необходимым условием измерительного контроля является наличие в нормативно-технической документации на объект допустимых значе-

ний контролируемых параметров или допускаемых отклонений параметров от их номинальных значений.

Будучи близки по информационной сущности, процедуры измерения и контроля содержат общую операцию получения измерительной информации, однако, отличаются по конечному результату. Если измерения преследуют цель нахождения значения физической величины, то результатом контроля является логическое заключение, суждение типа «годен — не годен», «брак — норма» и т.п., получаемое на основе измерительной информации.

Подобно тому, как при измерении результат измерения должен сопровождаться оценкой погрешности, результат контроля должен сопровождаться указанием показателей достоверности контроля.

Достоверность контроля — вероятность соответствия результатов контроля действительным значениям контролируемого параметра. В качестве оценок достоверности контроля вводится понятие вероятности ошибок I и II рода.

Ситуация, когда в действительности годное изделие идентифицируется по результатам контроля как негодное, называется ошибкой I рода. Противоположная ситуация, при которой негодное изделие по результатам контроля принимается за годное, называется ошибкой II рода. Обозначив вероятность получения верного результата контроля P_v , а вероятность ошибки I и II рода P_I и P_{II} , можно записать

$$P_v = 1 - (P_I + P_{II}).$$

Возникновение ошибок контроля поясним на примере контроля изделия, рассеяние измеряемого параметра x которого описывается некоторым распределением плотности вероятности $f(x)$ (рис. 2.16), где x_n — номинальное значение параметра; $x_{дв}$ — верхний предельный размер; $x_{дн}$ — нижний предельный размер. Поле допуска изделия Δ_v . На рис. 2.16 изображено также распределение плотности вероятностей погрешности средства измерения $f(\Delta x)$, примененного для контроля.

Если бы средство измерения не имело погрешностей, то, измеряя контролируемый параметр каждого из изделий, можно было бы абсолютно безошибочно отделить бракованные изделия (размер которых выходит за пределы допуска) от годных, т.е. обеспечить $P_v = 1$. Однако в реальных условиях средство измерений обладает погрешностью, поэтому по

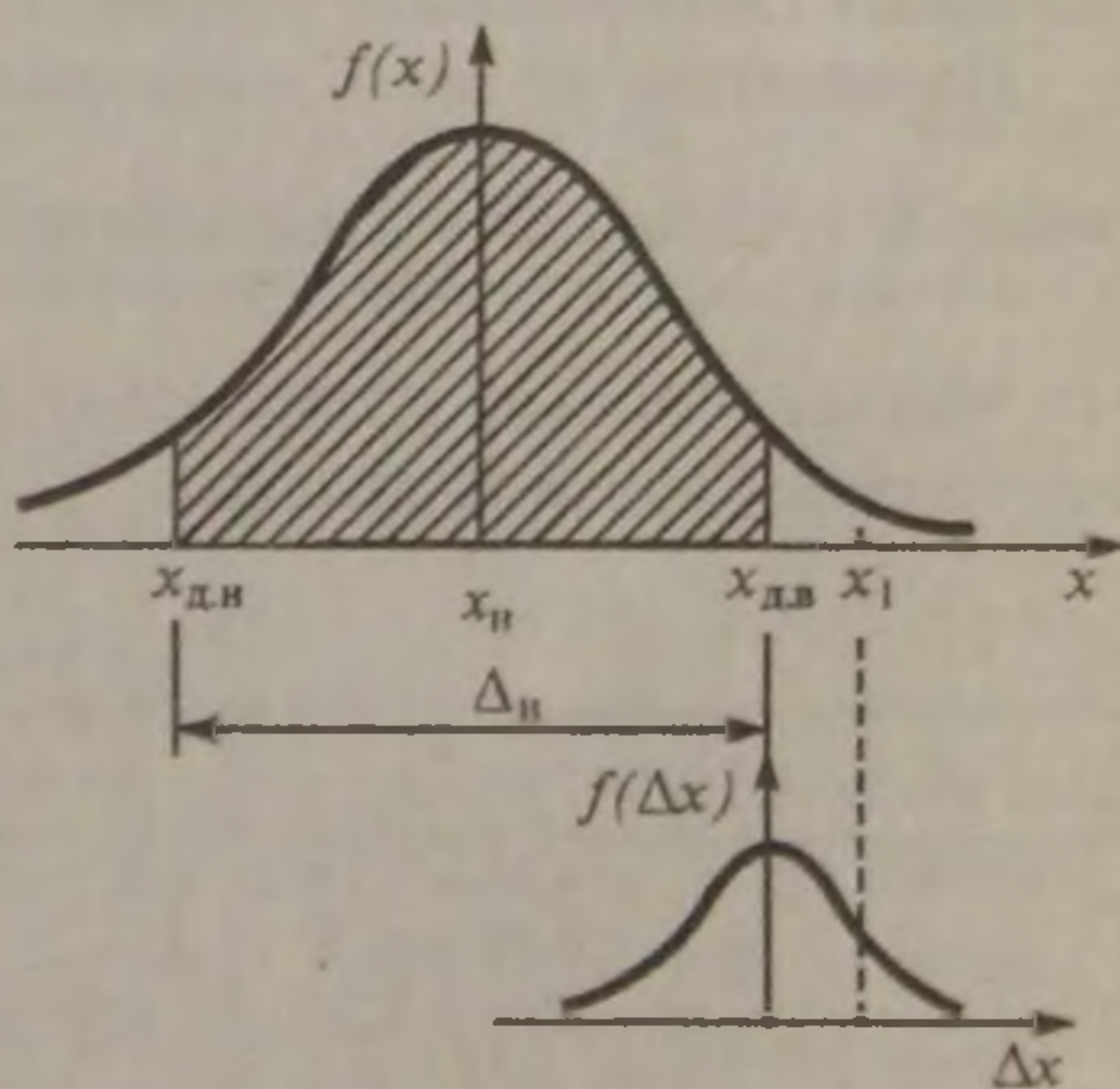


Рис. 2.16. Формирование ошибок контроля

результатам измерений часть бракованных изделий будет неправильно принята как годные. И наоборот, часть годных изделий будет неправильно забракована. Таким образом, при осуществлении измерительного контроля возникает метрологическая проблема — оценки влияния погрешности измерения контролируемого параметра на результаты контроля.

Определим вероятность того, что изделие с размером, выходящим за пределы поля допуска и попадающим в интервал от $x_{д.в}$ до x_1 , будет из-за наличия случайной погрешности средства измерений признано годным (ошибка II рода). Эта вероятность определяется совпадением двух независимых событий: первого (A), когда размеры изделия должны находиться в интервале от $x_{д.в}$ до x_1 , и второго (B), когда из-за погрешности измерения показания средства измерения окажутся в этом же интервале. Так как первое и второе события независимы, то вероятность того, что изделие будет ошибочно признано годным, определится как произведение вероятностей событий $P_A P_B$. Отметим, что вероятности P_A и P_B зависят от формы соответствующих распределений. Аналогично определяется вероятность ошибки I рода.

При контроле партии изделий вероятность ошибок I и II рода тем больше, чем больше дисперсия (среднее квадратическое отклонение) погрешности измерения.

При практическом осуществлении контроля партий изделий влияние погрешностей измерения оценивают параметрами:

m — число изделий (в процентах от общего числа измеренных), имеющих размеры, превышающие предельно допустимые, но принятые как годные (неправильно принятые);

n — число изделий (в процентах от общего числа измеренных), имеющих размеры, не превышающие предельно допустимые, но забракованные (неправильно забракованные).

Параметры m и n определяют по таблицам или графикам в зависимости от значения отношения $A_\sigma = \frac{\sigma}{\Delta_n} \cdot 100$, (табл. 2.3) где σ — среднее квадратическое отклонение погрешности измерения, Δ_n — допуск контролируемого параметра.

Таблица 2.3

$A_\sigma, \%$	$m, \%$	$n, \%$
1,6	0,37 — 0,39	0,7 — 0,75
3	0,87 — 0,90	1,2 — 1,3
5	1,6 — 1,7	2,0 — 2,25
...
12	3,75 — 4,1	5,4 — 5,8
16	5,0 — 5,4	7,8 — 8,25

Меньшие значения m и n в интервалах соответствуют распределению погрешности измерения по нормальному закону, большие — по закону равной вероятности.

2.10. МЕЖДУНАРОДНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНИВАНИЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ

Когда все известные или предполагаемые составляющие погрешности результата измерения оценены и внесены соответствующие поправки, все еще остается сомнение в том, насколько близок результат измерения к истинному значению измеряемой величины. В сложившейся метрологической практике количественной мерой этого сомнения, принято использовать понятие «погрешность измерения». В Российской Федерации приемы оценивания погрешности результата измерения регламентированы нормативно-техническими документами Госстандарта. До недавнего времени представления о погрешностях измерений, их систематических и случайных составляющих, были едины и принципиальных возражений у метрологов различных стран не вызывали. Тем не менее регулярно поступали предложения по изменению, совершенствованию этих представлений, обосновывавшиеся «несоответствием принципов оценивания погрешностей современным практическим задачам».

В 1978 г., декларируя отсутствие международного единства в вопросах оценивания качества результатов измерений, Международному комитету мер и весов сообществом метрологов было поручено разработать согласованные рекомендации по этому вопросу, основанные на нетрадиционных подходах к оцениванию погрешности. Работа по созданию рекомендаций завершилась выпуском в 1986 г. «Руководства по выражению неопределенности измерения». Основные положения «Руководства» заключаются в следующем:

понятие «погрешность измерения» заменено понятием «неопределенность измерения»;

введены понятия неопределенности типа *A* и типа *B*;

количественно неопределенности типа *A* и *B* и результата измерения оцениваются посредством «стандартного отклонения» (среднего квадратического отклонения).

Понятие «неопределенность измерений» определяется как «параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине».

Для оценивания различных составляющих неопределенности могут быть использованы различные исходные данные. Некоторые из составляющих оцениваются из статистического распределения результатов рядов наблюдений и характеризуются экспериментальными средними квадратическими отклонениями. Другие составляющие, которые также могут характеризоваться средними квадратическими отклонениями, оцениваются из предполагаемых распределений вероятностей, основанных на опыте экспериментатора или другой информации. Неопределенность, оцениваемая путем статистического анализа ряда наблюдений, называют неопределенностью типа *A*. Неопределенность, оцениваемая

любыми иными способами, чем статистический анализ рядов наблюдений, называют неопределенностью типа *B*.

Следуя международной рекомендации зарубежные метрологи в последние годы все чаще стали использовать термин «неопределенность измерений» вместо «погрешность измерений». Признавая высокий авторитет и значимость международных рекомендаций, тем не менее проанализируем целесообразность и эффективность перехода от концепции «погрешности» к концепции «неопределенности» в области технических измерений.

Новизну концепции «неопределенности» авторы «Руководства» видят в том, что «неопределенность» как мера сомнений является неотъемлемым атрибутом результата измерения, тогда как термин «погрешность» зачастую трактуется как некоторая самостоятельная конкретная величина, на которую измеренное значение физической величины отличается от ее истинного значения. Однако такое понимание погрешности измерения давно исчезло, и если в педагогических целях и рассматривают представление о конкретном детерминированном отличии результата измерения от истинного значения, то это лишь понятие о классической систематической погрешности. По мнению ряда ученых, указанное «принципиальное» различие между погрешностью измерения и неопределенностью результата касается скорее философских оттенков, нежели существа дела. Как только переходят к практическим вопросам — как же отражать сомнения, неуверенность экспериментатора в результате измерения, сразу же приходится связывать «неопределенность» с теми или иными статистическими характеристиками погрешности измерений как случайной величины. По сути дела неопределенность типа *A* ни что иное, как характеристика случайной составляющей погрешности результата измерения (2.14), а неопределенность типа *B* — характеристика неисключенной систематической погрешности (2.15). Объединение неопределенностей типа *A* и *B* проводится по тем же правилам, что и при объединении составляющих погрешности, путем суммирования дисперсий. Таким образом, ничего не меняя по существу, замена термина «погрешность» на «неопределенность», несущую ту же смысловую нагрузку, приведет лишь к путанице в мыслях, публикациях и документах. Поэтому нет оснований отказываться от традиционного, привычного термина «погрешность измерений».

И, тем не менее, можно ожидать, что в силу международного характера «Руководства по выражению неопределенности измерения» российские метрологи будут вынуждены перейти на новую терминологию.

Часть II

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Глава 3

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Измерения напряжения и силы тока — наиболее распространенный вид измерений. Эти измерения осуществляются в широком диапазоне частот — от постоянного тока и инфранизких частот (сотые доли герца) до сверхвысоких частот (ГГц) и в диапазоне измеряемых значений напряжения и тока — соответственно от нановольт и наноампер до сотен киловольт и килоампер при большом разнообразии форм измеряемого напряжения и тока.

Измерение постоянных напряжения и силы тока заключается в нахождении их значений и определении полярности. Целью измерения переменных напряжения и силы тока является нахождение какого-либо их параметра.

Переменный ток промышленной частоты имеет синусоидальную форму и характеризуется мгновенным, средним квадратическим значением, амплитудой и фазой:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

В электронике наряду с сигналами синусоидальной формы широко используют и несинусоидальные сигналы (рис. 3.1). Такие сигналы характеризуются пиковыми значениями (максимальными значениями из всех мгновенных значений) в положительных или отрицательных полуволнах $X_{\max+}$ и $X_{\max-}$, средним квадратическим и средневывпрямленным значениями, а также средним значением, часто называемым постоянной составляющей.

Среднее значение равно среднему арифметическому всех мгновенных значений за период

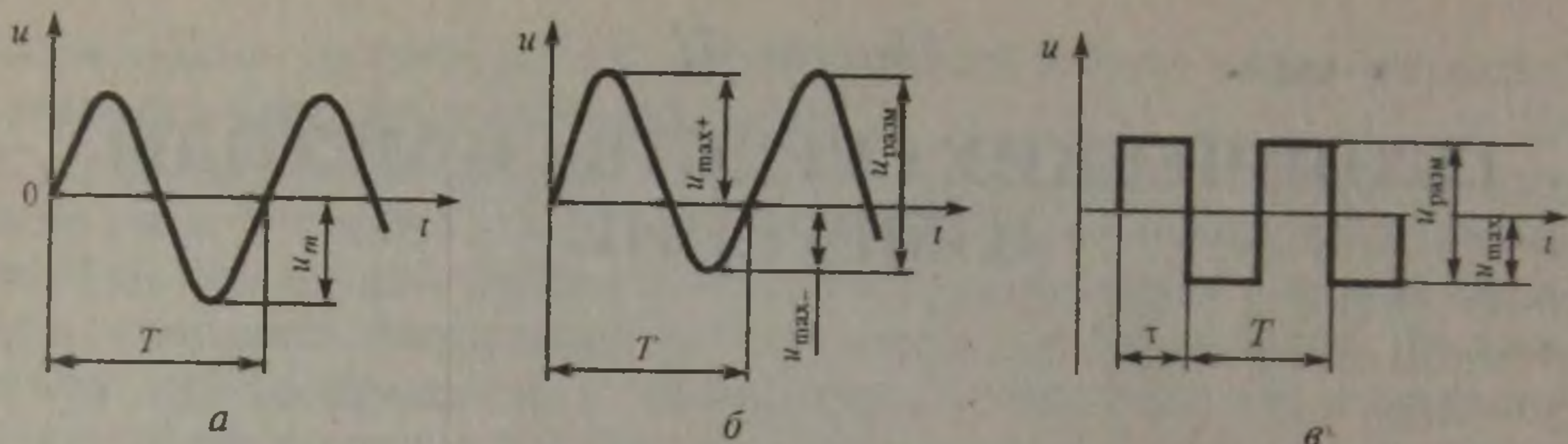


Рис. 3.1. Некоторые формы измеряемых сигналов

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt. \quad (3.1)$$

Средневыпрямленное значение определяют как среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период

$$X_{\text{ср.в}} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt. \quad (3.2)$$

Среднее квадратическое значение находят как корень квадратный из среднего за период квадрата мгновенных значений

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}. \quad (3.3)$$

Для периодических колебаний любой формы связь между амплитудой и средним квадратическим значением определяется формулой

$$X_m = XK_a,$$

где K_a — коэффициент амплитуды.

Средневыпрямленное и среднее квадратическое значение связаны между собой коэффициентом формы K_f

$$X = X_{\text{ср.в}} K_f.$$

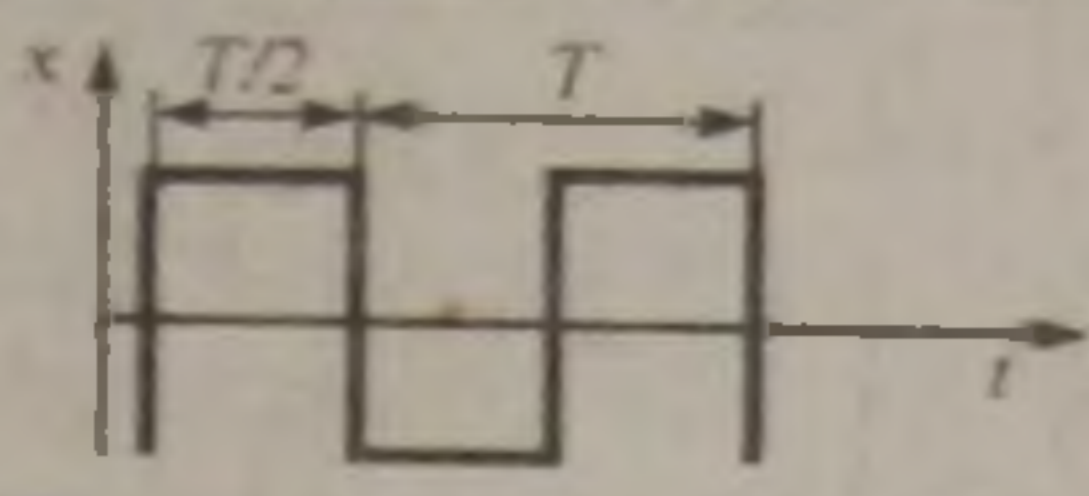
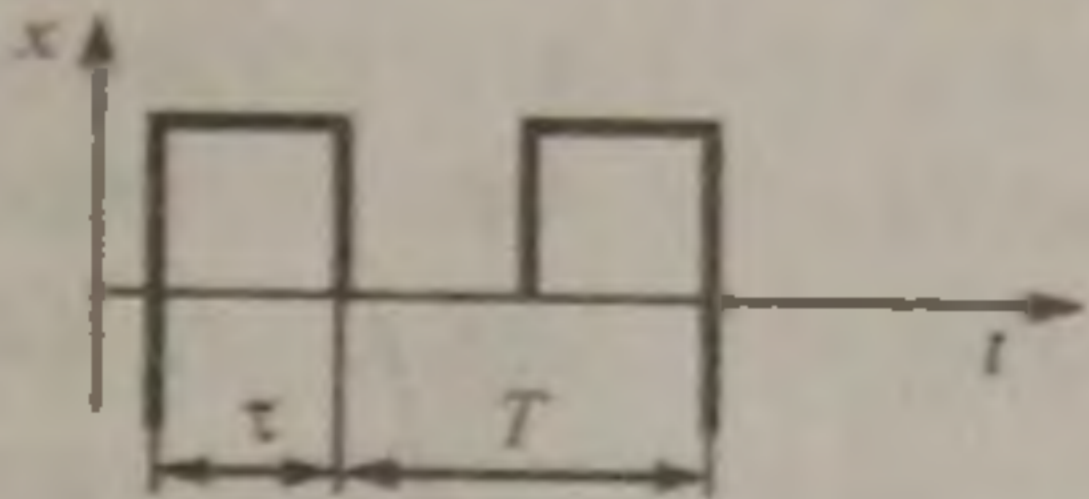
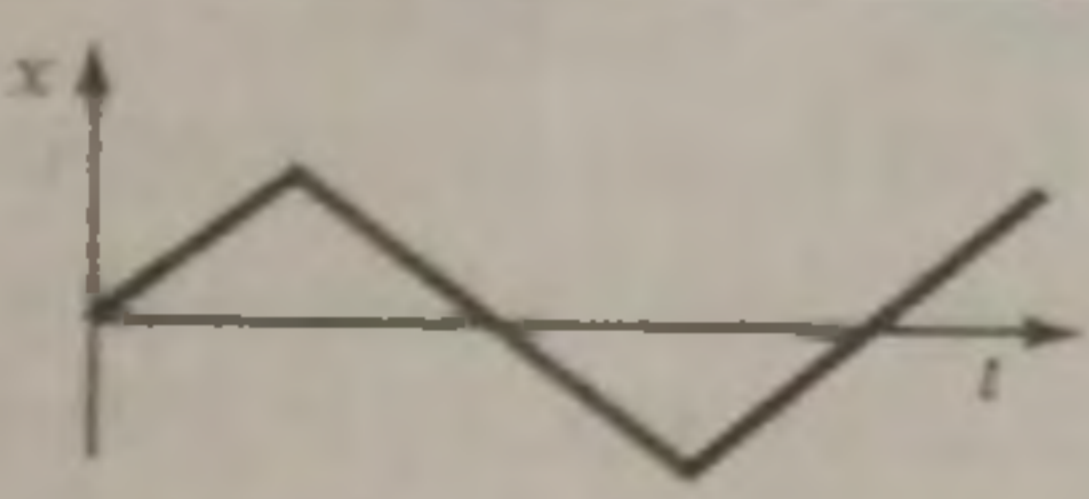
Коэффициенты формы и амплитуды однополярных импульсов определяются их скважностью $Q = T/\tau$; $K_a = K_f = \sqrt{Q}$.

Для некоторых, часто используемых форм сигналов коэффициенты амплитуды и формы приведены в табл. 3.1.

Для измерения напряжения и тока применяются как методы непосредственной оценки, так и методы сравнения.

Выбор методов и средств измерения напряжения и силы тока обуславливается требуемой точностью измерений, амплитудным и частот-

Таблица 3.1

Форма сигнала	Коэффициент формы K_f	Коэффициент амплитуды K_a
$x(t) = X_m \sin \omega t$	1,11	1,41
	1	1
	$\sqrt{T/\tau}$	$\sqrt{T/\tau}$
	1,16	1,73

ным диапазонами измеряемого сигнала, мощностью, потребляемой прибором от измерительной цепи и т.д.

3.2. КЛАССЫ ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

Для обеспечения единства измерений и взаимозаменяемости средств измерений характеристики их метрологических свойств (метрологические характеристики) нормируются и регламентируются стандартами. Номенклатура метрологических характеристик 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 метрологических характеристик можно выделить следующие их 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) прибора, 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 измерения и необходимые для оценивания динамических погрешностей измерений;

– функции влияния, отражающие зависимость метрологических характеристик средств измерения от воздействия влияющих величин или неинформативных параметров входного сигнала.

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.

Обычно метрологические характеристики нормируются отдельно для нормальных и рабочих условий применения средств измерений. Нормальными считаются такие условия, при которых изменением метрологических характеристик под воздействием влияющих величин можно пренебречь. Так, для многих типов средств измерений нормальными условиями применения являются: температура $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, атмосферное давление 84... 106 кПа, относительная влажность 30... 80%. Рабочие условия отличаются от нормальных более широкими диапазонами влияющих величин.

Учет всех нормируемых метрологических характеристик средства измерений при оценивании погрешности результата измерений, как видно, сложная и трудоемкая процедура, оправданная при измерениях повышенной точности. При измерениях на производстве, в обиходе такая точность не всегда нужна. В то же время, определенная информация о возможной инструментальной составляющей погрешности измерения 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 измерения данного типа. При этом пределы допускаемых погрешностей нормируют и выражают в форме абсолютных, приведенных или относительных погрешностей, в зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений. *Приведенной* называется относительная погрешность, вычисленная в процентах от некоторого нормирующего значения. В качестве нормирующего обычно принимается конечное значение шкалы (верхний предел измерения для приборов с односторонней шкалой или сумма пределов — для приборов с нулем посередине).

Пределы допускаемой абсолютной погрешности устанавливают по формулам

$$\Delta = \pm a \quad (3.4)$$

или

$$\Delta = \pm (a + bx), \quad (3.5)$$

где x — значение измеряемой величины; a, b — положительные числа, не зависящие от x .

Нормирование в соответствии с (3.5) означает, что в составе погрешности средства измерения присутствуют аддитивная и мультипликативная составляющие, например, для генератора низкой частоты ГЗ-36 $\Delta = \pm(0,03f + 2)$ Гц.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности определяют по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta \cdot 100}{X_n} = \pm p\%, \quad (3.6)$$

где X_n — нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и x ; p — отвлеченное положительное число, выбираемое из стандартизованного ряда значений ($1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; ..., $5 \cdot 10^n$; ..., где $n = 1, 0, -1, -2$ и т.д.).

Для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой нормирующее значение устанавливают равным длине шкалы.

Пределы допускаемой относительной основной погрешности: если Δ установлена по формуле (3.4)

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \cdot 100 = \pm q\%; \quad (3.7)$$

если Δ установлена по (3.5)

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_x}{x} - 1 \right) \right] \%, \quad (3.8)$$

где q — отвлеченное положительное число, выбираемое из стандартизованного ряда значений; X_x — больший по модулю из пределов измерений (верхний предел измерения, или сумма пределов измерения для приборов с нулем посередине); c, d — положительные числа, выбираемые из стандартизованного ряда; x — показание прибора.

Пределы допускаемых дополнительных погрешностей, как правило, устанавливают в виде дольного значения предела допускаемой основной погрешности. Обозначение классов точности наносится на шкалы, щитки или корпуса приборов.

Классы точности средств измерений обозначаются условными знаками (буквами, цифрами). Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых выражают в форме приведенной погрешности или относительной погрешности в соответствии с (3.6) и (3.7), классы точности обозначаются числами, равными этим пределам в процентах. Чтобы отличить относительную погрешность от приведенной, обозначение класса точности в виде относительной погрешности обводят кружком (2.5). Если погрешность нормирована в процентах от длины шкалы, то под обоз-

начением класса ставится знак \surd . Если погрешность нормирована формулой (3.8), то класс точности обозначается как c/d (например, 0,02/0,01).

Пример. На шкале амперметра с пределами измерения 0...10 А нанесено обозначение класса точности 2,5. Это означает, что для данного прибора нормирована приведенная погрешность. Подставляя в (3.6) $X_n = 10$ А и $p = 2,5$ получим $\Delta = \frac{X_n}{100} \cdot 2,5 = 0,25$ А.

Если бы обозначение класса точности было $\textcircled{2,5}$, то погрешность следовало бы вычислить в процентах от измеренного значения. Так, при $I_{\text{изм.}} = 2$ А, погрешность прибора не должна превышать $\frac{2 \cdot 2,5}{100} = 0,05$ А.

3.3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Для измерения напряжения и силы тока широко применяются электромеханические приборы. Общим термином электромеханические приборы обозначают средства измерений, структурная схема которых представлена на рис. 3.2. Эта схема включает в себя измерительную схему ИС, измерительный механизм ИМ и отсчетное устройство ОУ. К электромеханической группе принадлежат измерительные приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической и индукционной систем. Приборы этих систем часто входят в состав и других, более сложных, средств измерений. По физическому принципу, положенному в основу построения и конструктивному исполнению, эти приборы относятся к группе аналоговых средств измерения, т.е. средств измерения, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины.

Измерительная схема представляет собой совокупность сопротивлений, индуктивностей, емкостей и иных элементов электрической цепи прибора и имеет своей основной задачей преобразовать измеряемую физическую величину X в некоторую новую величину Y , под воздействием которой происходит перемещение α подвижной части измерительного механизма, отсчитываемое с помощью отсчетного устройства. Таким образом, если выполняется зависимость $\alpha = f(X)$, то прибор может быть проградуирован в единицах измеряемой величины. Понятно, что для этого необходимо, чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовало

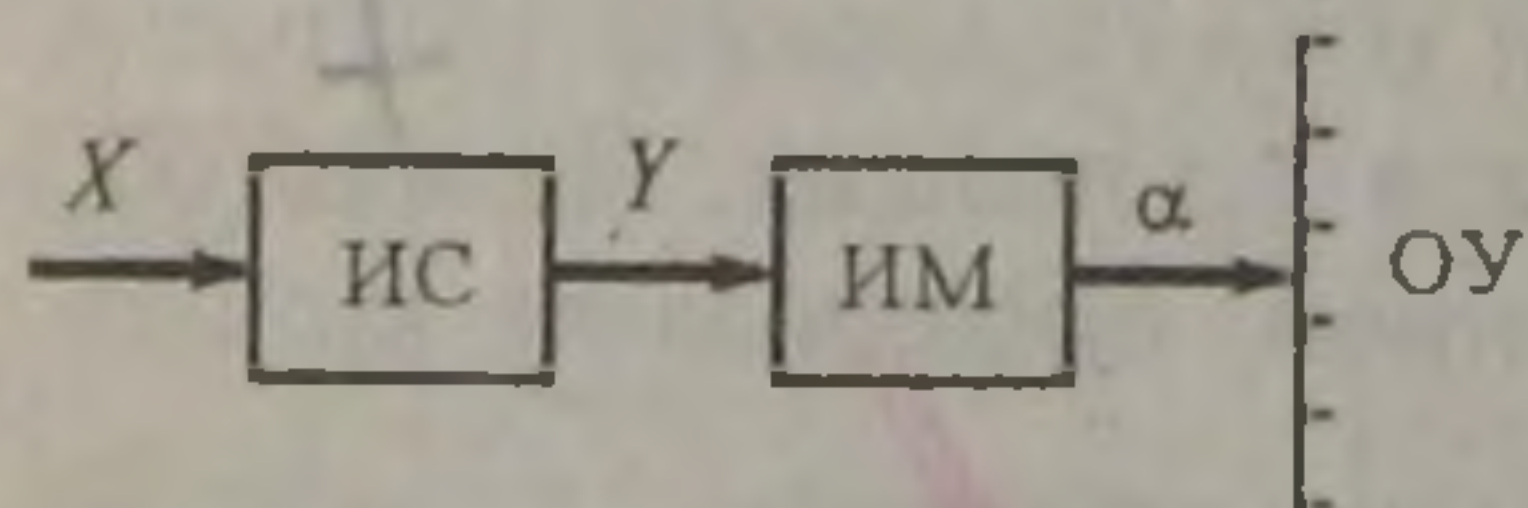


Рис. 3.2. Структура электромеханических приборов

одно, и только одно, определенное отклонение α . Не менее важно, чтобы параметры схемы и измерительного механизма не изменялись при изменении внешних условий, например, температуры окружающей среды, частоты питающего схему тока и других факторов.

В большинстве электромеханических приборов выходным перемещением α является угловое перемещение стрелки. Реже встречаются конструкции приборов с линейным перемещением указателя. Рассмотрим работу электромеханического прибора с угловым перемещением стрелки. Подвижная часть измерительного механизма изображена на рис. 3.3 и представляет собой ось 1 со стрелкой 2, вращающуюся в подпятниках 3. Возможный угол поворота стрелки ограничен упорами 4; шкала прибора — 5.

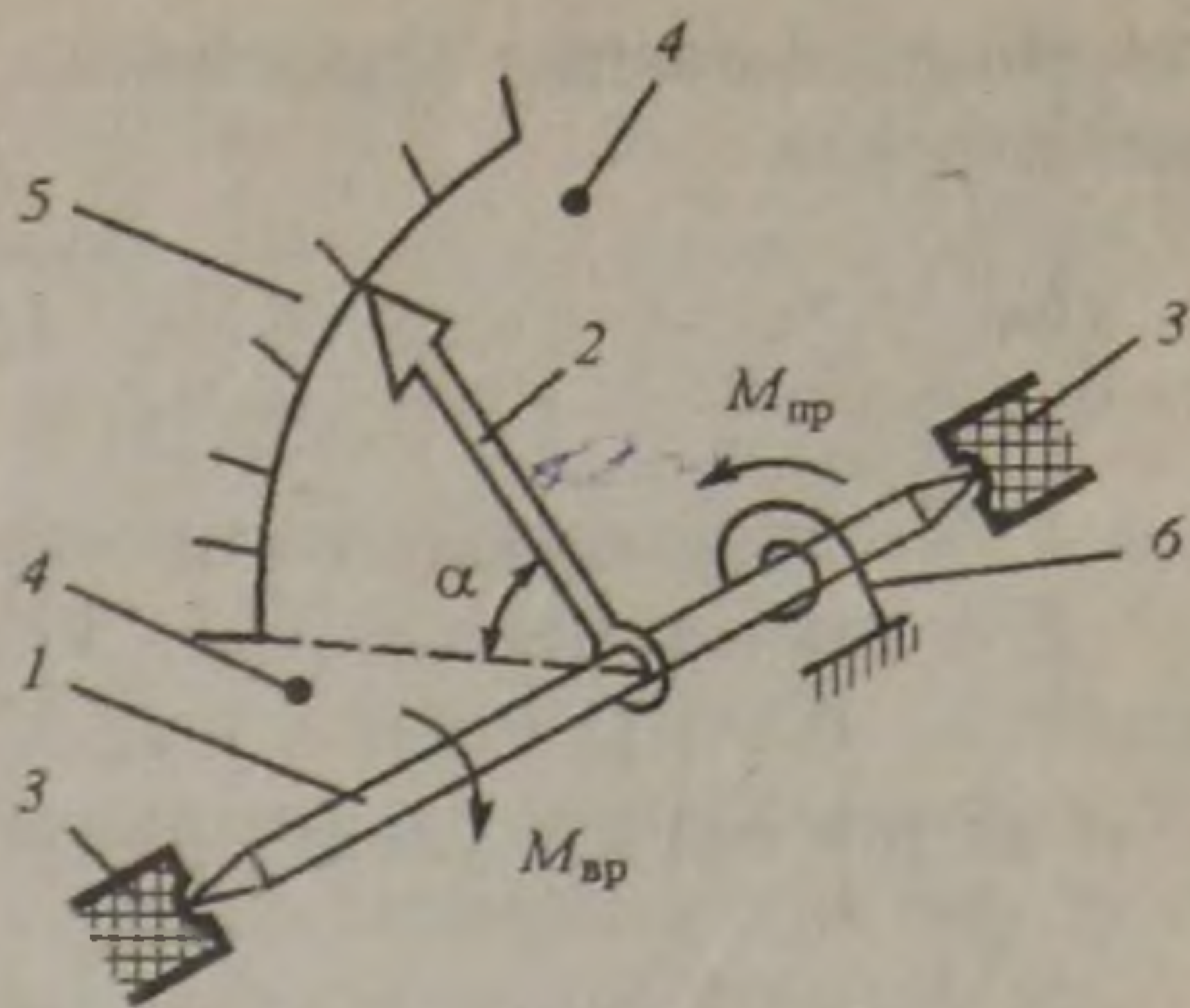


Рис. 3.3. Подвижная часть измерительного механизма электромеханического прибора

При подаче на вход измерительной схемы прибора измеряемой величины возникает вращающий момент, описываемый выражением

$$M_{вp} = f_1(X). \quad (3.9)$$

Чтобы каждому значению измеряемой величины X соответствовало определенное отклонение стрелки α необходимо уравновесить вращающий момент $M_{вp}$ противодействующим моментом $M_{пр}$, противоположным вращающему и возрастающим по мере увеличения угла поворота подвижной части. В большинстве электроизмерительных приборов противодействующий момент создается плоской спиральной пружинкой 6, для которой справедливо соотношение

$$M_{пр} = W\alpha, \quad (3.10)$$

где W — коэффициент, зависящий от свойств материала и размеров пружинки. При совместном воздействии вращающего и противодействующего моментов положение равновесия, т.е. установившееся отклонение стрелки определяется из условия $M_{вp} = M_{пр}$. Учитывая (3.9) и (3.10), получим

$$\alpha = \frac{f_1(X)}{W} = f(X). \quad (3.11)$$

Решение этого уравнения представляет собой градуировочную характеристику прибора. Из (3.11) следует, что характер градуировочной характеристики определяется видом функциональной зависимости (3.9).

Подвижная часть измерительного механизма представляет собой колебательную систему. Для того чтобы в процессе достижения установившегося положения стрелка прибора не испытывала слишком долгих колебаний в электромеханических приборах, применяются успокоители,

создающие момент успокоения, пропорциональный скорости перемещения стрелки

$$M_{\text{усп}} = P \frac{d\alpha}{dt},$$

где P — коэффициент успокоения.

Различают воздушные, жидкостные и магнитоиндукционные успокоители. В воздушных и жидкостных успокоителях успокоение достигается торможением специального элемента подвижной части (лепестка, поршня) за счет трения о воздух или жидкость.

В магнитоиндукционных успокоителях торможение осуществляется за счет взаимодействия магнитных полей магнита и токов, индуцированных в проводящих элементах подвижной части при их движении в поле этого магнита.

Наиболее распространенными в практике технических измерений являются электромеханические приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем.

Приборы магнитоэлектрической системы. В приборах магнитоэлектрической системы вращающий момент создается за счет взаимодействия поля постоянного магнита с рамкой (катушкой), по которой протекает ток. Конструктивно измерительный механизм прибора может быть выполнен либо с подвижным магнитом, либо с подвижной рамкой. На рис. 3.4 показана конструкция прибора с подвижной рамкой. Постоянный магнит 1, магнитопровод с полюсными наконечниками 2 и неподвижный сердечник 3 составляют магнитную систему механизма. В зазоре между полюсными наконечниками и сердечником создается сильное радиальное магнитное поле, в котором находится подвижная прямоугольная рамка 4, намотанная тонким медным или алюминиевым проводом на алюминиевом каркасе (или без каркаса). Рамка закреплена между полуосями 5. Спиральные пружинки 6, предназначенные для создания противодействующего момента, одновременно используются для подачи измеряемого тока в рамку. Рамка жестко соединена со стрелкой 7. Для балансировки подвижной части имеются передвигные грузики 8.

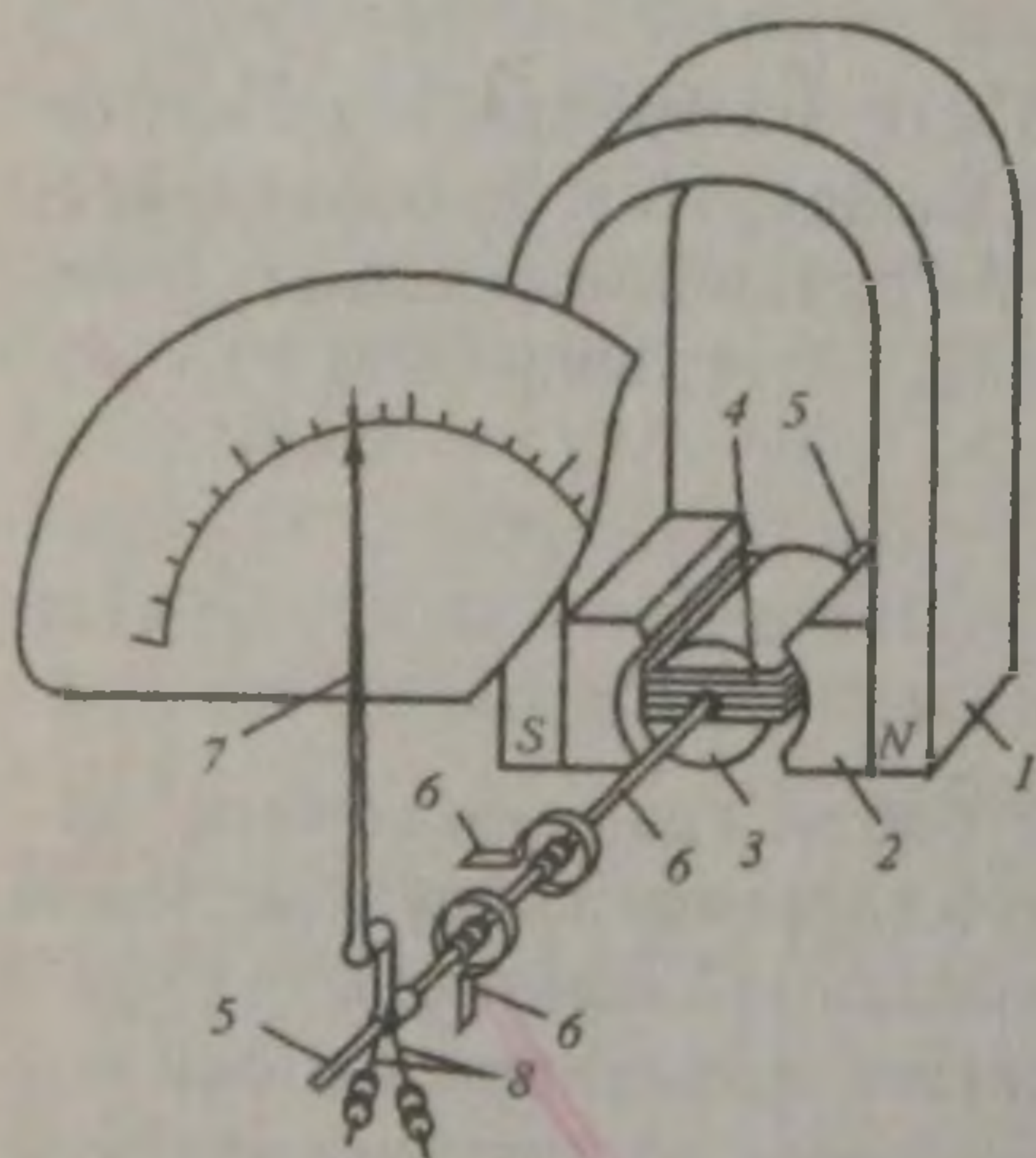


Рис. 3.4. Устройство прибора магнитоэлектрической системы

Выражение для вращающего момента, действующего на подвижную систему при прохождении через рамку тока I получим, используя формулу для силы Лоренца, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле.

Выражение для вращающего момента, действующего на подвижную систему при прохождении через рамку тока I получим, используя формулу для силы Лоренца, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле.

На рис. 3.5 изображена рамка прибора, находящаяся в зазоре магнитной системы. При прохождении электрического тока I через проводник длиной l , расположенный в магнитном поле с индукцией B , на проводник действует сила F , определяемая формулой

$$F = IBl \sin(\hat{B}, I),$$

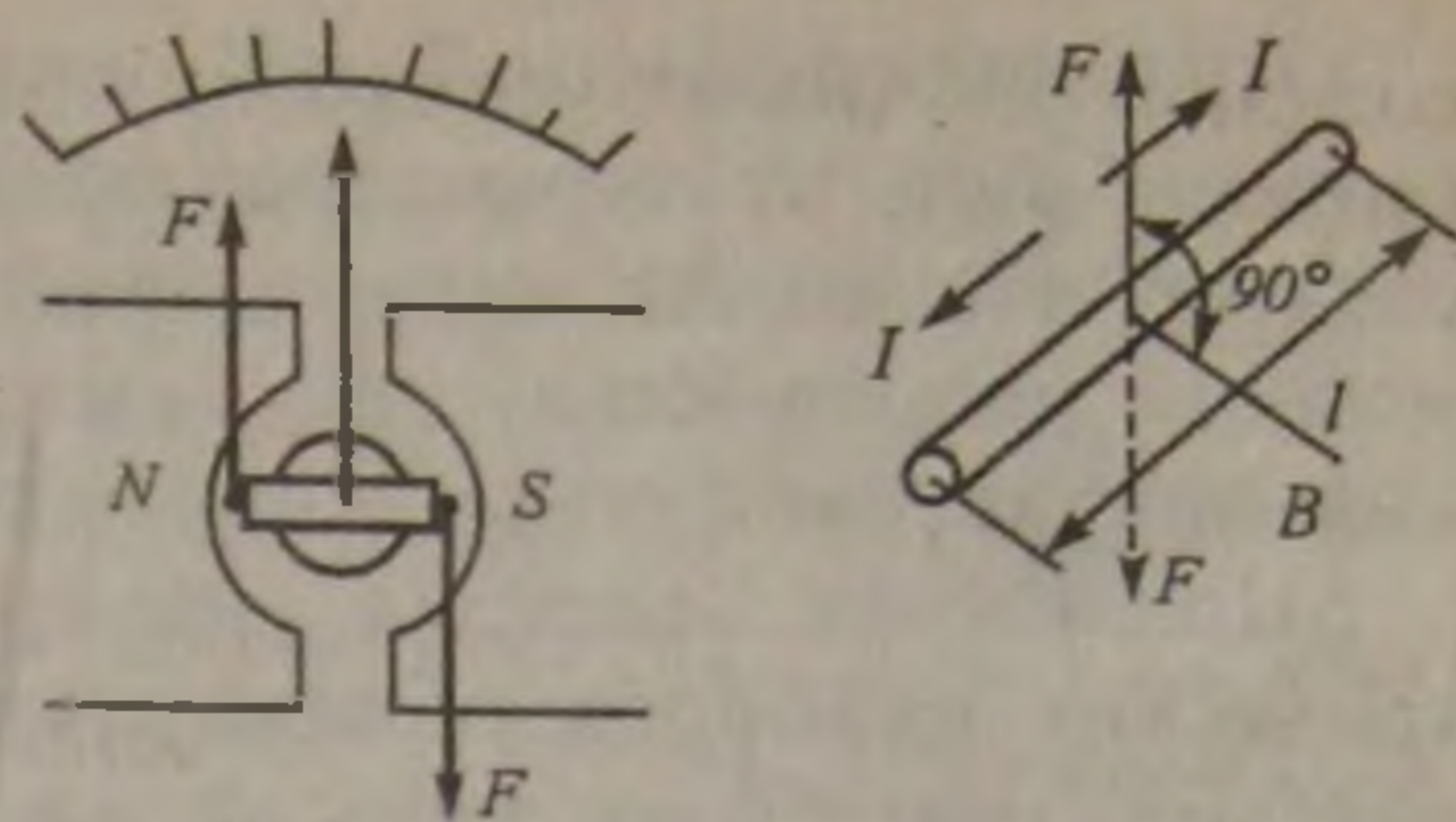


Рис. 3.5. Рамка с током в магнитном поле

где (\hat{B}, I) — угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.

Рабочими участками витка проволоки, намотанной на рамку, являются отрезки длиной l , расположенные на сторонах рамки параллельных оси вращения.

Для этих отрезков угол между направлением тока и вектором магнитной индукции равен 90° ; следовательно, на отрезок проволоки длиной l действует сила $F = IBl$. При этом силы, действующие на противоположные отрезки витков, равны, но противоположны по направлению. В результате, на рамку из w витков проволоки действует вращающий момент

$$M_{в.р} = 2F \frac{b}{2} = BS_p w I, \quad (3.12)$$

где b — ширина рамки; S_p — площадь рамки.

Приравняв (3.12) и (3.10), получим

$$\alpha = \frac{BS_p w}{W} I. \quad (3.13)$$

Согласно (3.13), угол отклонения подвижной части пропорционален току, протекающему по рамке. Коэффициент пропорциональности

$$S_I = \frac{BS_p w}{W},$$

называется *чувствительностью* магнитоэлектрического прибора к току.

Для получения зависимости угла отклонения α от приложенного к рамке напряжения подставим в (3.13) $I = U / R_p$ (где R_p — сопротивление рамки):

$$\alpha = \frac{BS_p w}{WR_p} U = S_U U,$$

где S_U — чувствительность магнитоэлектрического прибора к напряжению.

Чувствительности S_I и S_U являются постоянными величинами, зависящими лишь от параметров измерительной цепи и механизма. Отсюда следует, что шкала магнитоэлектрического прибора равномерна, а изменение направления тока, протекающего через рамку, ведет к изменению направления угла отклонения стрелки.

Подвижная система измерительного механизма магнитоэлектрических приборов обладает значительной инерцией, поэтому такие приборы реагируют лишь на постоянную составляющую тока и непригодны для измерения переменного тока или напряжения. Для измерений в цепях переменного тока необходимо предварительно преобразовать переменный ток в постоянный.

Из группы аналоговых электромеханических приборов приборы магнитоэлектрической системы относятся к числу наиболее точных и чувствительных. Изменения температуры окружающей среды и внешние магнитные поля мало влияют на их работу. Равномерная шкала, малое потребление энергии также относятся к достоинствам магнитоэлектрических приборов.

Так как рамка прибора намотана тонким проводом, это не позволяет пропускать через нее токи, превышающие десятки миллиампер. Превышение указанных значений может привести к повреждению провода рамки или спиральной пружинки. Таким образом, возникает задача расширения пределов измерения магнитоэлектрических амперметров и вольтметров.

Расширение пределов измерения амперметров достигается включением шунта параллельно прибору (рис. 3.6). Сопротивление шунта $R_{ш}$ должно быть меньше сопротивления рамки прибора R_p и подбирается так, чтобы при измерении основная часть измеряемого тока проходила через шунт, а ток, протекающий через рамку прибора, не превышал допустимого значения. Если необходимо иметь верхний предел измерения амперметра I , а верхний предел измерения без шунта I_A , то сопротивление шунта

$$R_{ш} = \frac{R_p}{n-1},$$

где $n = \frac{I}{I_A}$.

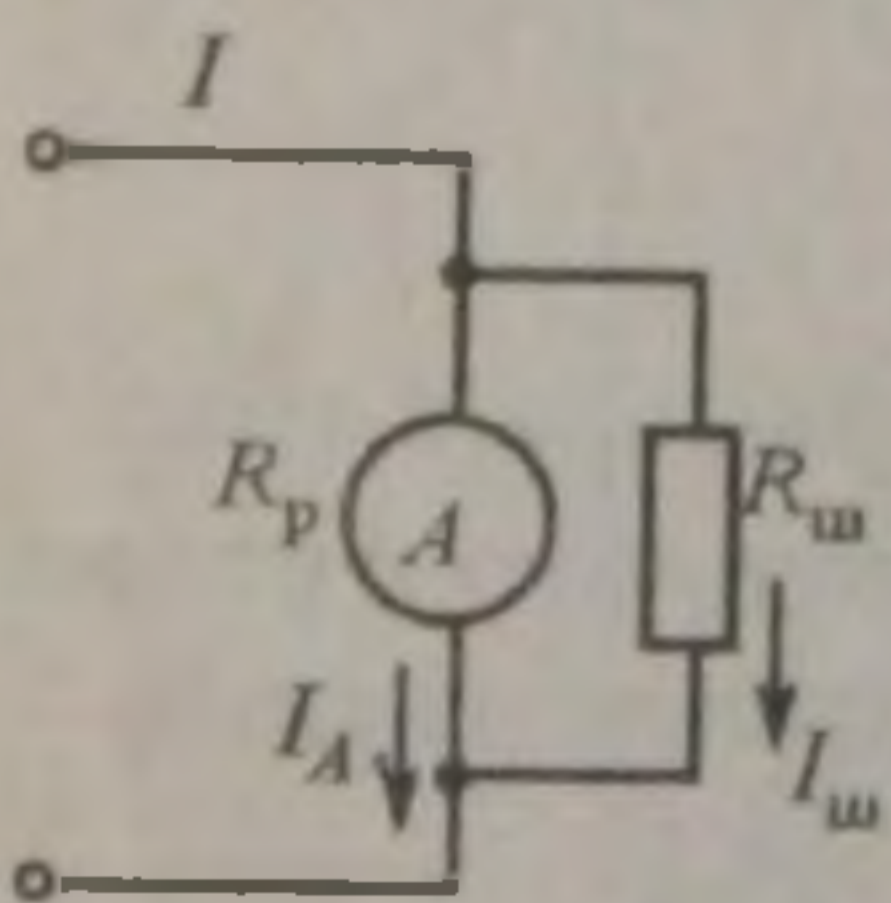


Рис. 3.6. Расширение пределов измерения амперметра

Амперметры для измерения сравнительно небольших токов (до нескольких десятков ампер) имеют внутренние шунты, вмонтированные в корпус прибора. Для измерения больших токов (до нескольких тысяч ампер) применяются наружные шунты. В целях стандартизации наружные шунты выпускаются на различные номинальные падения напряжения (от 45 до 300 мВ) и классов точности от 0,02 до 0,5.

Для расширения пределов измерения вольтметра последовательно с сопротивлением рамки включается добавочное сопротивление R_d (рис. 3.7), которое ограничивает падение напряжения на рамке прибора до допустимых пределов. Если необходимо измерять напряжение U , а верхний предел измерения прибора U_v , то величина добавочного сопротивления должна быть

$$R_d = R_p (n - 1),$$

где $n = \frac{U}{U_v}$.

Добавочные сопротивления также бывают внутренними, встроенными в корпус вольтметра (при напряжении до 600 В) или наружными (при напряжении 600...1500 В). Наружные добавочные сопротивления выпускаются на определенные номинальные токи (от 0,5 до 30 мА) и имеют классы точности от 0,02 до 1. Шунты и добавочные сопротивления изготавливаются из материалов с высоким удельным сопротивлением (манганин, константан), имеющих температурный коэффициент сопротивления близкий к нулю.

Гальванометры. Высокочувствительные магнитоэлектрические приборы для измерения очень малых токов и напряжений называются гальванометрами. Гальванометры часто используют в качестве нуль-индикаторов, фиксирующих отсутствие тока в цепи. У таких гальванометров нулевая отметка находится в середине шкалы.

Так как чувствительность гальванометров очень высока, их градуировочная характеристика нестабильна и зависит от совокупности внешних влияющих факторов. Поэтому чувствительные гальванометры при выпуске из производства не градуируются в единицах измеряемой физической величины и им не присваиваются классы точности. В качестве же метрологических характеристик гальванометров обычно указывают их чувствительность к току или напряжению и сопротивление рамки. Различают гальванометры с подвижной частью (рамкой) на кернах, на растяжках и на подвесе.

В гальванометрах с подвижной частью на кернах рамка снабжена двумя полуосями с впрессованными в них стальными кернами. Последние опираются на корундовые или рубиновые подпятники (рис. 3.8, а). Чувствительность такого гальванометра ограничивается трением керна о подпятники.

Для повышения чувствительности рамку гальванометра устанавливают

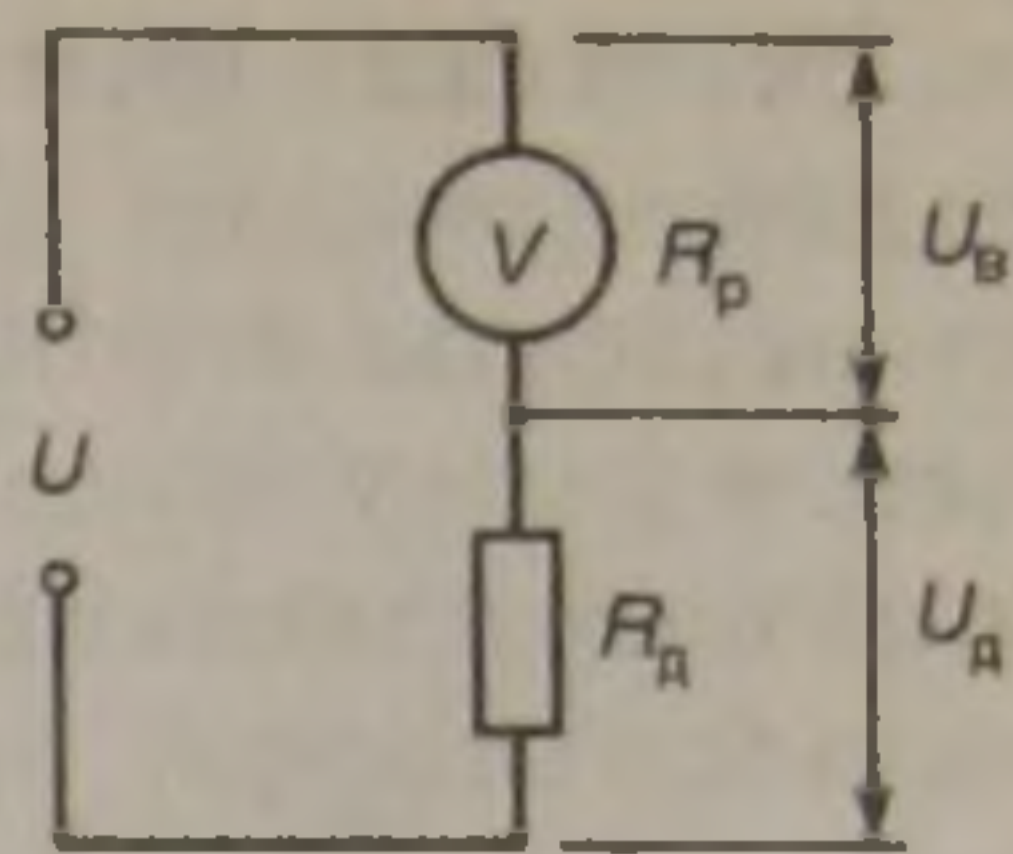


Рис. 3.7. Расширение пределов измерения вольтметра

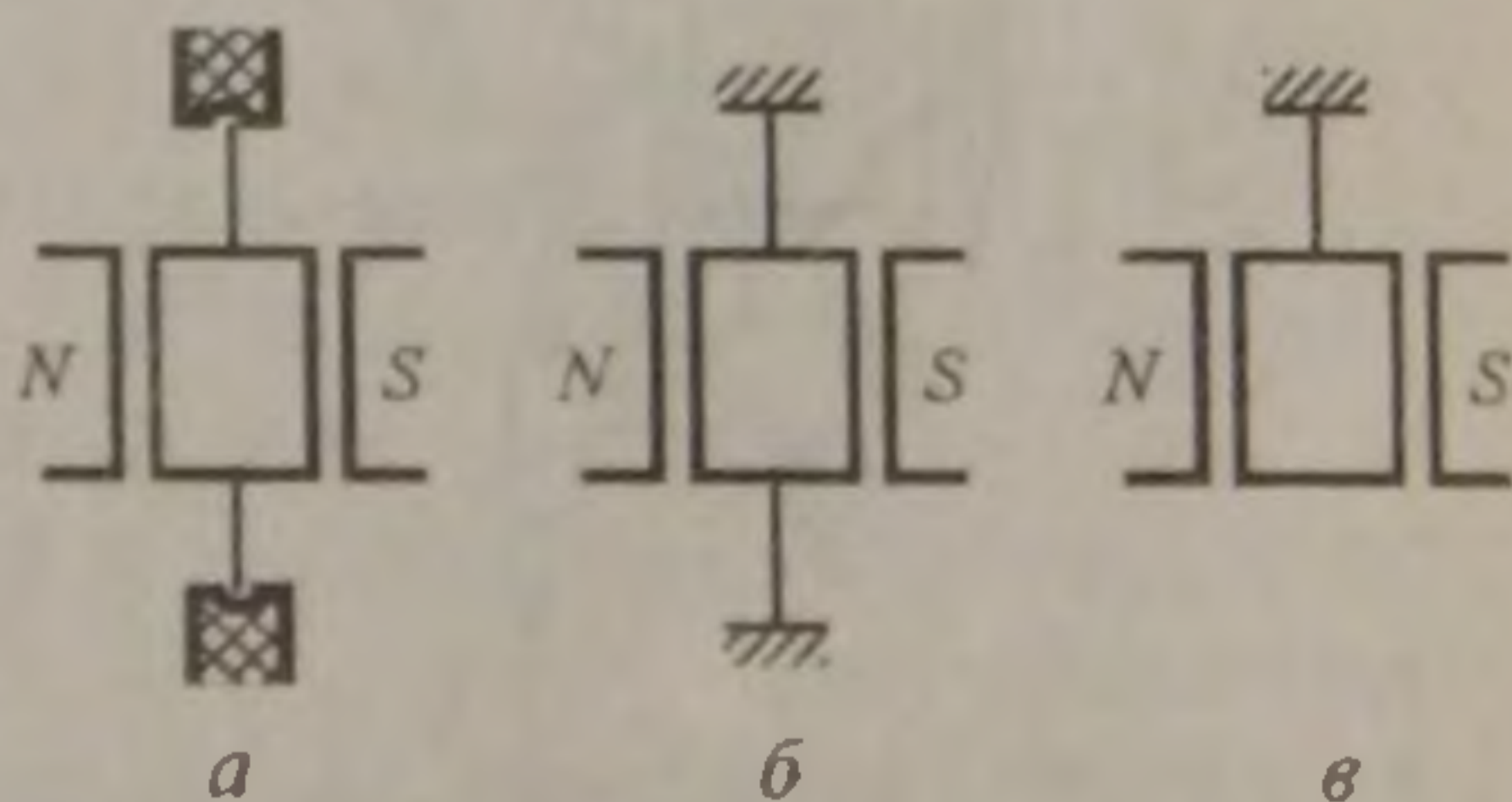


Рис. 3.8. Способы крепления рамки гальванометров

на растяжках (рис. 3.8, б), а в особо чувствительных гальванометрах на подвесе (рис. 3.8, в). Растяжки и подвесы представляют собой тонкие упругие ленты или нити из специальных сплавов. Измеряемый ток поступает в рамку через эти ленты или нити; они же одновременно служат для создания противодействующего момента. В гальванометрах с рамкой на подвесе вторым проводником является тончайшая лента или нить, не создающая противодействующего момента.

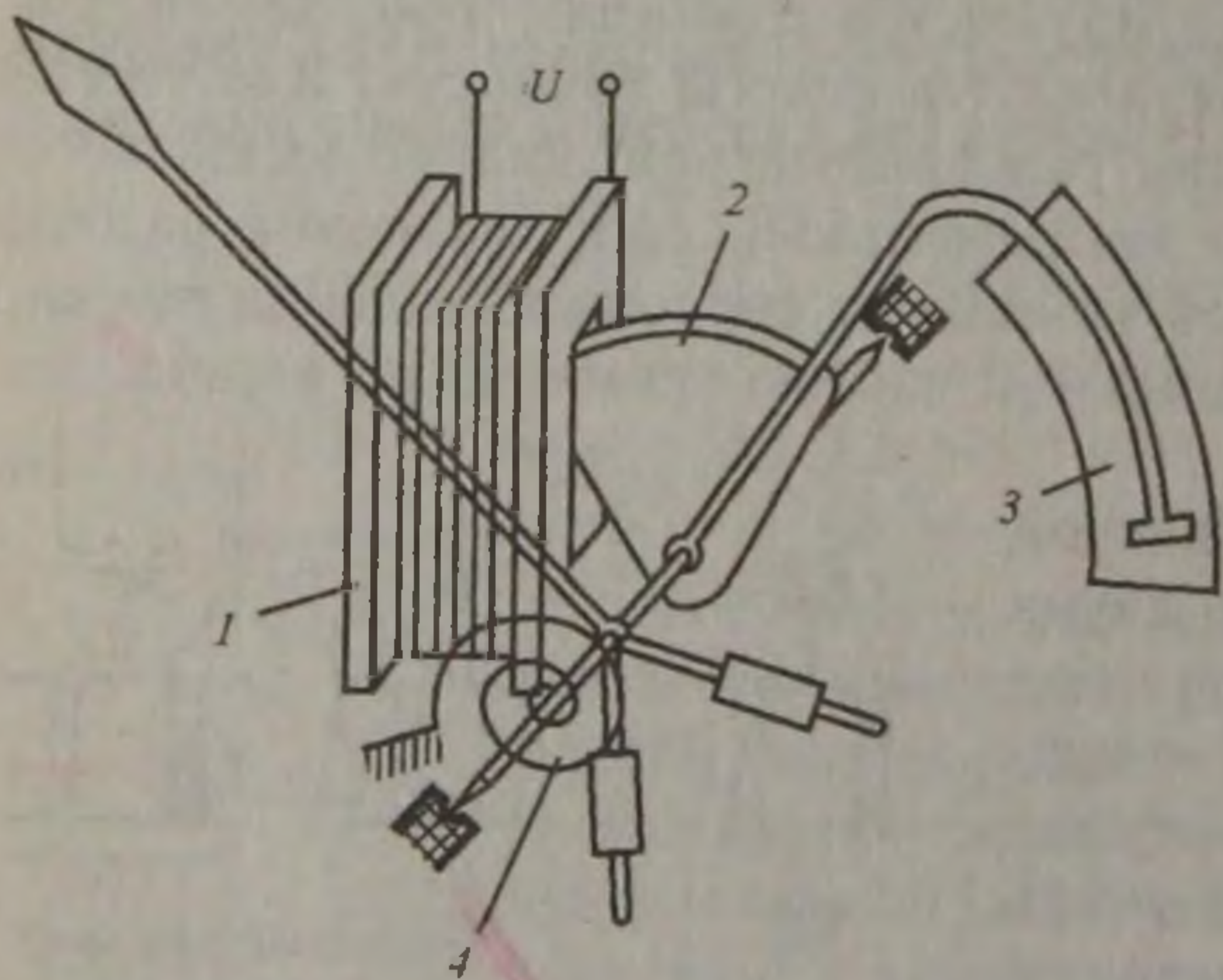
Современные гальванометры позволяют измерять токи в пределах $10^{-5} \dots 10^{-12}$ А и напряжения до 10^{-4} В.

Приборы электромагнитной системы. Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого током в неподвижной катушке, с подвижным ферромагнитным сердечником. Одна из конструкций электромагнитного механизма представлена на рис. 3.9, где 1 — катушка; 2 — сердечник, укрепленный на оси прибора; 3 — воздушный успокоитель; 4 — спиральная пружинка, создающая противодействующий момент. При включении прибора под действием магнитного поля катушки сердечник втягивается внутрь катушки. Подвижная часть механизма поворачивается до тех пор, пока вращающий момент не уравнивается противодействующим моментом, создаваемым пружинкой.

Вращающий момент, возникающий при прохождении тока I через катушку

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha},$$

где L — индуктивность катушки; α — угол поворота подвижной части.



Из условия равенства вращающего и противодействующего моментов получим

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{\partial L}{\partial \alpha} I^2.$$

Если по катушке протекает переменный ток $i(t) = I_m \sin \omega t$, то необходимо произвести усреднение по времени:

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{\partial L}{\partial \alpha} \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt.$$

Рис. 3.9. Устройство прибора электромагнитной системы

Если учесть, что среднее квадратическое значение тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt},$$

то

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{\partial L}{\partial \alpha} I^2. \quad (3.14)$$

Из (3.14) следует, что при измерении в цепи переменного тока угол поворота подвижной части прибора электромагнитной системы пропорционален квадрату среднего квадратического значения тока, т.е. не зависит от направления тока. Поэтому электромагнитные приборы одинаково пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного тока. В соответствии с (3.14) шкала прибора квадратичная, однако на практике ее можно приблизить к линейной подбором формы сердечника.

Достоинствами приборов электромагнитной системы являются простота конструкции, способность выдерживать значительные перегрузки, возможность градуировки приборов, предназначенных для измерений в цепях переменного тока, на постоянном токе. К недостаткам приборов можно отнести большое собственное потребление энергии, невысокую точность, малую чувствительность и сильное влияние магнитных полей.

Промышленностью выпускаются амперметры электромагнитной системы с верхним пределом измерения от долей ампера до 200 А, и вольтметры с пределами измерения от долей вольта до сотен вольт.

При необходимости расширения пределов измерения амперметров и вольтметров применяются шунты и добавочные сопротивления. Для расширения пределов измерения амперметров в области повышенных частот используются трансформаторы тока. На рис. 3.10 показано включение амперметров во вторичную обмотку трансформатора тока. Здесь w_1 — первичная обмотка; w_2 — вторичная обмотка; I_1 и I_2 — соответствующие токи.

Приборы электромагнитной системы применяются в основном в качестве щитовых амперметров и вольтметров переменного тока промышленной частоты. Класс точности щитовых приборов 1,5 и 2,5. В некоторых случаях они используются для работы на повышенных частотах: амперметры до 8000 Гц, вольтметры до 400 Гц. Выпускаются также переносные приборы электромагнитной системы классов точности 0,5 и 1,0 для измерения в лабораторных условиях.

Выпрямительные приборы. Выпрямительные приборы применяются для измерения напряжения и силы тока в частотном диапазоне от звуковых частот до высоких и

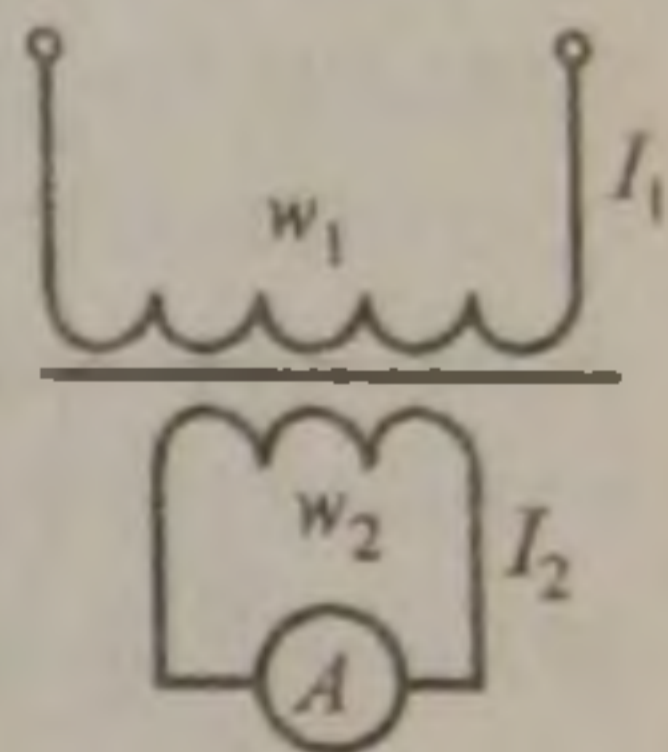


Рис. 3.10.
Включение амперметра с трансформатором тока

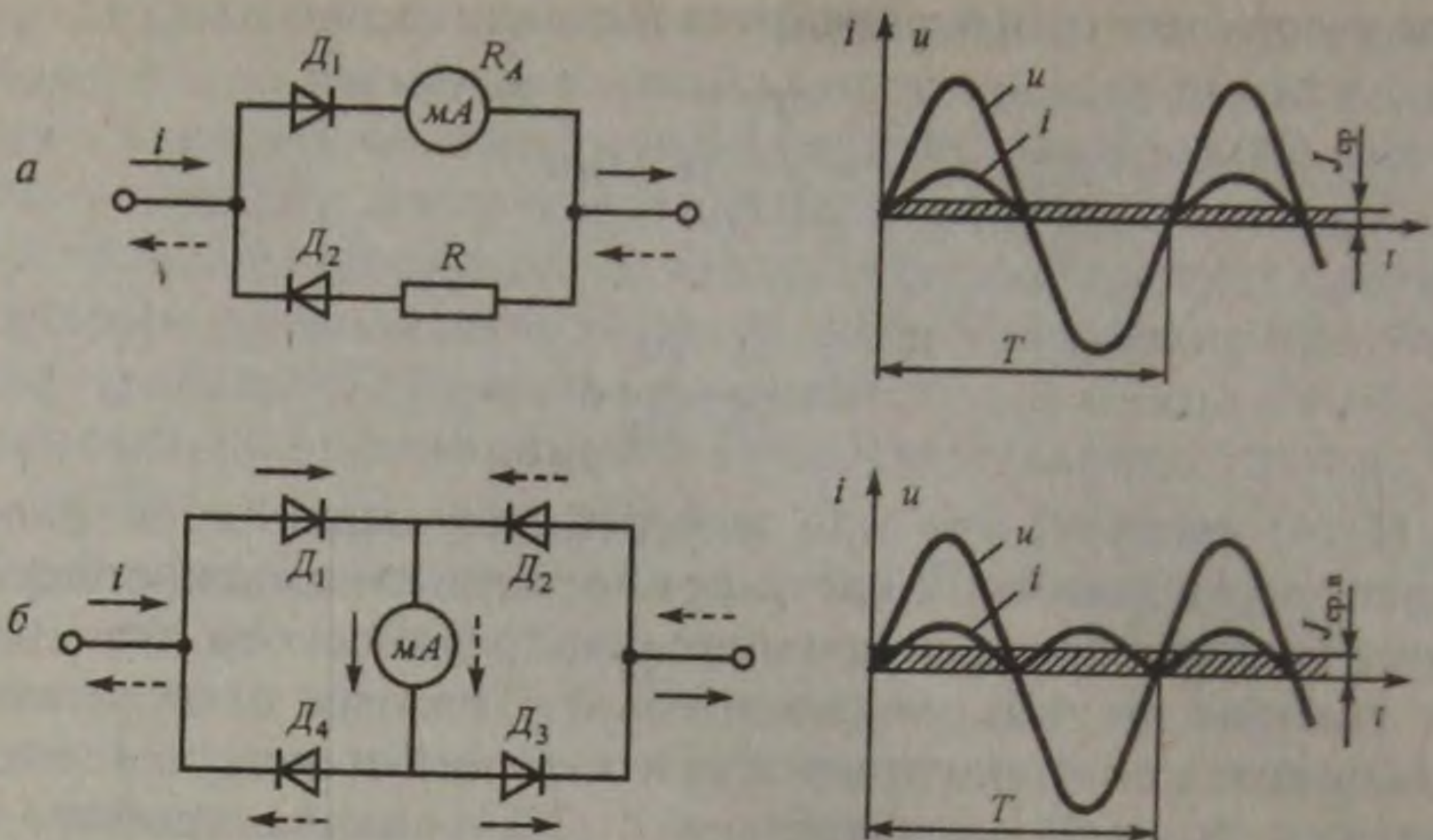


Рис. 3.11. Выпрямительные приборы

сверхвысоких частот. Принцип работы таких приборов заключается в выпрямлении переменного тока с помощью полупроводниковых диодов (рис. 3.11). Постоянная составляющая выпрямленного тока измеряется прибором магнитоэлектрической системы (микроамперметром, миллиамперметром). В схеме прибора используют однополупериодные и двухполупериодные выпрямители. В однополупериодных схемах (рис. 3.11, а) ток i через магнитоэлектрический прибор, включенный последовательно с диодом D_1 , пропускается только в положительный полупериод. В отрицательный полупериод, для которого сопротивление диода D_1 велико, ток протекает через диод D_2 , включенный параллельно прибору. Диод D_2 защищает диод D_1 от пробоя. Для уравнивания сопротивления параллельных ветвей последовательно со вторым диодом включен резистор R , сопротивление которого равно сопротивлению измерительной цепи прибора. Подвижная часть магнитоэлектрического прибора обладает механической инерцией и при частотах выше 10...20 Гц не успевает следить за мгновенными значениями вращающего момента, реагируя только на среднее значение момента. Из уравнения шкалы магнитоэлектрического прибора (3.13) следует, что отклонение стрелки выпрямительного прибора пропорционально среднему за период значению переменного тока. Для однополупериодного выпрямителя при токе синусоидальной формы

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_m}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t dt = \frac{I_m}{\pi} = 0,318 I_m$$

и показания прибора

$$\alpha = S_I I_{\text{ср}} \quad (3.15)$$

В двухполупериодных схемах выпрямителя (рис. 3.11, б) ток i , протекающий через прибор, увеличивается вдвое по сравнению с током, протекающим в схеме рис. 3.11, а. Для синусоидального тока

$$I_{\text{ср. в.}} = 0,636 I_{\text{ст.}}$$

Из (3.15) видно, что шкала выпрямительного прибора линейна и при любой форме кривой измеряемого тока отклонение стрелки прибора пропорционально среднему за период значению. Однако на практике шкалу выпрямительных приборов всегда градуируют в средних квадратических значениях напряжения (тока) синусоидальной формы. Следовательно, в приборах с двухполупериодным выпрямлением все значения оцифрованных делений шкалы как бы умножены на коэффициент формы $K_{\text{ф}} = 1,11$. Отсюда следует, что при измерении тока или напряжения несинусоидальной формы полученный отсчет по шкале такого выпрямительного прибора сначала нужно разделить на 1,11 (получить выпрямленное значение измеряемой величины), а затем умножить на коэффициент формы, соответствующий форме реального сигнала. В приборах с однополупериодным выпрямлением вместо 1,11 подставляют 2,22.

Выпрямительные приборы получили широкое распространение в качестве комбинированных измерителей постоянного и переменного тока и напряжения классов точности 1,5 и 2,5; с пределами измерения по току от 2 мА до 600 А; по напряжению — от 0,3 до 600 В.

Достоинствами выпрямительных приборов являются высокая чувствительность, малое собственное потребление энергии и возможность измерения в широком диапазоне частот. Частотный диапазон выпрямительных приборов определяется возможностями применяемых диодов. Так, применение точечных кремниевых диодов обеспечивает измерение переменных токов и напряжений до частот порядка $10^4 \dots 10^5$ Гц. Основными источниками погрешностей этих приборов являются изменения параметров диодов с течением времени, влияние окружающей температуры, а также отклонение формы кривой измеряемого тока или напряжения от той, при которой произведена градуировка прибора.

Термоэлектрические приборы. Эти приборы используются для измерения токов в диапазоне высоких частот. Термоэлектрический прибор состоит из термоэлектрического преобразователя и прибора магнитоэлектрической системы. Простейший термопреобразователь (рис. 3.12) содержит нагреватель H , по которому протекает измеряемый ток I и связанную

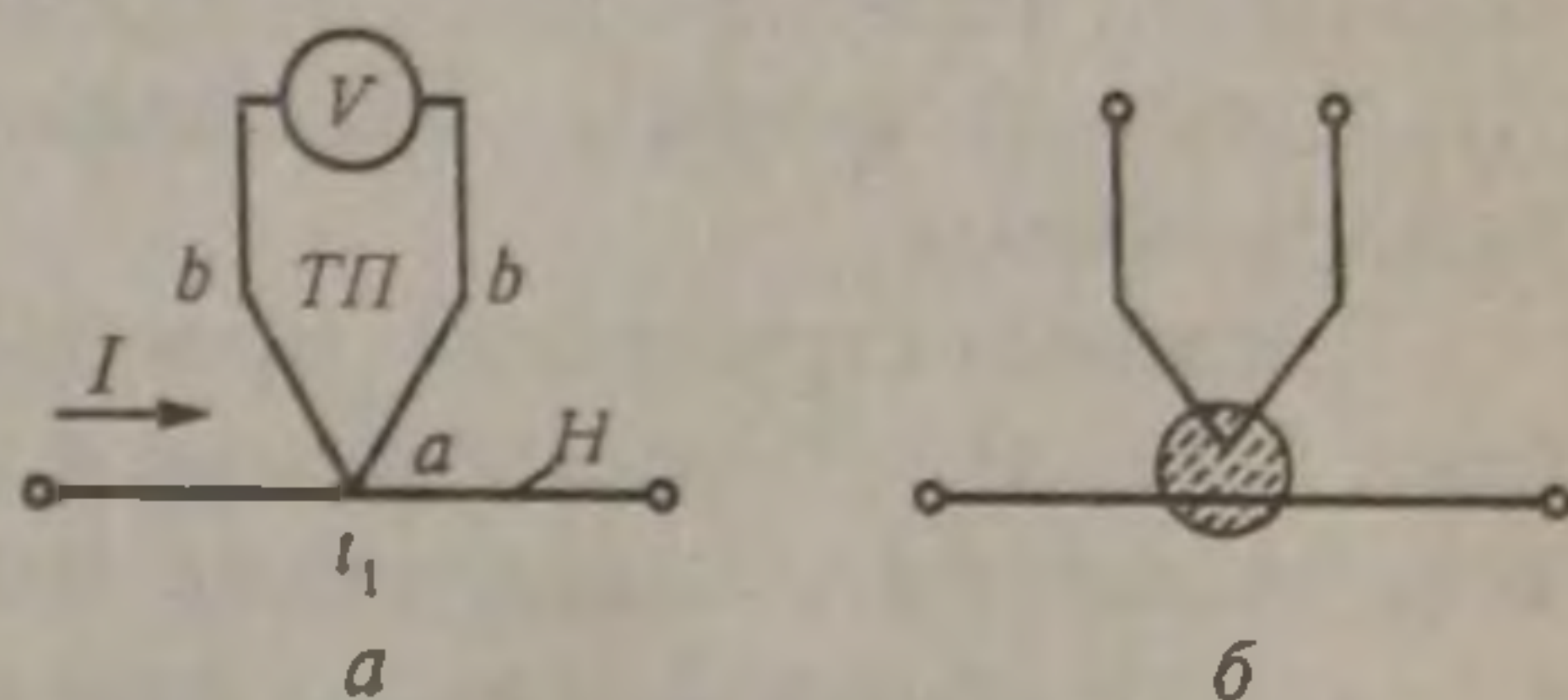


Рис. 3.12. Термоэлектрический преобразователь

с ним термопару $TП$ (см. главу 9). Рабочий спай термопары a находится в тепловом контакте с нагревателем. Нагреватель представляет собой тонкую проволоку из сплава с высоким удельным сопротивлением (нихром, манганин). Еще более тонкие проволочки из термоэлектродных материалов применяют для изготовления термопары. При прохождении измеряемого тока через нагреватель место контакта нагревателя и термопары нагревается до температуры t_1 , а холодный спай b остается при температуре окружающей среды t_0 . В установившемся тепловом режиме мощность, выделяемая в нагревателе $P_{\text{выд}}$ и мощность, рассеиваемая нагревателем в окружающую среду $P_{\text{рас}}$, равны. Если учесть, что

$$P_{\text{выд}} = I^2 R_n, \text{ а } P_{\text{рас}} = \alpha_m S \theta,$$

где α_m — коэффициент теплоотдачи от нагревателя к окружающей среде; S — площадь теплоотдающей поверхности нагревателя; θ — перегрев рабочего спая термопары над температурой окружающей среды ($\theta = t_1 - t_0$); R_n — сопротивление нагревателя, то

$$\theta = \frac{R_n}{\alpha_m S} I^2.$$

При перегреве рабочего спая термопары на величину θ в цепи термопары возникает термоэлектродвижущая сила

$$E = k\theta,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, при прохождении измеряемого тока через нагреватель в цепи магнитоэлектрического прибора возникает постоянный ток I_A , пропорциональный квадрату среднего квадратического значения измеряемого тока.

$$I_A = E / R_V,$$

где R_V — сопротивление магнитоэлектрического прибора.

Так как действие прибора основано на тепловом действии тока, то понятно, что магнитоэлектрический прибор с термоэлектрическим преобразователем измеряет среднее квадратическое значение переменного тока любой формы. Шкала термоэлектрического прибора близка к квадратичной.

Термоэлектрические преобразователи разделяются на контактные (рис. 3.12, *a*) и бесконтактные (рис. 3.12, *б*). В контактном преобразователе имеется гальваническая связь между нагревателем и термопарой, т.е. между входной и выходной цепями, что не всегда допустимо. В бесконтактном преобразователе нагреватель отделен от термопары изолятором из стекла или керамики, либо воздушной прослойкой.

Термоэлектрические приборы получили распространение преимущественно для измерения токов. В качестве вольтметров они практически не применяются, так как их входное сопротивление чрезвычайно мало.

К достоинствам приборов термоэлектрической системы можно отнести высокую чувствительность к измеряемому току, широкий диапазон частот, а также возможность измерения средних квадратических значений токов произвольной формы. Недостатком термоэлектрических приборов является неравномерность шкалы, зависимость показаний от температуры окружающей среды и большая инерционность термопреобразователей. Термоэлектрические приборы очень чувствительны к перегрузкам.

В зависимости от назначения термоэлектрические приборы имеют различные пределы измерения (от 1 мА до 50 А), классы точности (от 1,0 до 2,5) и частотный диапазон (от 45 Гц до сотен мегагерц).

3.4. КОМПЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Измерение тока и напряжения аналоговыми электромеханическими приборами возможно в лучшем случае с погрешностью 0,1% (класс точности прибора 0,1). Более точные измерения выполняют методом сравнения с мерой. Средства измерений, использующие метод сравнения, называются *компенсаторами* или *потенциометрами*.

Принцип действия компенсатора основан на уравнивании (компенсации) измеряемого напряжения известным падением напряжения на образцовом резисторе. Момент полной компенсации фиксируется по показаниям индикаторного прибора (нуль-индикатора).

Упрощенная схема компенсатора постоянного тока приведена на рис. 3.13. Схема содержит источник образцовой ЭДС E_n , образцовый резистор R_0 , вспомогательный источник питания ВБ, переменное сопротивление R , регулировочный реостат R_1 и нуль-индикатор НИ. Нуль-индикатором служит обычно гальванометр с нулем посередине шкалы. В качестве источника образцовой ЭДС (меры ЭДС) используется нормальный элемент — изготавливаемый по специальной технологии гальванический элемент, среднее значение ЭДС которого при температуре 20°C известно с точностью до пятого знака и равно $E_n = 1,0186$ В. Образцовый резистор представляет собой катушку сопротивления специальной конструкции с точно известным и стабильным сопротивлением.

Процесс измерения напряжения состоит из двух операций: установления рабочего тока и уравнивания измеряемого напряжения. Для установления рабочего тока переключатель Π ставят в положение 1 и, регулируя сопротивление R_1 , добиваются отсутствия тока в гальванометре. Это будет иметь

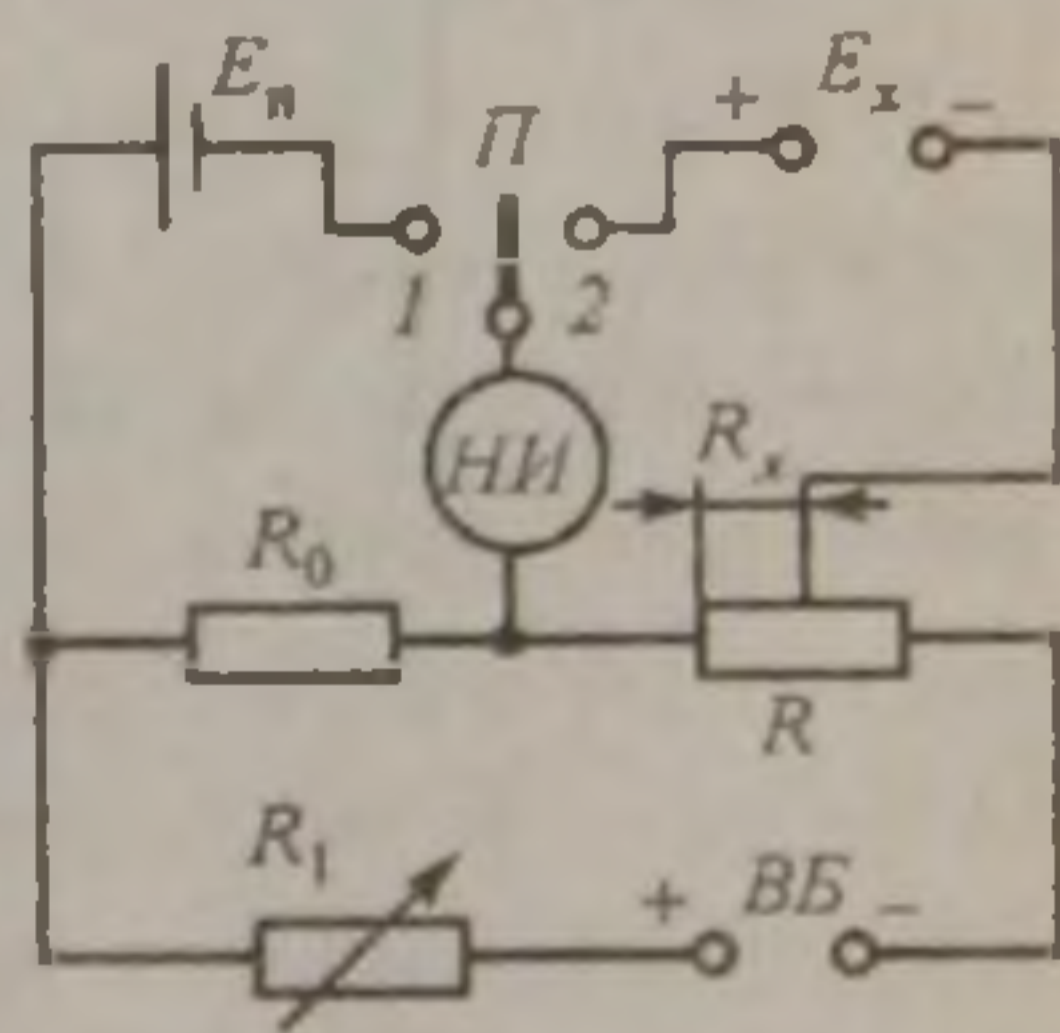


Рис. 3.13. Схема компенсатора постоянного тока

место в том случае, когда падение напряжения на резисторе R_0 станет равным ЭДС нормального элемента:

$$IR_0 = E_n.$$

При этом рабочий ток в цепи R_1, R_0, R

$$I = \frac{E_{вБ}}{R_1 + R_0 + R}.$$

После установки рабочего тока переключатель Π устанавливается в положение 2 и, не изменяя рабочего тока, устанавливают такое значение сопротивления $R = R_x$, при котором измеряемое напряжение E_x будет уравновешено падением напряжения IR_x и ток в цепи гальванометра снова будет отсутствовать. Отсюда

$$E_n / R_0 = E_x / R_x$$

и

$$E_x = (R_x / R_0) E_n. \quad (3.16)$$

Из (3.16) следует, что при постоянстве значений E_n и R_0 шкала сопротивления R может быть проградуирована непосредственно в единицах напряжения постоянного тока.

Так как в момент равновесия ток в цепи индикатора отсутствует, то можно считать, что входное сопротивление $R_{вх}$ компенсатора (со стороны измеряемого напряжения) равно бесконечности, т.е. $R_{вх} = \infty$. Отсюда следует одно из основных достоинств компенсатора — отсутствие потребления мощности от объекта измерения, т.е. возможность измерения ЭДС.

Погрешность компенсатора постоянного тока определяется погрешностями резисторов R, R_0 , ЭДС нормального элемента, а также чувствительностью индикатора. Современные потенциометры постоянного тока выпускают классов точности от 0,0005 до 0,2. Верхний предел измерения до 1...2,5 В. При достаточной чувствительности индикатора нижний предел измерения может составлять единицы нановольт.

В современных конструкциях компенсаторов вместо нормального элемента часто используются стабилизированные источники напряжения с более высоким значением стабилизированного напряжения, что позволяет расширить верхний предел измерения компенсатора до нескольких десятков вольт. Для измерения более высоких значений напряжения могут быть использованы схемы с делителем напряжения. При этом, однако, утрачивается основное достоинство компенсационного метода — отсутствие потребления мощности от объекта измерения.

Промышленностью выпускаются компенсаторы с ручным и автоматическим уравновешиванием.

Компенсационные методы используются также для измерения на переменном токе.

3.5. ЭЛЕКТРОННЫЕ АНАЛОГОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

При измерении напряжения методом непосредственной оценки вольтметр подключается параллельно тому участку цепи, на котором измеряется напряжение. Для уменьшения методической погрешности измерения собственное потребление вольтметра должно быть мало, а его входное сопротивление велико. Поэтому в схемах электроники при измерении в маломощных цепях применение электромеханических приборов ограничено. Предпочтительнее является использование электронных вольтметров.

Электронные вольтметры представляют собой сочетание электронного преобразователя и магнитоэлектрического или цифрового измерительного прибора.

В отличие от вольтметров электромеханической группы электронные вольтметры постоянного и переменного токов имеют высокие входное сопротивление и чувствительность и малое потребление тока от измерительной цепи. Электронные аналоговые и цифровые вольтметры позволяют производить измерения в широком диапазоне напряжений и частот.

По роду тока электронные вольтметры делятся на вольтметры постоянного напряжения, переменного напряжения, универсальные (постоянного и переменного напряжения в одном приборе) и импульсные. Кроме того, выпускаются вольтметры с частотно-избирательными свойствами — селективные.

Электронные аналоговые вольтметры постоянного тока выполняются по схеме, представленной на рис. 3.14, а. Измеряемое напряжение U подается на входное устройство BxY , представляющее собой многопределный высокоомный делитель напряжения на резисторах. С делителя напряжение поступает на усилитель постоянного тока $УПТ$ и далее — на стрелочный прибор V . Делитель и усилитель постоянного тока ослабляют или усиливают напря-

жение до значений, необходимых для нормальной работы прибора. Одновременно усилитель обеспечивает согласование высокого сопротивления входной цепи вольтметра с низким сопротивлением рамки прибора магнитоэлектрической системы. Высокое входное сопротивление электронного

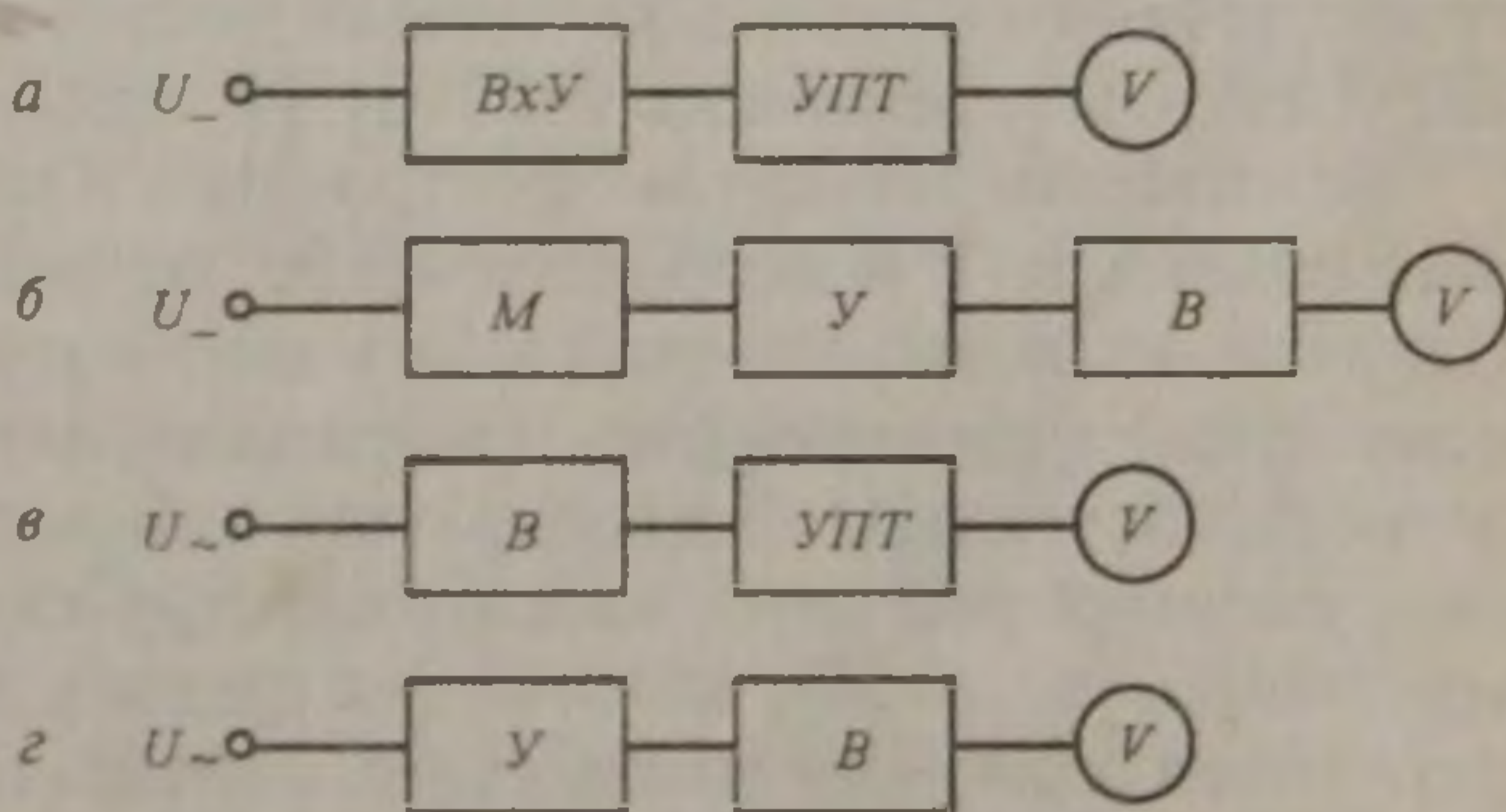


Рис. 3.14. Электронные вольтметры

вольтметра (несколько десятков мегаом) позволяет производить измерение напряжения в высокоомных цепях без заметного потребления мощности от объекта измерения.

Чтобы обеспечить необходимую точность вольтметра к усилителям постоянного тока, применяемым в электронных вольтметрах, предъявляются жесткие требования в отношении линейности амплитудной характеристики, постоянства коэффициента усиления, температурного и временного дрейфа нуля. При построении электронных вольтметров для измерения малых напряжений эти требования не всегда могут быть удовлетворены. Поэтому электронные вольтметры постоянного тока для измерения малых напряжений выполняются по схеме рис. 3.14, б.

В таких вольтметрах постоянное измеряемое напряжение вначале преобразуется модулятором M в переменное, а далее усиление измеряемого сигнала осуществляется усилителем переменного тока $У$, обладающим лучшими метрологическими характеристиками по сравнению с усилителями постоянного тока. Выпрямленное выпрямителем (детектором) B , напряжение подается на стрелочный прибор V . Это позволяет получить электронные микровольтметры с нижним пределом измерения порядка 10^{-8} В.

Электронные вольтметры переменного тока выполняют по двум структурным схемам (рис. 3.14, в, г). В первой из этих схем измеряемое переменное напряжение сначала преобразуется в постоянное детектором B , а затем усиливается усилителем постоянного тока. Во второй схеме усиление производится на переменном токе и лишь затем, предварительно усиленный сигнал, выпрямляется детектором. Эти схемы дополняют друг друга. Каждая из них обладает своими преимуществами и недостатками. Вольтметры, построенные по первой схеме, позволяют измерять напряжение переменного тока в широком частотном диапазоне (10 Гц ... 1000 МГц), но не дают возможности измерять напряжения меньше нескольких десятых долей вольта, так как детектор выпрямляет только достаточно большие напряжения. Вторая схема позволяет строить более чувствительные вольтметры, нижний предел измерения которых составляет всего лишь единицы микровольт. Однако такие приборы имеют меньший частотный диапазон, поскольку частотный диапазон усилителя переменного тока трудно сделать достаточно широким.

Важнейшим элементом электронного вольтметра, в значительной мере определяющим его метрологические характеристики, является детектор. Напряжение на выходе детектора может быть пропорционально амплитудному, средневыпрямленному или среднему квадратическому значению измеряемого напряжения. Характер этой зависимости определяет, на какое из этих значений реагирует магнитоэлектрический стрелочный прибор. Соответственно, различают вольтметры средних, амплитудных и средних квадратических значений. Необходимо, однако, помнить, что шкалу электронного вольтметра обычно градуируют в средних квадратических значениях напряжения синусоидальной формы и это следует учитывать при измерении

и при анализе погрешностей, обусловленных отклонением формы реального измеряемого сигнала от синусоиды.

Простейшими вольтметрами средних значений являются выпрямительные вольтметры, рассмотренные выше на основе пассивных (без применения усилительных схемных элементов) преобразователей средневыпрямленных значений. Преобразователи выполняются на полупроводниковых диодах, работающих на линейном участке вольт-амперной характеристики.

Повышение чувствительности, расширение пределов измерения и улучшение линейности функции преобразования в электронных вольтметрах достигается применением активных преобразователей средневыпрямленных значений.

Вольтметры средних квадратических значений строятся по структурной схеме, приведенной на рис. 3.14, в, г. Детекторы среднего квадратического значения используют квадратичный участок вольт-амперной характеристики диода или диодной цепочки, в результате чего постоянная составляющая напряжения на выходе детектора оказывается пропорциональной квадрату среднего квадратического значения измеряемого напряжения, независимо от формы этого напряжения. В некоторых вольтметрах в качестве детектора среднего квадратического значения применяются термоэлектрические преобразователи.

Принцип действия амплитудного детектора (рис. 3.15, а) основан на заряде конденсатора C через диод D до амплитудного значения измеряемого напряжения и медленном его разряде через нагрузочный резистор R . Из-за различия времени заряда и разряда на конденсаторе появляется постоянная составляющая напряжения. Чем больше отношение постоянной времени разряда конденсатора к постоянной времени его заряда, тем больше напряжение на конденсаторе приближается к амплитудному значению. При синусоидальной форме сигнала $u(t)$ среднее значение напряжения на диоде равно среднему значению напряжения на конденсаторе, но с противоположным знаком. Постоянная составляющая напряжения на конденсаторе C и напряжения на диоде несет информацию об амплитудном значении преобразуемого напряжения. В зависимости от того, какое из этих напряжений принимается за выходное, различают две разновидности амплитудных детекторов. Если выходным служит напряжение на конденсаторе, то получаем амплитудный детектор с открытым входом (рис.

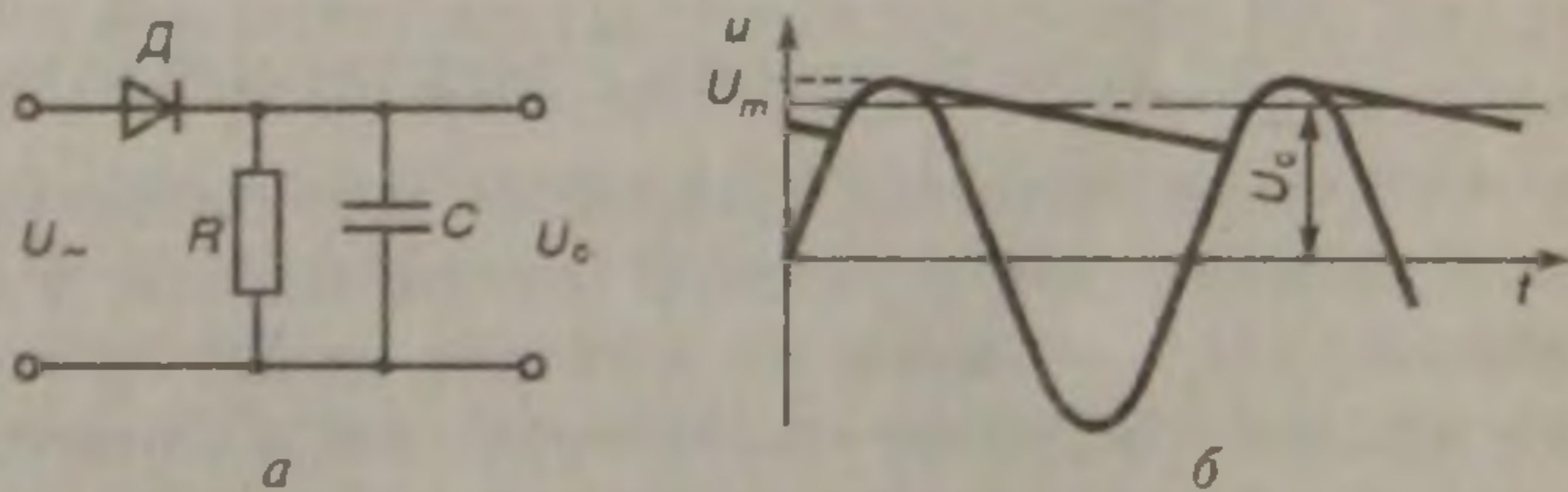


Рис. 3.15. Амплитудный детектор с открытым входом

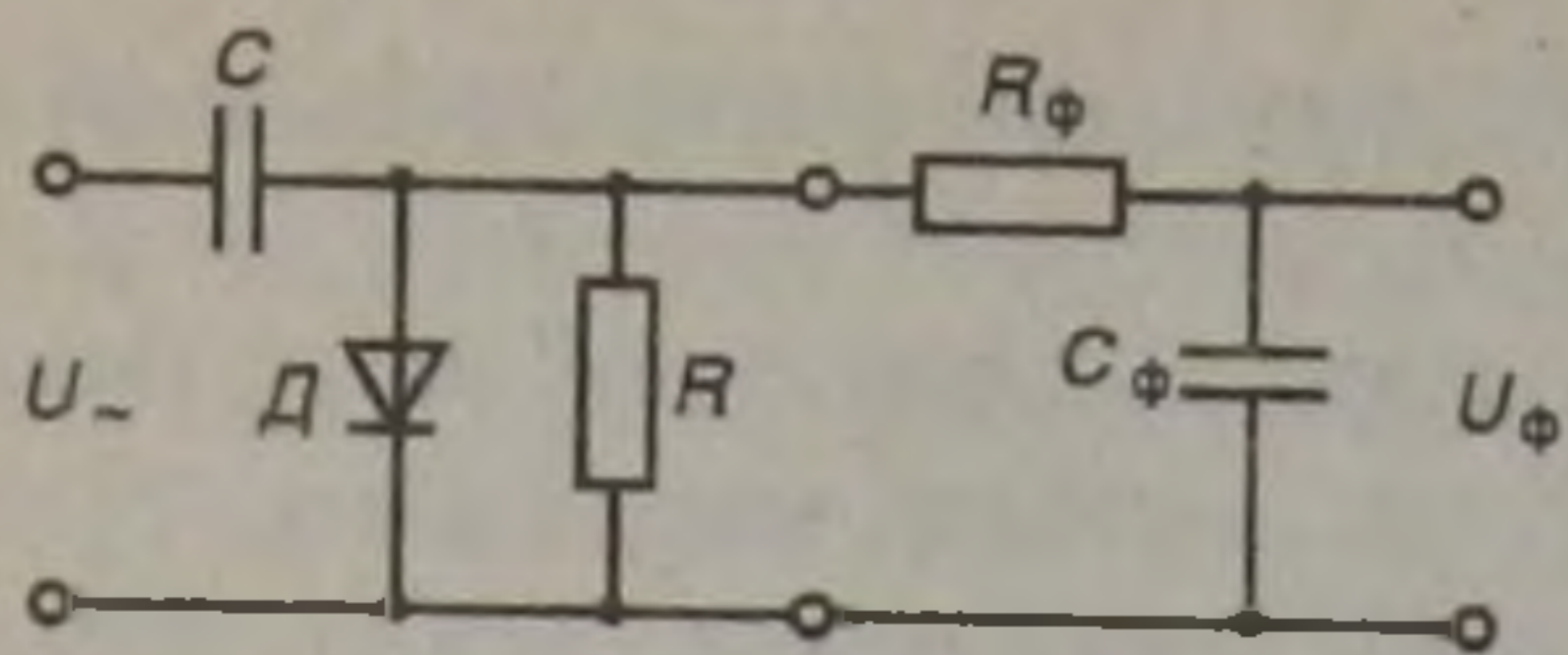


Рис. 3.16. Схема амплитудного детектора с закрытым входом

закрытым входом (рис. 3.16). При измерении пульсирующего напряжения конденсатор C будет заряжаться до пикового напряжения U_{\max} .

Амплитудные детекторы с закрытым и открытым входами применяются в универсальных и высокочастотных вольтметрах при измерении в широком диапазоне частот.

Погрешность измерения вольтметра с амплитудным детектором зависит от частоты. Эта погрешность тем больше, чем меньше частота измеряемого напряжения. В промежутках между входными импульсами конденсатор разряжается, поэтому среднее значение напряжения U_C меньше амплитуды U_m . При повышении частоты интервалы между импульсами меньше и конденсатор разряжается незначительно, поэтому U_C выше, чем при низкой частоте. При достаточно низких частотах U_C может значительно отличаться от амплитуды U_m . Относительная погрешность преобразования при этом оценивается по формуле

$$\delta = \frac{U_m - U_C}{U_m} = \frac{T}{2RC},$$

где T — период измеряемого напряжения.

Одним из существенных недостатков вольтметров с амплитудным детектором является зависимость показаний прибора от формы сигнала. Обычно шкала амплитудных вольтметров градуируется в средних квадратических значениях синусоидального напряжения, тогда как отклонение стрелки прибора пропорционально амплитуде напряжения. Поэтому показания, отсчитанные по шкале стрелочного прибора, справедливы только при измерении синусоидальных напряжений.

При произвольной форме сигнала, если значение K_ϕ для этого сигнала неизвестно, измерение среднего квадратического значения напряжения оказывается невозможным.

На электронные вольтметры установлены классы точности от 0,1 до 25. Обычные классы точности 2,5; 4,0.

3.6. ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

Принцип работы цифровых измерительных приборов основан на дискретном представлении непрерывных величин. Непрерывная величина $x(t)$ — величина, которая может иметь в заданном диапазоне D бесконечно большое число значений в интервале времени T при бесконечно большом числе моментов времени (рис. 3.17, а). Величина может быть непрерывной либо по значению, либо по времени. Величину, не-

прерывную по значению и прерывную по времени, называют дискретизированной (рис. 3.17, б). Значения дискретизированной величины отличны от нуля только в определенные моменты времени. Величину, непрерывную по времени и прерывную по значению, называют квантованной (рис. 3.17, в). Квантованная величина в диапазоне D может принимать только конечное число значений. Непрерывная величина может быть дискретизированной и квантованной одновременно (рис. 3.17, г).

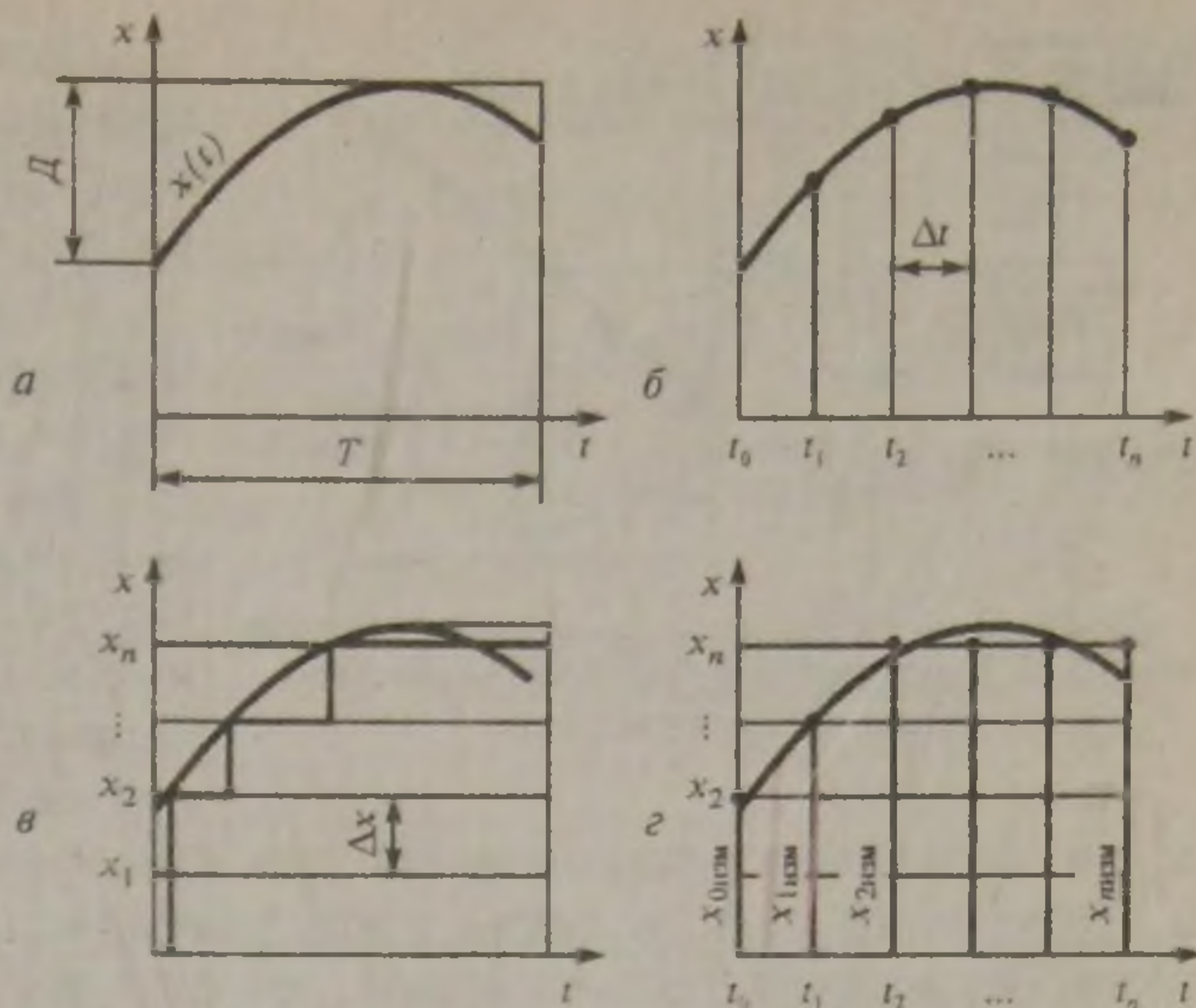


Рис. 3.17. Дискретизация и квантование непрерывной величины

Процесс преобразования непрерывной во времени величины в дискретизированную путем сохранения ее мгновенных значений в моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ (моменты дискретизации) называют *дискретизацией*. Интервал Δt между ближайшими моментами дискретизации называют *шагом дискретизации*.

Процесс преобразования непрерывной по значению величины в квантованную путем замены ее значений ближайшими фиксированными значениями x_1, x_2, \dots, x_n называется *квантованием*. Разность Δx между двумя детерминированными значениями называют *шагом квантования*. При измерении отсчет значения величины $x(t)$ производится в моменты дискретизации с точностью до ближайшего квантованного значения. Поэтому в общем случае полученное в результате квантования значение $x_{изм}$ отличается от действительного значения измеряемой величины. Понятно, что погрешность от замены действительного значения квантованным может быть снижена за счет уменьшения шага квантования.

Процесс измерения в цифровом вольтметре включает в себя дискретизацию, квантование и кодирование — получение по определенной системе правил числового значения квантованной величины в виде комбинации цифр (дискретных сигналов). Так, например, кодирование квантованных значений сигналов $x_{0изм}, x_{1изм}, \dots, x_{nизм}$ (рис. 3.17, г) может быть осуществлено путем выработки в приборе в моменты дискретизации $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ пакетов импульсов, с числом импульсов, равным количеству интервалов квантования.

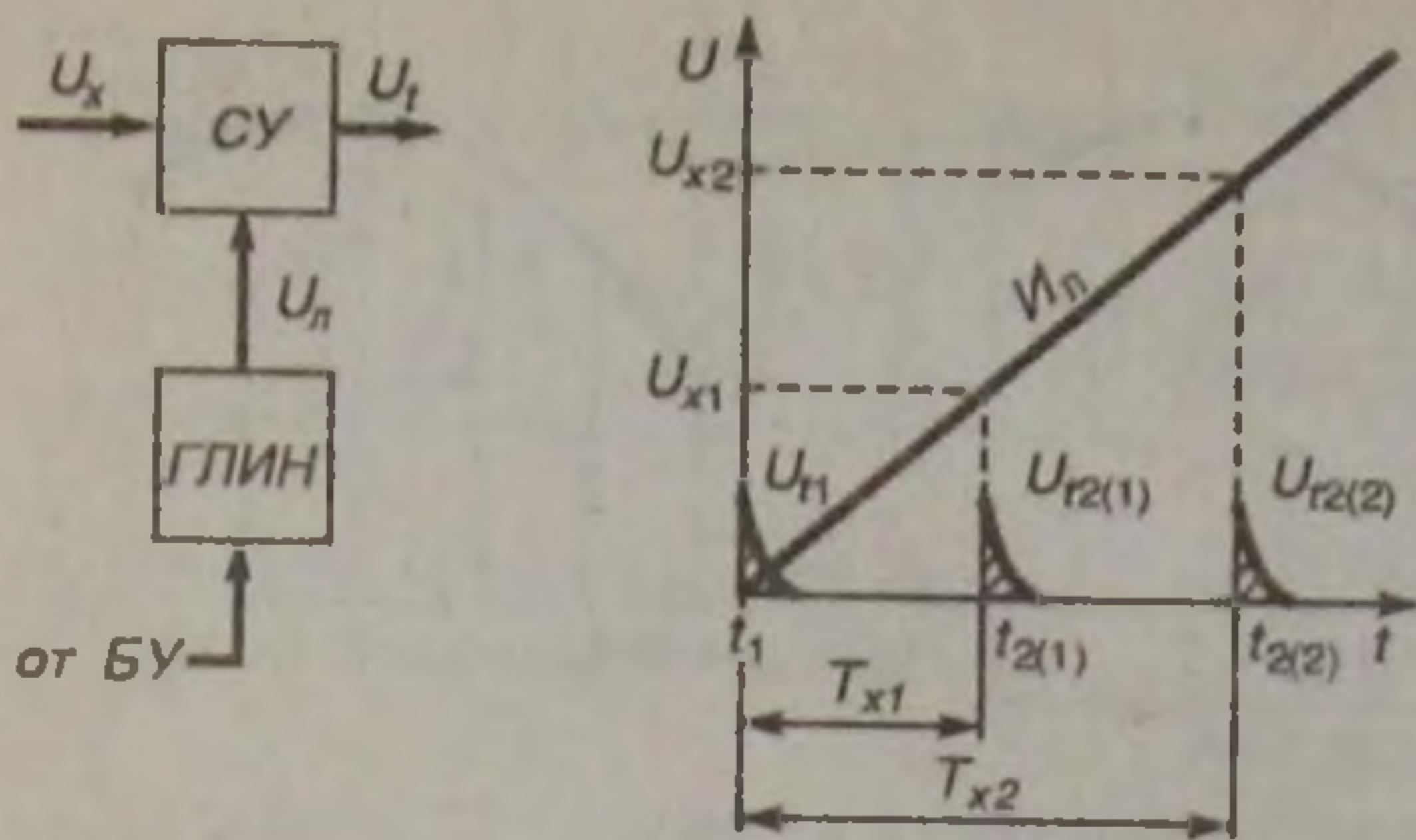


Рис. 3.18. Принцип преобразования напряжения в интервал времени

Процесс аналого-цифрового преобразования составляет сущность любого цифрового прибора, в том числе и вольтметра.

По виду измеряемой величины цифровые вольтметры подразделяются на вольтметры постоянного тока, переменного тока (средневыпрямленного или среднего квадратического значения), импульсные вольтметры — для измерения параметров видео- и радиоимпульсных сигналов и универсаль-

ные вольтметры, предназначенные для измерения напряжения постоянного и переменного тока, а также некоторых других электрических и неэлектрических величин (сопротивления, температуры и др.).

Схемные решения цифровых вольтметров определяются примененным методом аналого-цифрового преобразования. Получили распространение вольтметры с время-импульсным, частотно-импульсным преобразованием, а также с поразрядным уравниванием. В качестве примера рассмотрим принципы построения время-импульсных вольтметров.

Время-импульсный цифровой вольтметр. В основе работы время-импульсного вольтметра лежит преобразование измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, длительность которого измеряется путем заполнения этого интервала импульсами со стабильной частотой следования (счетными импульсами). Преобразование осуществляется посредством сравнения измеряемого напряжения постоянного тока с линейно-изменяющимся напряжением (рис. 3.18), следующим образом. Измеряемое напряжение U_x подается на один из входов сравнивающего устройства СУ. При этом в момент времени t_1 импульсом U_{r1} от блока управления БУ запускается генератор линейно-изменяющегося напряжения ГЛИН. В момент равенства напряжений от ГЛИН $U_л$ и U_x вырабатывается импульс U_{r2} . Интервал времени $T_x = t_2 - t_1$ оказывается пропорциональным значению измеряемого напряжения.

Упрощенная структурная схема время-импульсного цифрового вольтметра постоянного тока приведена на рис. 3.19. Наряду с блоками СУ, ГЛИН в схему входят блок управления БУ, блок формирования БФ, временной селектор ВС и генератор счетных импульсов ГСИ. На БФ с БУ поступает импульс U_{r1} . Это приводит к тому, что временной селектор начинает пропускать на выход счетные импульсы, следующие с частотой f_0 . Одновременно запускается ГЛИН. Линейно-изменяющееся напряжение $U_л$ подается на устройство сравнения, которое в момент, когда U_x

становится равным U_n вырабатывает импульс U_{i2} . Импульс U_{i2} приводит к закрытию временного селектора и прекращению прохождения через него счетных импульсов. Временные диаграммы приведены на рис. 3.20. Число импульсов N_x , заполняющих временной интервал T_x с точностью до одного импульса, описывается формулой

$$N_x = T_x f_0.$$

Но $T_x = U_x / K$, где K — известный коэффициент, зависящий от скорости нарастания линейно-изменяющегося напряжения. Таким образом,

$$N_x = U_x f_0 / K,$$

откуда

$$U_x = N_x K / f_0.$$

В вольтметре отношение K / f_0 выбирается равным 10^{-m} , где $m = 1, 2, 3, \dots$, поэтому прибор непосредственно показывает значение измеряемого напряжения (число m определяет положение запятой в цифровом отсчете). Указанный цикл работы вольтметра периодически повторяется. Возврат генератора линейно изменяющегося напряжения в исходное состояние и подготовка схемы к очередному измерению осуществляется импульсами от БУ после истечения времени t_2 .

По такому же принципу строятся цифровые вольтметры переменного тока. В этих вольтметрах напряжение переменного тока предварительно выпрямляется и далее подается на СУ. Основным недостатком метода время-импульсного преобразования является его невысокая помехоустойчивость. Шумовая помеха, наложенная на измеряемое напряжение U_x , изменяет его и, следовательно, изменяет момент появления импульса U_{i2} , определяющего длительность времени счета. Тем не менее, время-импульсное преобразование постоянных напряжений позволяет создавать сравнительно простые и достаточно

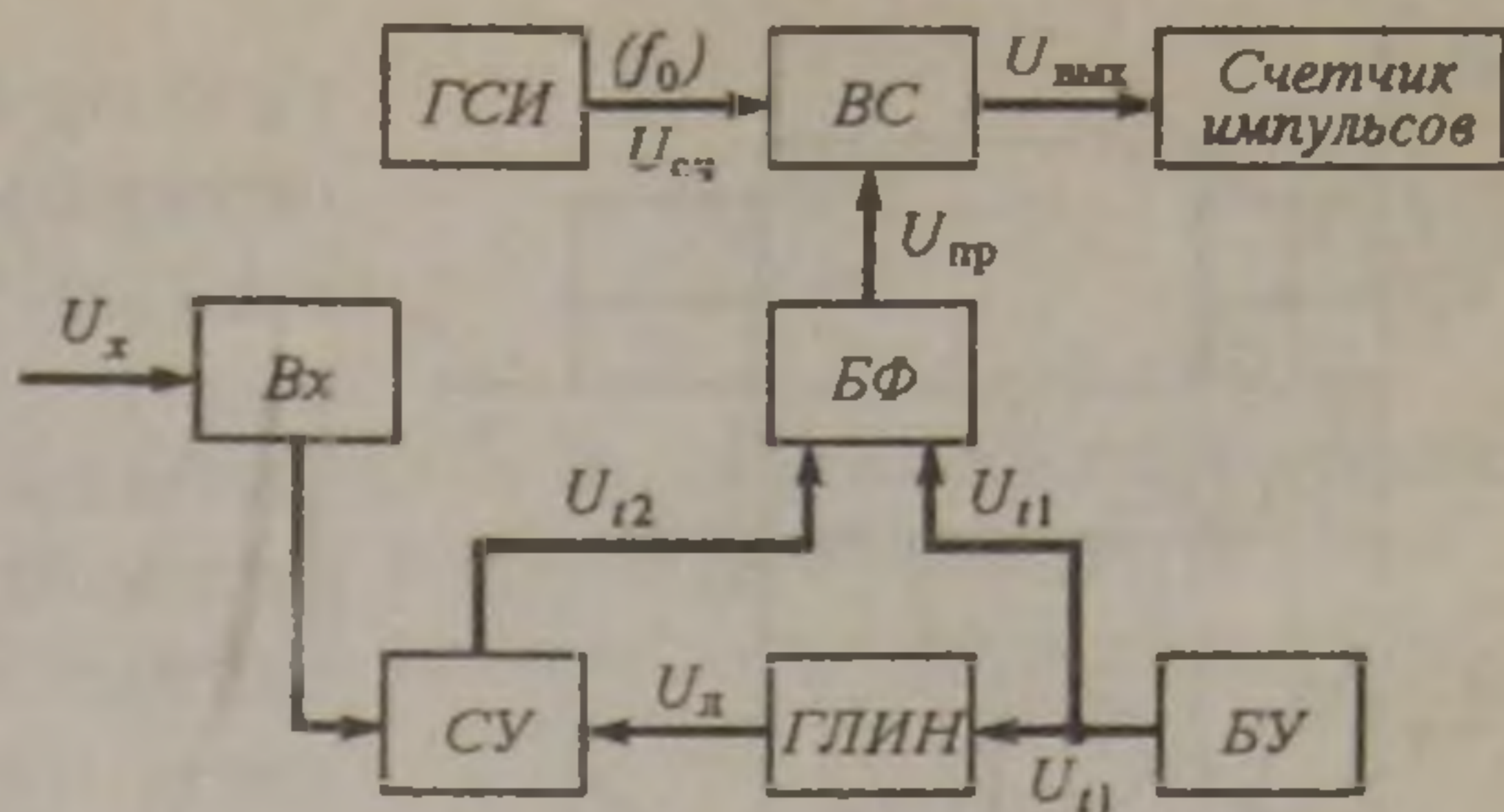


Рис. 3.19. Структурная схема время-импульсного цифрового вольтметра

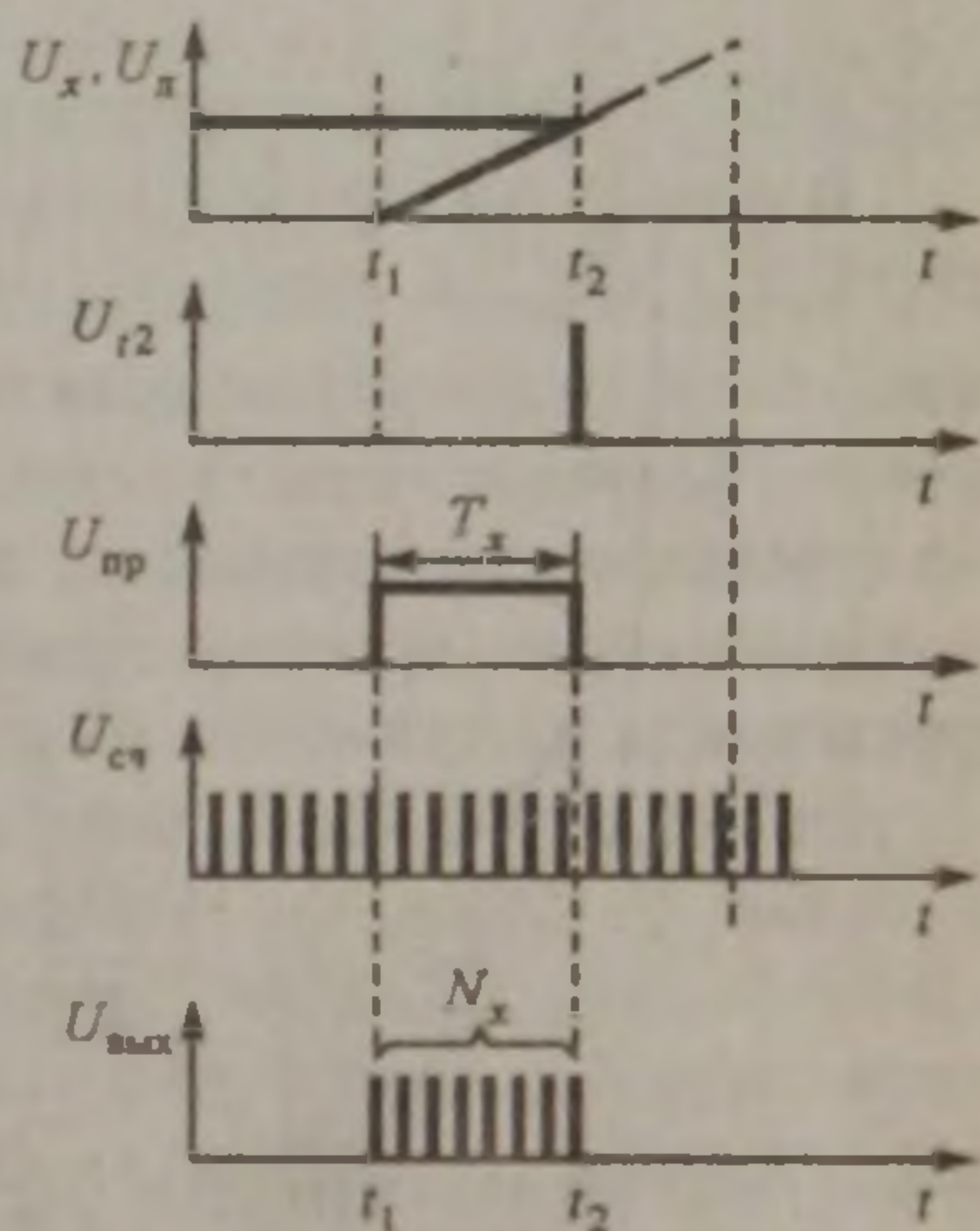


Рис. 3.20. Временные диаграммы время-импульсного вольтметра

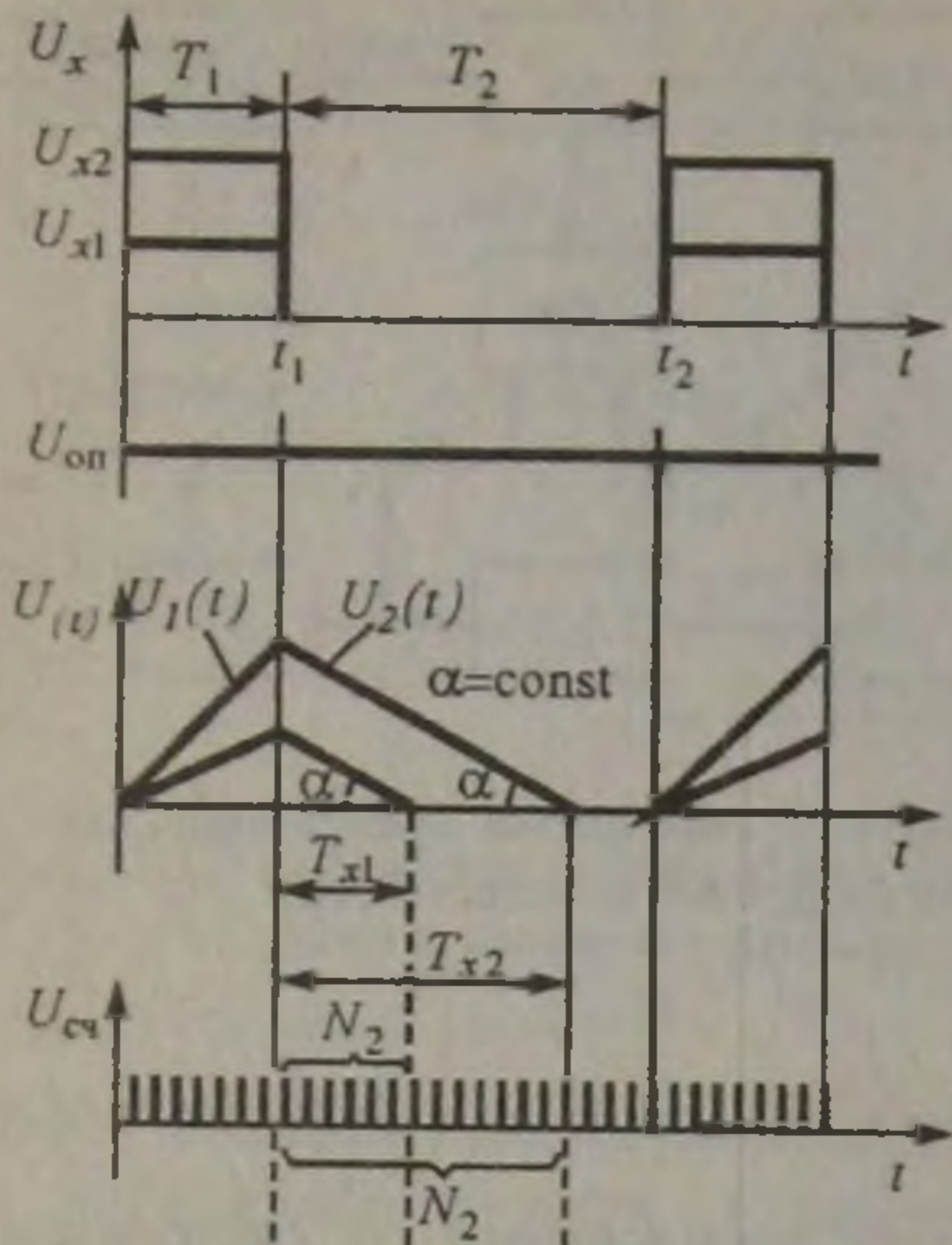


Рис. 3.21. Принцип действия цифрового вольтметра с двойным интегрированием

точные вольтметры. Погрешности метода определяются нелинейностью и нестабильностью линейно-изменяющегося напряжения и погрешностью, обусловленной нестабильностью порога срабатывания сравнивающего устройства. Цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием имеют погрешность, не превышающую 0,1... 0,05 %.

Цифровой вольтметр с двойным интегрированием. Принцип его работы подобен принципу время-импульсного преобразования, с тем отличием, что здесь образуются два временных интервала в течение цикла измерения, длительность же цикла измерения устанавливается кратной периоду помехи. Это приводит к существенному повышению помехоустойчивости вольт-

метров. В цифровом вольтметре с двойным интегрированием преобразование U_x в пропорциональный ему интервал времени T_x осуществляется путем интегрирования сначала измеряемого U_x , а затем опорного $U_{оп}$ напряжений (рис. 3.21). В первом такте в течение времени T_1 производится интегрирование входного напряжения U_x , в результате чего напряжение на выходе интегратора

$$U_1(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_x dt = \frac{U_x}{RC} t,$$

где RC — постоянная времени интегратора; t — время.

В конце интервала интегрирования напряжение на выходе интегратора $U_x T_1 / RC$. В момент t_1 напряжение U_x отключается от интегратора и на вход интегратора подается опорное напряжение $U_{оп}$, имеющее противоположную по отношению к U_x полярность. Интегрирование опорного напряжения продолжается до тех пор, пока выходное напряжение интегратора снова не станет равным нулю. Поэтому в течение времени второго такта напряжение на выходе интегратора равно

$$U_2(t) = \frac{U_x}{RC} T_1 - \frac{1}{RC} \int_0^{T_x} U_{оп} dt = \frac{U_x}{RC} T_1 - \frac{U_{оп}}{RC} t,$$

а в конце этого периода, через интервал времени T_x ,

$$U_2(t) = \frac{U_x}{RC} T_1 - \frac{U_{оп}}{RC} T_x = 0,$$

откуда

$$T_x = \frac{T_1}{U_{оп}} U_x. \quad (3.17)$$

Преобразование временного интервала T_x в эквивалентное число импульсов N_x осуществляется так же, как и в предыдущем методе — путем заполнения интервала T_x импульсами f_0 генератора счетных импульсов и подсчета их числа счетчиком

$$N_x = \frac{T_1 f_0}{U_{оп}} U_x.$$

Из (3.17) видно, что временной интервал T_x , пропорциональный U_x , не зависит от постоянной времени интегратора RC , а зависит только от T_1 и $U_{оп}$, которые могут поддерживаться постоянными с высокой точностью.

Практически, все современные цифровые вольтметры строятся на основе метода двойного интегрирования. Вольтметры этого типа обеспечивают погрешность измерения 0,02...0,005 %.

Глава 4

ОСЦИЛЛОГРАФЫ

4.1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Электронно-лучевой осциллограф — универсальный измерительный прибор, применяемый для визуального наблюдения на экране электрических сигналов и измерения их параметров. Основная функция осциллографа заключается в воспроизведении в графическом виде электрических колебаний (осциллограмм) в прямоугольной системе координат. Чаще всего с помощью осциллографа наблюдают зависимость напряжения от времени, причем, как правило, осью времени является ось абсцисс, а по оси ординат откладывается напряжение сигнала. С помощью осциллографа можно наблюдать периодические непрерывные и импульсные сигналы, непериодические и случайные сигналы, одиночные импульсы и оценивать их параметры.

По осциллограммам, получаемым на экране осциллографа, могут быть измерены частота и фазовый сдвиг, параметры модулированных сигналов, временные интервалы. На базе осциллографа созданы приборы для исследования переходных, частотных и амплитудных характеристик различных электро- и радиотехнических устройств. Широкое распространение электронно-лучевых осциллографов обусловлено возможностью их использования в полосе частот от нуля до десятков гигагерц, при напряжениях сигнала от десятков микровольт до сотен вольт.

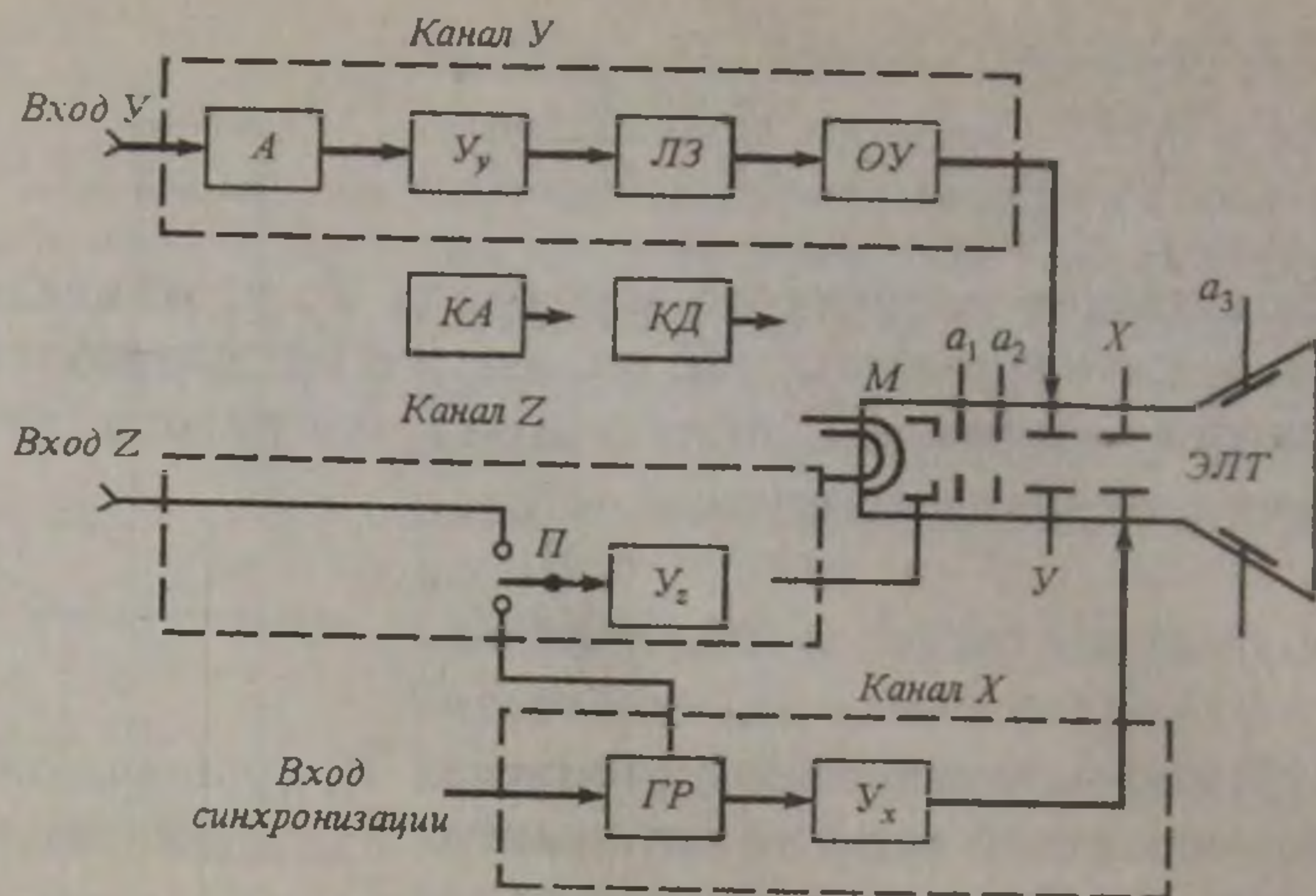


Рис. 4.1. Структурная схема электронно-лучевого осциллографа

В зависимости от назначения электронно-лучевые осциллографы подразделяются на универсальные, скоростные, запоминающие, стробоскопические и специальные. Отличаясь техническими характеристиками, схемными и конструктивными решениями эти осциллографы используют общий принцип получения осциллограмм. Наибольшее распространение получили универсальные осциллографы. Они позволяют исследовать электрические сигналы в полосе частот до 350 МГц и измерять параметры таких сигналов с приемлемой для практики погрешностью (5...10%). Упрощенная структурная схема универсального электронно-лучевого осциллографа приведена на рис. 4.1.

Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка ЭЛТ, представляющая собой стеклянную вакуумированную колбу, внутри которой размещена электронная пушка, отклоняющие пластины и люминесцентный экран. Полагая, что читатель знаком с устройством электронной пушки из курса физики, отметим лишь, что назначением ее является формирование узкого электронного пучка, при попадании которого на люминесцентный экран на экране возникает светящееся пятно. Электронный пучок (луч) проходит между двумя парами взаимно перпендикулярных металлических отклоняющих пластин: вертикально отклоняющих Y и горизонтально отклоняющих X . Если к отклоняющим пластинам приложить электрическое напряжение, то между ними будет существовать электрическое поле, которое будет вызывать отклонение луча в ту или иную сторону. Если электрическое напряжение приложено к горизонтально отклоняющим пластинам, то световое пятно на экране трубки будет отклоняться вдоль оси X ; если же напряжение приложено к вертикально отклоняющим пластинам, то пятно будет перемещаться по оси Y . Если теперь сфокусировать электронный луч так, чтобы световое пятно расположилось в точке 0 (рис. 4.2), а затем к пластинам Y приложить исследуемое напряжение, например, синусоидальное, а к пластинам

Х пилообразное напряжение, то под совместным воздействием двух напряжений луч трубки вычертит на экране осциллограмму, отражающую зависимость $u(t) = U_m \sin \omega t$. После спада пилообразного напряжения до нуля световое пятно возвратится в точку 0. Пилообразное напряжение формируется так, чтобы время обратного хода развертки $t_{обр}$ было во много раз меньше времени прямого хода $t_{пр}$, поэтому обратный ход луча на экране трубки не просматривается. Для того чтобы изображение исследуемого напряжения отражало истинный характер сигнала, необходимо выполнение двух условий. Первое — чтобы отклонения по оси X и оси Y были прямо пропорциональны напряжению, прилагаемому к соответствующей паре пластин и второе — чтобы длительность прямого хода развертки $t_{пр}$ была в точности равна периоду исследуемого напряжения T , либо выполнялось условие $t_{пр} = mT$, где m — целое число. В первом случае на экране осциллографа будет наблюдаться один период, а во втором m периодов исследуемого напряжения.

Вернемся к рассмотрению структурной схемы осциллографа (см. рис. 4.1). Кроме электронно-лучевой трубки она содержит канал вертикального отклонения луча (канал Y), канал горизонтального отклонения луча (канал X), канал управления яркостью луча (канал Z), калибраторы амплитуды KA и длительности $KД$.

По каналу Y поступает исследуемый сигнал $u(t)$, вызывающий вертикальное отклонение луча в электронно-лучевой трубке. В этот канал входят: аттенюатор A для ослабления больших сигналов; предварительный усилитель $У$, для усиления слабых сигналов; линия задержки $ЛЗ$ для небольшой временной задержки сигнала; оконечный усилитель $ОУ$, на выходе которого вырабатывается симметричный противофазный сигнал, поступающий на вертикально отклоняющие пластины трубки.

По каналу X на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки поступает напряжение развертки. Основным узлом этого канала является генератор развертки $ГР$, вырабатывающий напряжение, изменяющееся по закону $U_x(t) = Vt$ (пилообразное напряжение). Напряжение развертки может быть синхронизировано с исследуемым напряжением, либо с напряжением сети, либо с сигналом от внешнего источника. В канале X имеется усилитель горизонтального отклонения $У_x$, вход которого подключен к выходу генератора развертки. Выходное (двухфазное) напряжение с выхода усилителя поступает на пластины горизонтального отклонения.

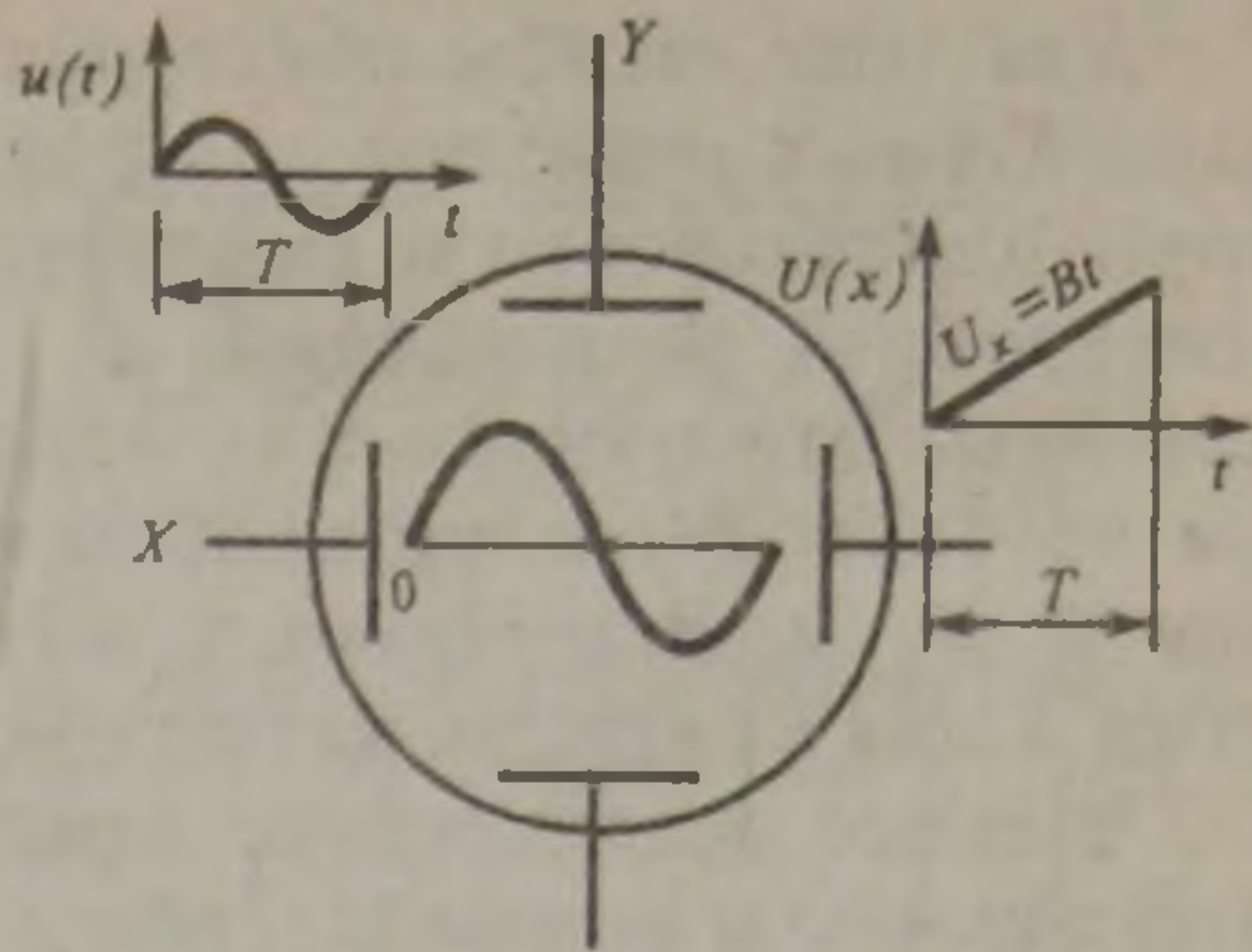


Рис. 4.2. Получение изображения на экране электронно-лучевой трубки

Для того, чтобы обеспечить возможность измерения параметров исследуемых сигналов в структуре осциллографа имеются калибраторы длительности и амплитуды. Калибраторы представляют собой генераторы напряжений с точными значениями амплитуды и частоты. Эти напряжения подаются с выхода калибратора амплитуды на вход Y для установки и контроля масштабов отклонений по оси Y (В/см, В/деление), с выхода калибратора длительности — на вход X для контроля масштаба по оси X (мс/см, с/см).

В схеме осциллографа предусмотрены также устройства и органы регулировки и настройки, обеспечивающие удобство работы с прибором (смещение луча по осям X и Y , регулировка яркости, фокусировка светового пятна и др.).

Электронные осциллографы характеризуются рядом технических и метрологических характеристик. К наиболее важным относятся:

- чувствительность по каналам Y и X (мм/В);
- полоса пропускания, т.е. диапазон частот, в пределах которого коэффициент усиления канала Y уменьшается не более чем на 3 дБ по отношению к некоторой опорной частоте;
- диапазон изменения длительности развертки;
- входное сопротивление и входная емкость канала Y ;
- параметры, характеризующие погрешности измерения напряжения и интервалов времени.

Синусоидальная развертка в осциллографе. Для решения ряда измерительных задач вместо пилообразного напряжения развертки (линейной развертки) используется синусоидальная развертка. Для получения синусоидальной развертки на пластины X подают напряжение, изменяющееся по гармоническому закону $u_x(t) = U_m \sin \omega t$. При этом генератор линейной развертки $ГР$ (см. рис. 4.1) осциллографа отключается. Положительный полупериод напряжения синусоидальной развертки вызывает перемещение луча от центра экрана до его правой границы и обратно; отрицательный полупериод — от центра экрана до его левой границы и обратно к центру. Скорость перемещения луча изменяется по синусоидальному закону, хотя линия развертки представляет собой горизонтальную линию. Мгновенное значение отклонения луча по горизонтали

$$x(t) = a \sin \omega t,$$

где a — амплитуда отклонения луча на экране трубки по горизонтали в единицах длины.

Если на пластины Y подать напряжение вида $u_y(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, т.е. той же частоты и формы, что и на пластины X , но имеющее начальный фазовый сдвиг φ , то мгновенное значение отклонения луча по вертикали

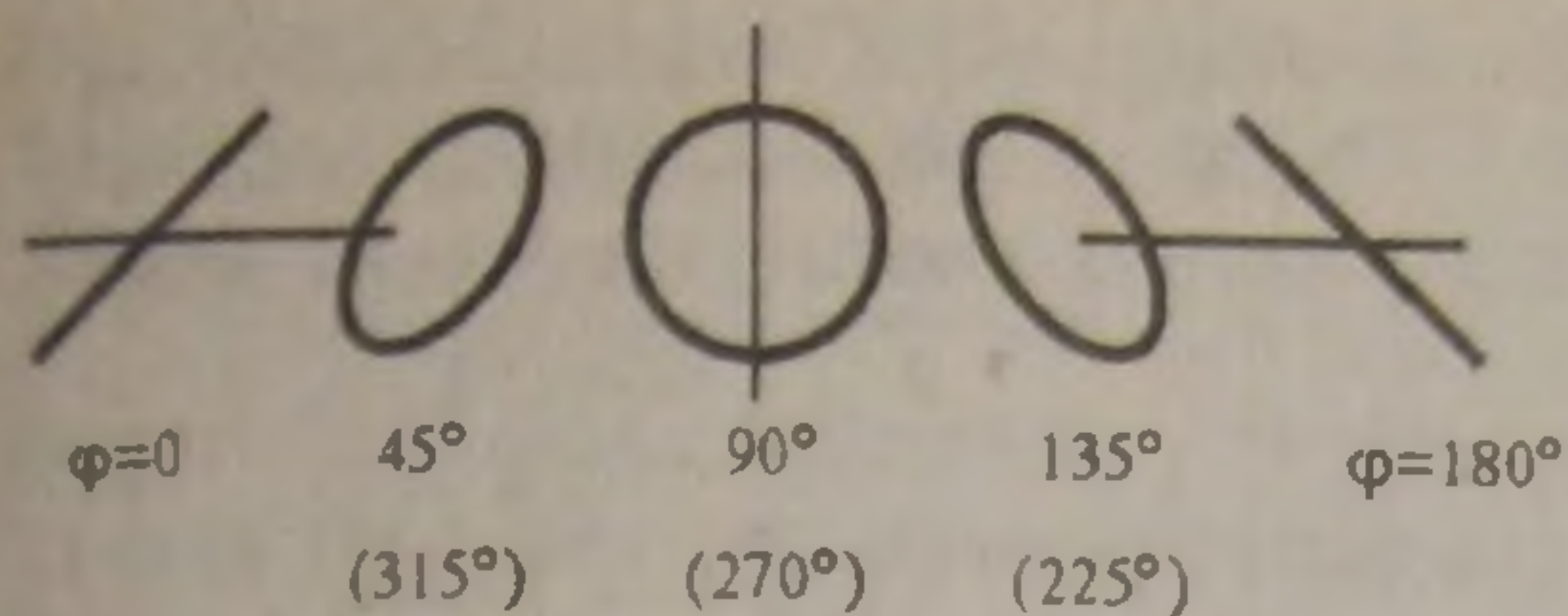


Рис. 4.3. Фигуры Лиссажу при равенстве частот напряжений

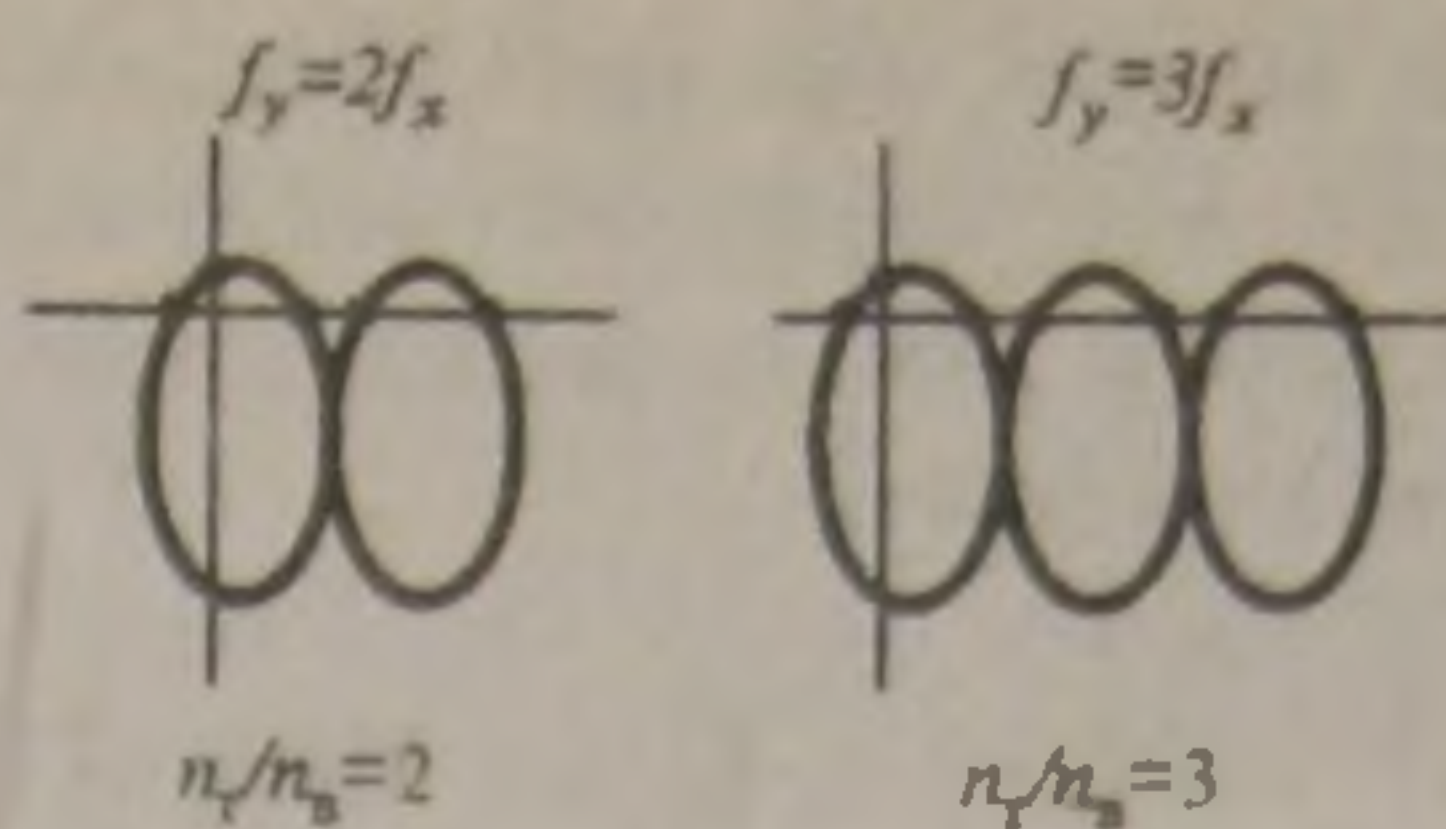


Рис. 4.4. Фигуры Лиссажу при кратности частот

$$y(t) = b \sin(\omega t + \varphi),$$

где b — амплитуда отклонения луча на экране трубки по вертикали в единицах длины.

При одновременном воздействии напряжений $u_x(t)$ и $u_y(t)$ на луч, на экране осциллографа возникает, так называемая, фигура Лиссажу, форма которой описывается выражением

$$y = \frac{b}{a} \left(x \cos \varphi + \sqrt{a^2 - x^2} \sin \varphi \right). \quad (4.1)$$

Формула (4.1) является уравнением эллипса, т.е. фигура Лиссажу на экране трубки представляет собой в общем случае эллипс, форма которого зависит от амплитуд отклонений электронного луча по вертикали и горизонтали и фазового сдвига между напряжениями $u_x(t)$ и $u_y(t)$. Лишь в частных случаях эллипс вырождается в более простую фигуру. Так, например, при равенстве амплитуд a и b , если $\varphi = 0$, то $y = x$; если $\varphi = 180^\circ$, то $y = -x$, т.е. в этих случаях эллипс вырождается в прямые, наклоненные под углом 45° или 135° к горизонтальной оси, соответственно (рис. 4.3). Если $\varphi = 90^\circ$ или 270° , то

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Это уравнение эллипса с полуосями, совпадающими с осями координат. Если $a = b = r$, осциллограмма принимает вид окружности с радиусом r . При неравных частотах и разных начальных фазах фигура Лиссажу принимает более сложный вид (рис. 4.4), причем фигура будет неподвижной только при определенном соотношении частот развертки и исследуемого сигнала — если они относятся как целые числа. Это отношение, называемое кратностью частот, может быть определено следующим образом: проведя через фигуру горизонтальную и вертикальную прямые линии (линии не должны проходить через узлы фигуры), подсчитывают число пересечений линии с осциллограммой и вычисляют кратность, как n_x / n_y , где n_x — число пересечений осциллограммы горизонтальной линией, n_y — число пересечений вертикальной линией.

Как видим, фигуры Лиссажу несут определенную информацию о параметрах исследуемого напряжения — частоте, фазе и др. и, следовательно, могут быть использованы для решения соответствующих измерительных задач.

4.2. ЦИФРОВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Дальнейшим развитием техники осциллографирования явилось создание цифровых осциллографов, в которых аналоговый исследуемый сигнал сразу же во входном блоке преобразуется в цифровую форму и запоминается в дискретной памяти. Зафиксированный в памяти сигнал может быть использован для отображения его на экране электронно-лучевой трубки, на плоском матричном экране или любым другим способом.

Наряду с повышением точности осциллографирования, цифровые осциллографы позволяют полностью автоматизировать процесс измерения, осуществлять дистанционное управление режимом работы, производить математическую и логическую обработку информации. Использование матричных экранов снижает габариты и массу цифровых осциллографов и устраняет необходимость применения источников питания высокого напряжения.

В самом простом виде цифровой осциллограф имеет структуру, представленную на рис. 4.5. Здесь входной исследуемый сигнал $x(t)$ усиливается до необходимого значения $x_n(t)$ и поступает на аналого-цифровой преобразователь АЦП. Мгновенные значения нормированного сигнала $x_n(t)$ в моменты времени t_k , задаваемые генератором Γ , преобразуются в цифровые эквиваленты $N(t_k)$ и запоминаются в регистре памяти P_r . Синхронно с моментом взятия цифровых отсчетов $N(t_k)$ импульсы t_k поступают на счетчик $CчМ$, где появляется код, равномерно нарастающий во времени. Коды $N(t_k)$ в отображающем устройстве $OУ$ преобразуются в управляющие сигналы N , вызывающие вертикальное перемещение светящейся точки экрана $OУ$, а коды $M(t_k)$ преобразуются в управляющие сигналы M , вызывающие горизонтальное перемещение светящейся точки экрана $OУ$. При переполнении счетчика $CчМ$, послед-

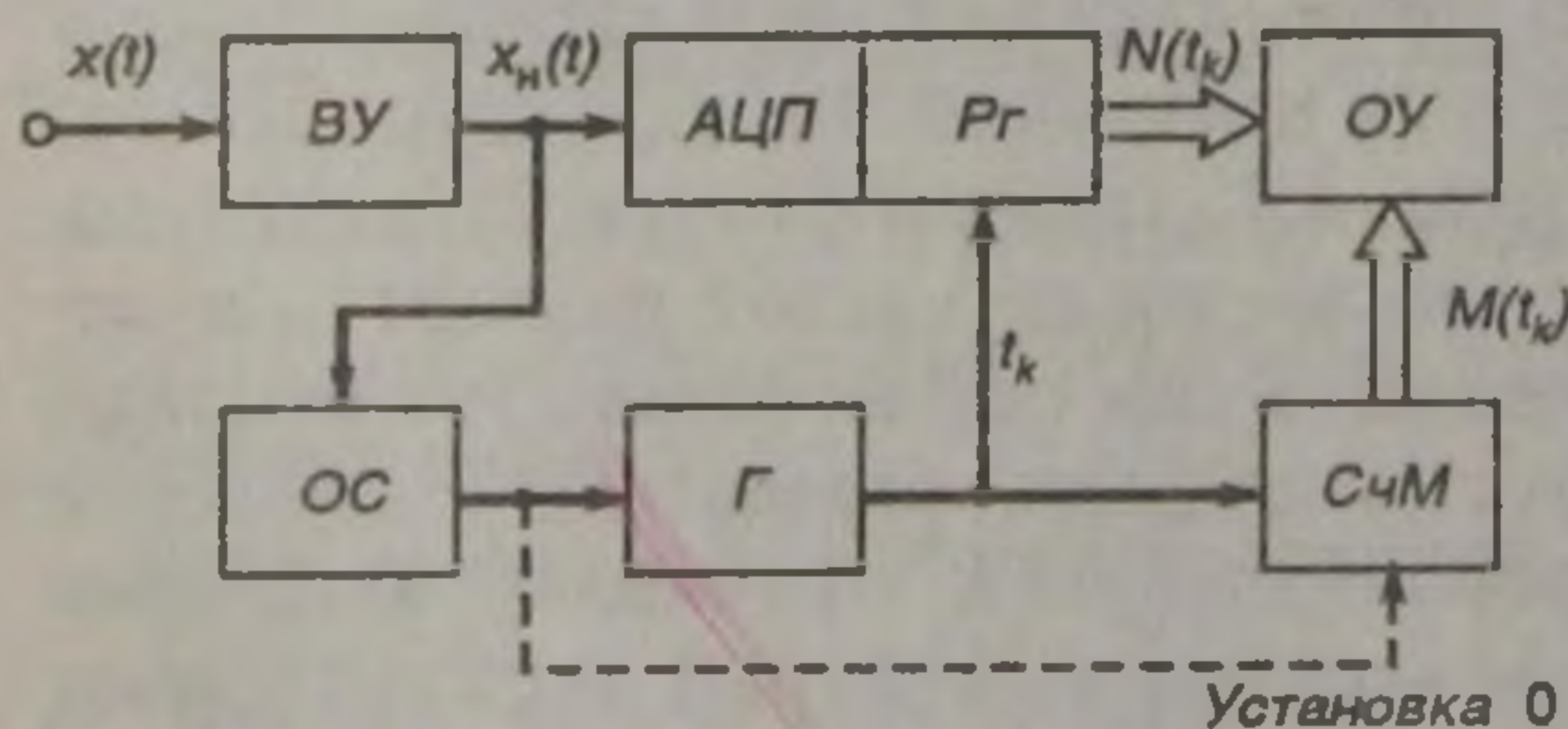


Рис. 4.5. Структурная схема цифрового осциллографа

ний занимает исходное положение, при котором светящаяся точка также возвращается в исходное положение на экране, подготавливая новый цикл получения изображения осциллограммы.

Процесс равномерного набора кода счетчиком $CчМ$ и сброса его в исходное положение при переполнении имитиру-

ет временную развертку осциллографа аналогично линейно-изменяющемуся развертывающему напряжению в электронно-лучевом осциллографе.

При отображении сигнала на электронно-лучевой трубке, коды, соответствующие цифровым отсчетам, преобразуются в цифро-аналоговом преобразователе в напряжение, которое поступает на вертикально отклоняющую систему трубки, а коды, соответствующие временной развертке, через цифро-аналоговый преобразователь подаются в горизонтально отклоняющую систему трубки.

Если отображающее устройство построено на матричной индикаторной панели, то коды вертикального и горизонтального отклонения преобразуются в позиционную форму и выбирают одну из строк и один из столбцов матричной панели, в перекрестии которых возникает светящаяся точка.

В блок управления осциллографом включаются арифметическо-логические устройства, что намного расширяет функциональные возможности цифрового осциллографа. Становится возможным оцифровывать любые значения исследуемого сигнала, получать и отображать его производную, интеграл, спектральную характеристику, корреляционную функцию, распределение плотности вероятности и т.д.

Современная микропроцессорная техника позволяет путем включения ее в цифровой осциллограф решать практически все функциональные задачи, возникающие при исследовании сигналов. А достижения в области технологии и элементной базы позволяют существенно снижать массогабаритные характеристики цифровых осциллографов, вплоть до разработки карманных приборов.

Так, одна из моделей цифровых осциллографов, выпускаемых фирмой «Креатек» имеет размеры $25 \times 10 \times 3,75$ см и массу 900 г. Высококонтрастный жидкостный дисплей размерами 58×58 мм дает четкое изображение исследуемых сигналов. Осциллограф имеет два аналого-цифровых преобразователя, обеспечивающих одновременное наблюдение двух сигналов в полосе от постоянного тока до 10 МГц. При этом возможна их обработка (сложение, вычитание, умножение и деление) встроенным калькулятором. Цифровая обработка сигналов, кроме того, позволяет запомнить до 46 осциллограмм, а также до 9 режимов работы осциллографа.

На экране осциллографа, помимо собственно осциллограмм, отображается состояние органов управления (чувствительность, длительность развертки и т.п.). Предусмотрен вывод информации с осциллографа на печать и другие функциональные возможности.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические цепи представляют собой совокупность соединенных друг с другом элементов — источников электрической энергии и нагрузок в виде резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов. При определенных допущениях эти нагрузки можно рассматривать как линейные пассивные двухполюсники с сосредоточенными постоянными, характеризующиеся некими идеальными параметрами — сопротивлением R , индуктивностью L , емкостью C .

При измерении, однако, не всегда удается определить значение того или иного параметра, соответствующее идеальному, совершенному виду элемента. несовершенство конструкции и характеристик применяемых материалов является причиной появления, так называемых, остаточных (паразитных) параметров элементов. Так, наряду с главным параметром катушки индуктивности — индуктивностью, она обладает собственной емкостью и активным сопротивлением; резистор, обладая активным сопротивлением, имеет также определенную индуктивность и т.п.

С учетом остаточных параметров конденсатор, катушку индуктивности или резистор можно характеризовать некоторым эффективным значением емкости, индуктивности, сопротивления, которые зависят от частоты. Поэтому эффективные параметры компонентов необходимо измерять на рабочих частотах, если их влиянием на результат измерения нельзя пренебречь.

В зависимости от объекта измерений, требуемой точности результата, диапазона рабочих частот и других условий для измерения параметров двухполюсников применяют различные методы и средства измерений. Наиболее распространенными являются следующие методы измерения: вольтметра-амперметра, непосредственной оценки, мостовой, резонансный и дискретного счета.

5.2. МЕТОД ВОЛЬТМЕТРА-АМПЕРМЕТРА

Измерение методом вольтметра-амперметра сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым двухполюсником и последующему расчету его параметров по закону Ома. Метод может быть использован для измерения активного и полного сопротивления, индуктивности и емкости.

Измерение активных сопротивлений производится на постоянном токе, при этом включение резистора R_x в измерительную цепь возможно по схемам, представленным на рис. 5.1, а и 5.1, б. Обе схемы включения приводят к методическим погрешностям ΔR , зависящим от величины со-

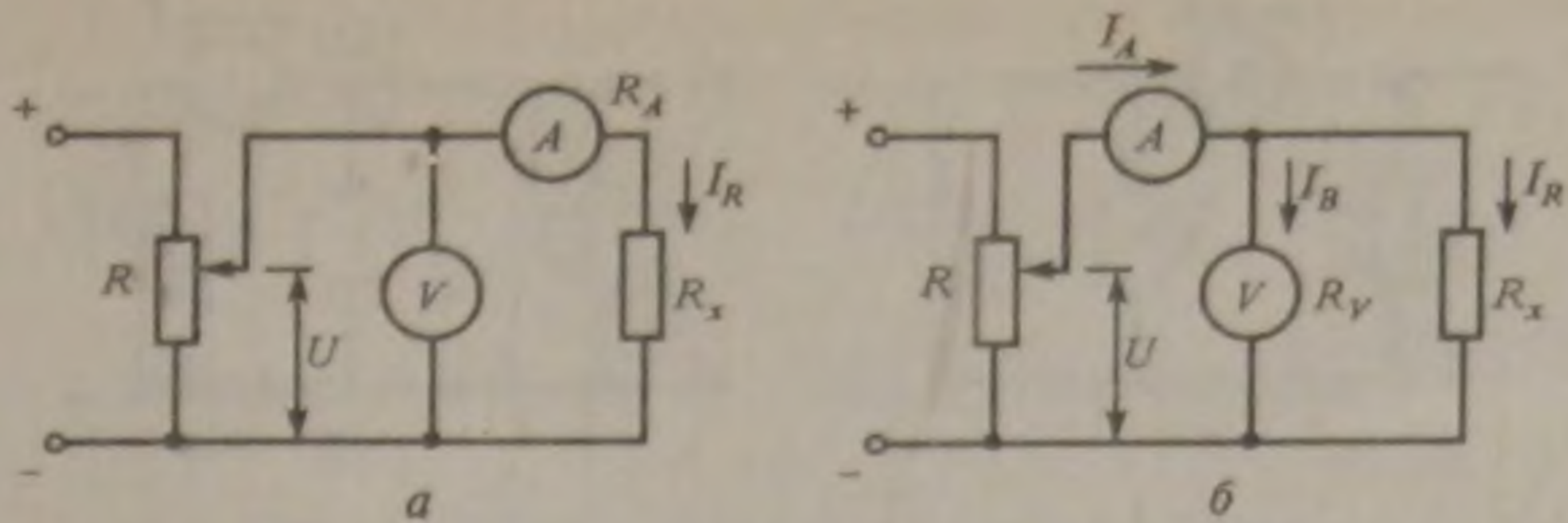


Рис. 5.1. Измерение активных сопротивлений методом вольтметра-амперметра

противлений приборов. Очевидно, что в схеме рис. 5.1, а методическая погрешность тем меньше, чем меньше сопротивление амперметра (при $R_v \rightarrow 0 \Delta R \rightarrow 0$), а в схеме рис. 5.1, б эта погрешность тем меньше, чем больше сопротивление вольтметра (при $R_v \rightarrow \infty \Delta R \rightarrow 0$). Таким образом, схемой, приведенной на рис. 5.1, а, следует пользоваться для измерения больших сопротивлений, а схемой, приведенной на рис. 5.1, б, — для измерения малых сопротивлений.

Измерение полного сопротивления Z_x выполняется на переменном токе частотой f , рис. 5.2. По показаниям вольтметра и амперметра определяют модуль полного сопротивления

$$|Z_x| = U_V / I_A,$$

где U_V, I_A — показания вольтметра и амперметра.

Выполнив анализ методической погрешности, приходим к выводу, что схему, представленную на рис. 5.2, а, целесообразно применять при $Z_x \ll Z_v$, а на рис. 5.2, б — при $Z_x \gg Z_v$.

Измерение емкости методом вольтметра-амперметра может быть выполнено по схемам, представленным на рис. 5.3.

Емкостное сопротивление конденсатора

$$X_C = 1/\omega C_x = U_C / I,$$

откуда

$$C_x = 1/\omega U_C.$$

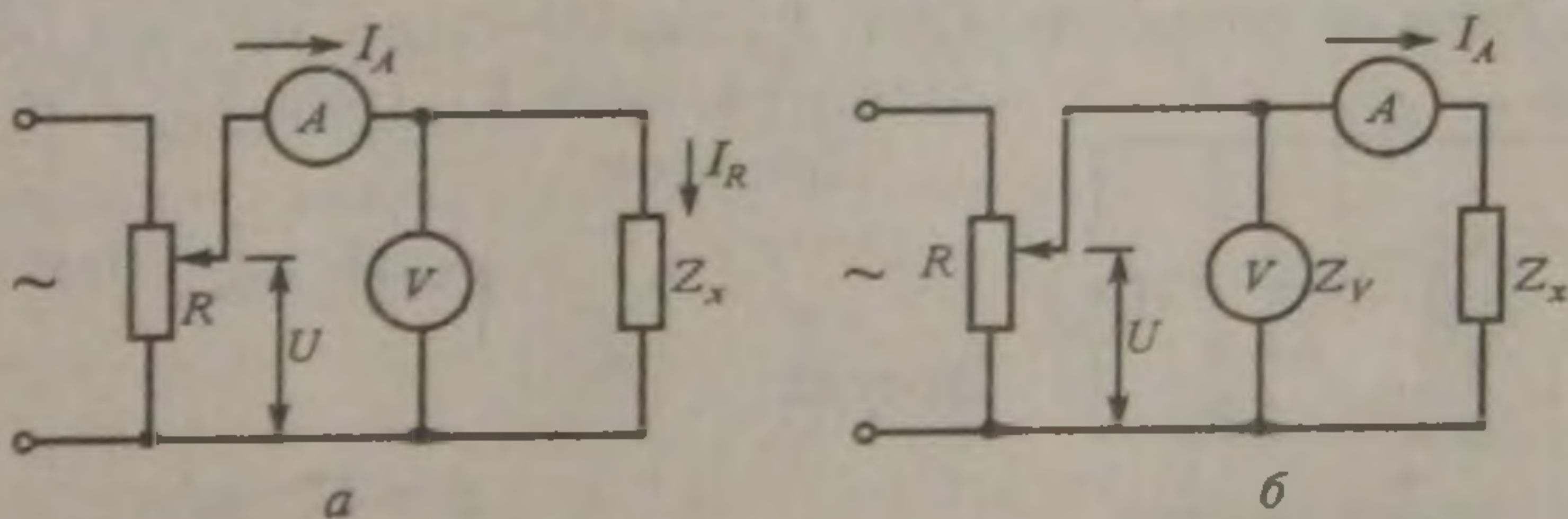


Рис. 5.2. Измерение полного сопротивления двухполюсника

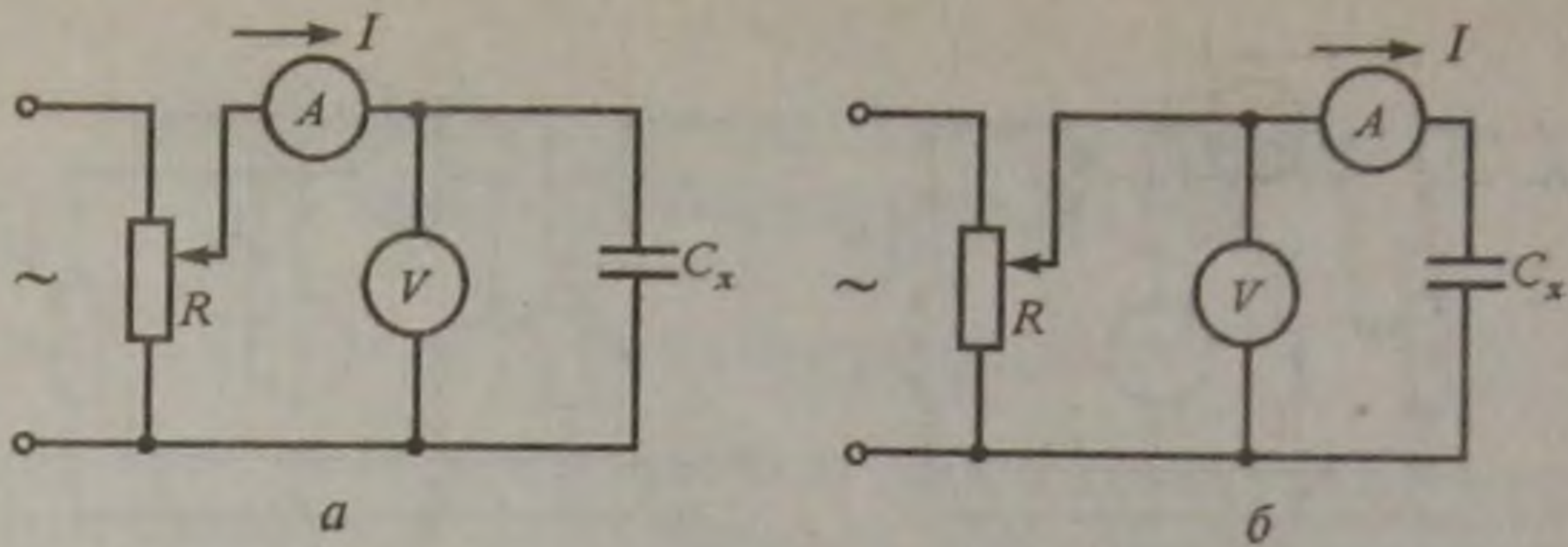


Рис. 5.3. Измерение емкости методом вольтметра-амперметра

Следовательно, при измерении емкости этим методом необходимо знать частоту источника питания. Для измерения больших емкостей рекомендуется схема, приведенная на рис. 5.3, а; а малых емкостей — на рис. 5.3, б.

Для измерения очень малых емкостей применяют вариант метода вольтметра-амперметра (метод двух вольтметров), схема которого приведена на рис. 5.4.

Питающее напряжение U_1 измеряется вольтметром V_1 . Вольтметр V_2 измеряет напряжение на конденсаторе C_0 , емкость которого известна

$$U_2 = I / \omega C_0.$$

Ток I определяется выражением

$$I = U_1 / (1/\omega C_x + 1/\omega C_0),$$

откуда

$$C_x = C_0 U_2 / (U_1 - U_2). \quad (5.1)$$

Для уменьшения погрешности измерения необходимо выполнить условие $C_0 \gg C_x$, тогда можно упростить выражение (5.1)

$$C_x = C_0 U_2 / U_1.$$

Метод двух вольтметров позволяет измерять емкости от долей пикофарад.

Измерение индуктивности катушки методом вольтметра-амперметра возможно, если ее сопротивление R_L значительно меньше реактивного сопротивления X_L , (рис. 5.5, а, б).

При этом

$$I = U_L / \omega L,$$

откуда

$$L = U_L / \omega I.$$

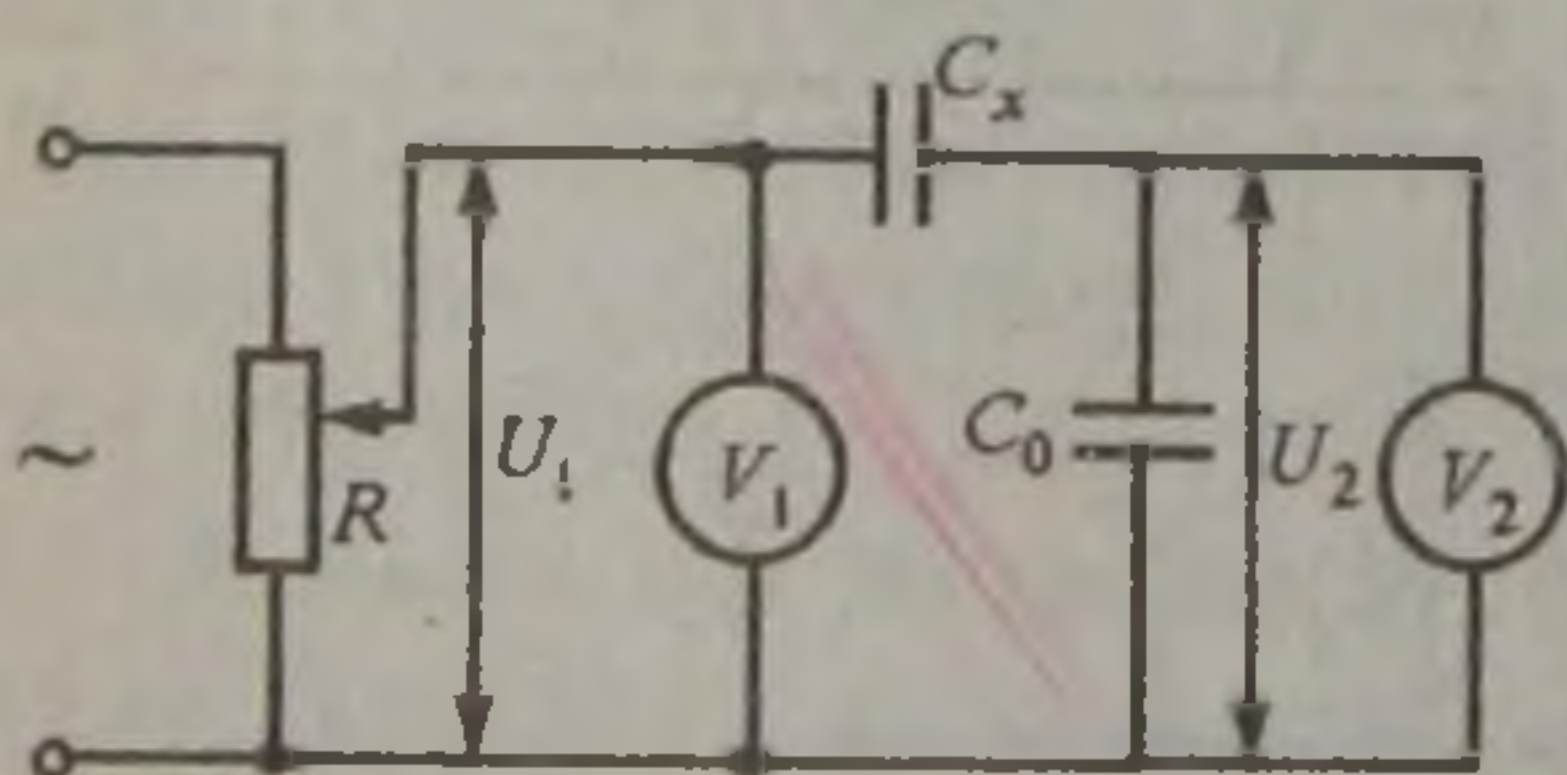


Рис. 5.4. Измерение емкости методом двух вольтметров

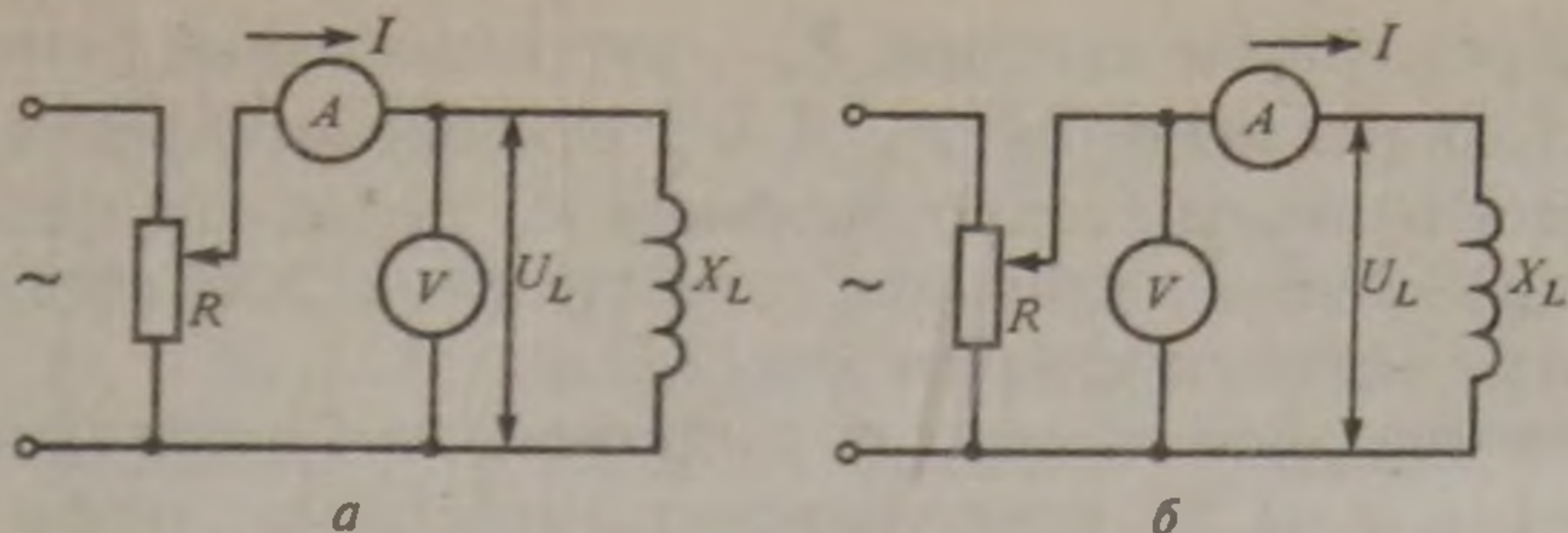


Рис. 5.5. Измерение индуктивности катушки

Если требуется получить более точный результат, то необходимо учесть сопротивление катушки. Так как

$$Z = \frac{U_L}{I} = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 L^2},$$

то

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - R_L^2}.$$

Погрешности измерения параметров элементов цепей методом вольтметра-амперметра на низких частотах составляют 0,5...10% и определяются погрешностью используемых приборов, а также наличием паразитных параметров. Погрешности измерения возрастают с увеличением частоты.

Метод непосредственной оценки. Метод непосредственной оценки реализуется в приборах для измерения сопротивления постоянному току — электромеханических и электронных омметрах. Электромеханические омметры строятся на основе приборов магнитоэлектрической системы и в зависимости от величины измеряемого сопротивления могут быть выполнены по схеме с последовательным (рис. 5.6, а) либо параллельным (рис. 5.6, б) включением измеряемого сопротивления.

Источником питания омметра обычно служит гальванический элемент. Ток, протекающий через магнитоэлектрический прибор в омметре с последовательным включением при разомкнутом ключе Кл, определяется по формуле:

$$I = \frac{U}{R_x + R_A + R_p}, \quad (5.2)$$

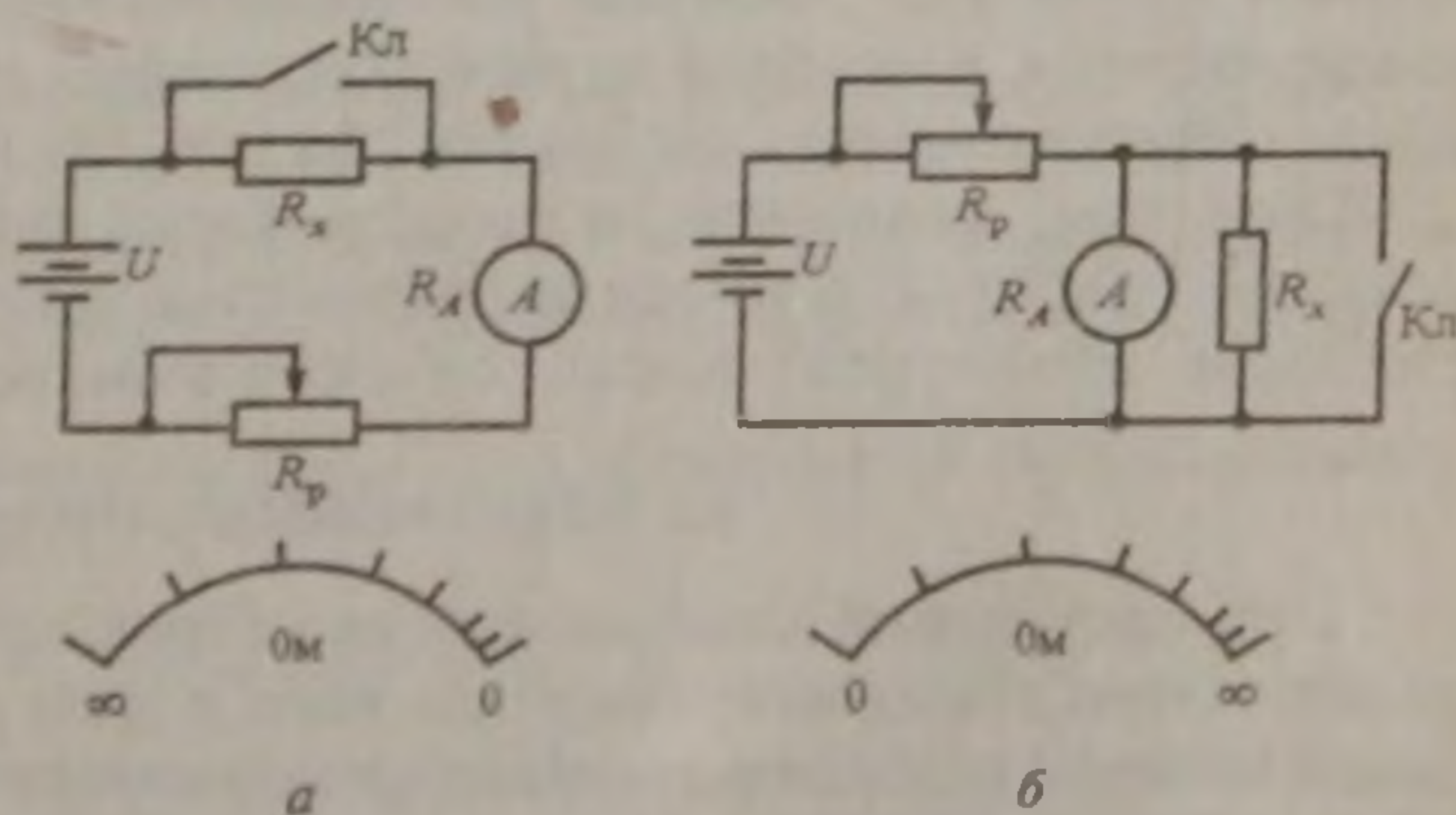


Рис. 5.6. Электромеханический омметр

где R_A — сопротивление прибора; R_p — регулировочный резистор.

При постоянных значениях R_A , R_p и U отклонение стрелки прибора α определяется измеряемым сопротивлением R_x , т.е. шкала прибора может быть проградуирована в единицах сопротивления. Как следует из (5.2), шкала омметра неравномерна (см. рис. 5.6, а).

Перед проведением измерения сопротивления необходимо установить «размах» шкалы, т.е. отрегулировать омметр так, чтобы при $R_x = \infty$ и $R_x = 0$ стрелка прибора устанавливалась бы на начальную и конечную отметки шкалы. При незамкнутых входных зажимах омметра и разомкнутым ключе $Kл$ (что соответствует $R_x = \infty$) стрелка прибора находится в крайнем левом положении на отметке 0 мА, следовательно, эта отметка шкалы будет соответствовать $R_x = \infty$. Далее, замкнув ключ $Kл$, т.е., моделируя $R_x = 0$, наблюдают отклонение стрелки прибора и, в том случае, если стрелка не доходит до конечной отметки шкалы или переходит за нее, регулируют резистором R_p ток через прибор до достижения стрелкой конечной отметки. После этого, разомкнув ключ, можно выполнить измерение сопротивления R_x . Характер шкалы подсказывает, что омметр такого типа предпочтительно использовать для измерения сравнительно больших сопротивлений (до нескольких килоом), так как при малых значениях R_x этот омметр имеет малую чувствительность.

Для измерения небольших сопротивлений применяются омметры, выполненные по схеме с параллельным включением измеряемого сопротивления, уравнение шкалы для которых имеет вид

$$I = U / [R_p + R_A R_x / (R_A + R_x)]. \quad (5.3)$$

Как и в схеме с последовательным включением, здесь отклонение стрелки прибора зависит только от R_x при условии, что остальные члены уравнения (5.3) постоянны. Перед проведением измерения также необходимо установить размах шкалы, моделируя ситуацию $R_x = 0$ и $R_x = \infty$ и регулируя ток I сопротивлением резистора R_p . Для омметра с параллельным включением нулевое положение указателя совпадает с нулевым значением измеряемого сопротивления, а крайнее правое положение стрелки соответствует $R_x = \infty$. Шкала такого омметра изображена на рис. 5.6, б.

Омметры, выполненные по схемам рис. 5.6, а, б, выпускаются как отдельные приборы, а также входят в состав комбинированных приборов (тестеров, авометров). Класс точности омметров не ниже 2,5.

5.3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ОММЕТРЫ

При построении электронных омметров используются два метода измерения: метод стабилизированного тока в цепи делителя и метод преобразования измеряемого сопротивления в пропорциональное ему напряжение.

Схема измерения сопротивления по методу стабилизированного тока приведена на рис. 5.7, а. Делитель напряжения, составленный из из-

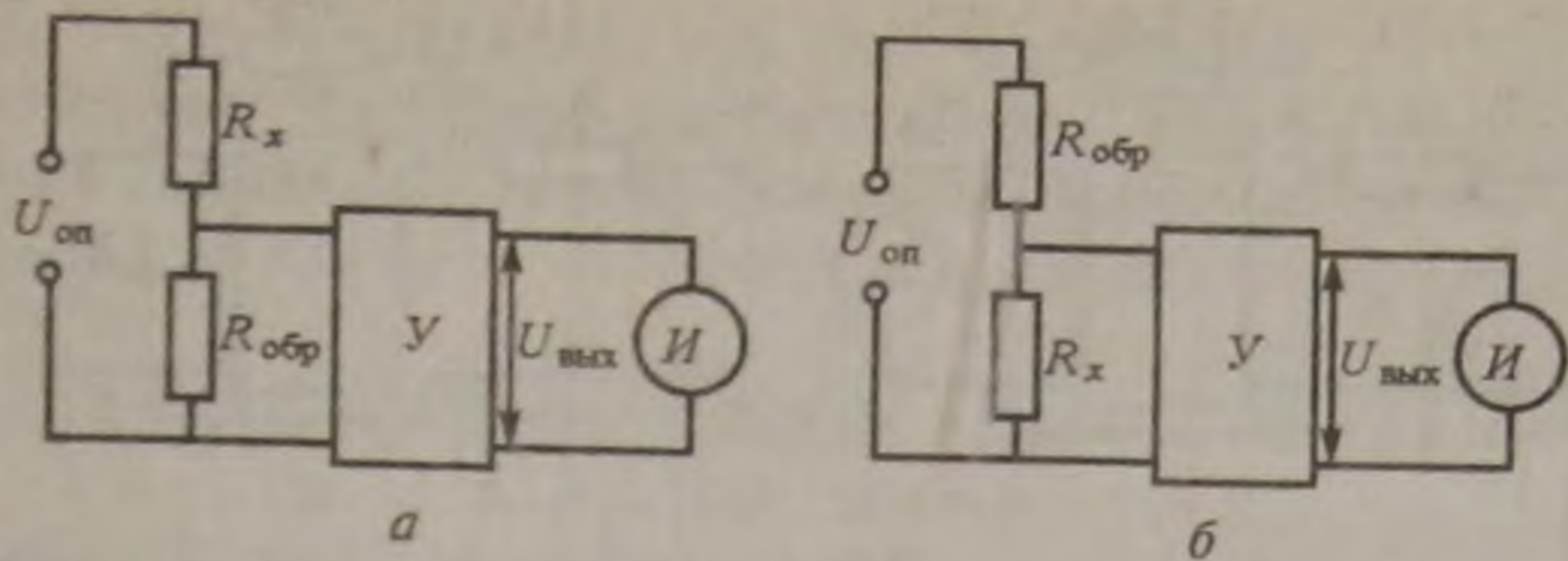


Рис. 5.7. Измерение сопротивления по методу стабилизированного тока

вестного образцового $R_{обр}$ и измеряемого R_x сопротивлений, питается от источника опорного напряжения $U_{оп}$. Падение напряжения на образцовом резисторе усиливается усилителем Y с большим входным сопротивлением. Выходное напряжение усилителя $U_{вых}$ зависит от значения сопротивления R_x . В качестве индикатора обычно применяется микроамперметр магнитоэлектрической системы, шкала которого градуируется в единицах сопротивления. Если усилитель имеет коэффициент усиления K и входное сопротивление $R_{вх} \gg R_{обр}$, то измеряемое сопротивление определяется выражением

$$R_x = [(KU_{оп}/U_{вых}) - 1]R_{обр}.$$

Этот вариант схемы омметра применяется для измерения достаточно больших сопротивлений, когда $R_x > R_{обр}$.

Для измерения малых сопротивлений ($R_x < R_{обр}$) используется схема, представленная на рис. 5.7, б. Измеряемое сопротивление здесь определяется выражением

$$R_x = R_{обр} / (KU_{оп}/U_{вых} - 1).$$

Эта схема реализована в ряде выпускаемых промышленностью миллиомметров, обеспечивающих измерение активных сопротивлений в диапазоне $10^{-4} \dots 10^2$ Ом с погрешностью 1,5...2,0%.

Измерение средних и больших (до 10^{18} Ом) сопротивлений осуществляется с использованием преобразования измеряемого сопротивления в пропорциональное ему напряжение. В основу метода положен принцип работы операционного усилителя $ОУ$ постоянного тока с отрицательной обратной связью (рис. 5.8).

Для схемы, представленной на рис. 5.8, а, измеряемое сопротивление R_x определяется выражением

$$R_x = U_{оп}R_{обр}/U_{вых},$$

где $U_{вых}$ — выходное напряжение усилителя; $R_{обр}$ — образцовый резистор;

При постоянных значениях $U_{оп}$ и $R_{обр}$ напряжение $U_{вых}$ будет зависеть только от R_x и, следовательно, шкала микроамперметра может быть

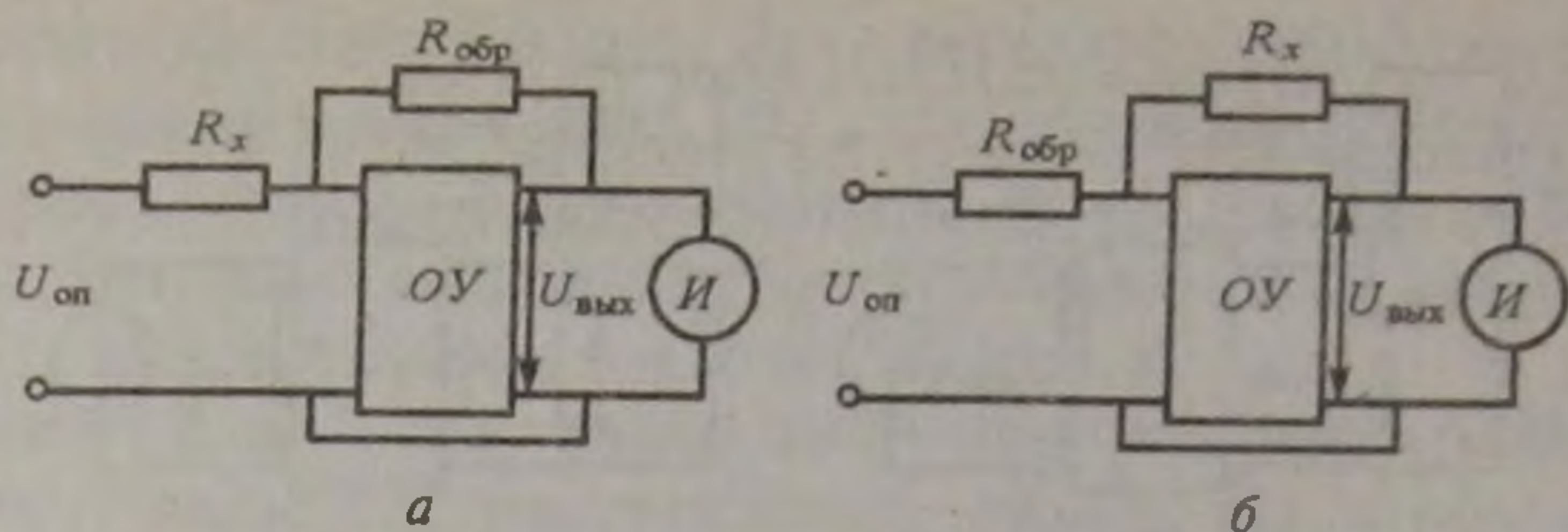


Рис. 5.8. Схемы омметров на основе операционных усилителей

отградуирована в единицах сопротивления. Указанная схема применяется в основном для измерения больших сопротивлений в приборах, называемых тераомметрами.

Поменяв местами R_x и $R_{обр}$, получим схему (рис. 5.8, б), пригодную для измерения малых сопротивлений (от единиц Ом). Измеряемое сопротивление в такой схеме определяется выражением

$$R_x = U_{вых} R_{обр} / U_{оп}.$$

Применение в одном приборе обеих вариантов схем позволяет создать измерители сопротивления с диапазоном измерения от единиц Ом до нескольких десятков мегаом с погрешностью не более 10%.

5.4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОСТЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Важным классом средств измерения, предназначенных для измерения параметров элементов электрических цепей методом сравнения, являются мосты. Сравнение измеряемой величины (сопротивления, емкости, индуктивности) с образцовой мерой при помощи моста в процессе измерения может осуществляться вручную или автоматически, на постоянном или на переменном токе. Мостовые схемы обладают большой точностью, высокой чувствительностью, широким диапазоном измеряемых значений параметров. На основе мостовых методов измерения строятся средства измерения, предназначенные как для измерения какой-либо одной величины, так и универсальные аналоговые и цифровые приборы.

Одинарный мост постоянного тока. Такой мост (рис. 5.9) содержит четыре резистора, соединенных в кольцевой замкнутый контур. Резисторы R_1 , R_2 , R_3 и R_4 этого контура называются плечами моста, а точки соединения соседних плеч — вершинами моста. Цепи, соединяющие противоположные вершины, называют диагоналями. Диагональ ab содержит источник питания и называется диагональю питания. Диагональ cd , в которую включен индикатор Γ , называется измерительной диагональю. В мостах постоянного тока в качестве индикатора обычно используется гальванометр. Мосты постоянного тока предназначены для измерения активного сопротивления.

В общем случае зависимость протекающего через гальванометр тока I_{Γ} от сопротивлений плеч, сопротивления гальванометра R_{Γ} и напряжения питания U имеет вид

$$I_{\Gamma} = U(R_1 R_3 - R_2 R_4) / [R_{\Gamma}(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)]. \quad (5.4)$$

Измерение сопротивления может производиться в одном из двух режимов работы моста: уравновешенном либо неуравновешенном. Мост называется уравновешенным, если разность потенциалов между вершинами c и d равна нулю, а, следовательно, и ток через гальванометр равен нулю.

Из (5.4) следует, что $I_{\Gamma} = 0$ при

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0. \quad (5.5)$$

Это условие равновесия одинарного моста постоянного тока (5.5) можно сформулировать следующим образом: для того, чтобы мост был уравновешен, произведения сопротивлений противолежащих плеч моста должны быть равны. Если сопротивление одного из плеч моста (например, R_4) неизвестно, то уравновесив мост путем подбора сопротивлений плеч R_1 , R_2 и R_3 , находим из условия равновесия

$$R_4 = (R_1 / R_2) R_3.$$

В реальных мостах постоянного тока для уравновешивания моста регулируются отношение R_1 / R_2 и сопротивление плеча R_3 , которые, соответственно, называют плечами отношения и плечом сравнения.

В состоянии равновесия моста ток через гальванометр равен нулю и, следовательно, колебания напряжения питания и сопротивления гальванометра влияния на результат измерения не оказывают (важно лишь, чтобы чувствительность гальванометра была достаточной для надежной фиксации состояния равновесия). Поэтому основная погрешность уравновешенного моста определяется чувствительностью гальванометра, чувствительностью схемы, погрешностью сопротивлений плеч, а также сопротивлениями монтажных проводов и контактов. При измерении малых сопротивлений существенным источником погрешности может явиться сопротивление проводов, с помощью которых измеряемый резистор подключается к входным зажимам моста, так как оно полностью входит в результат измерения. Поэтому нижний предел измерения одинарного моста постоянного тока ограничен значениями сопротивления порядка 1 Ом. Верх-

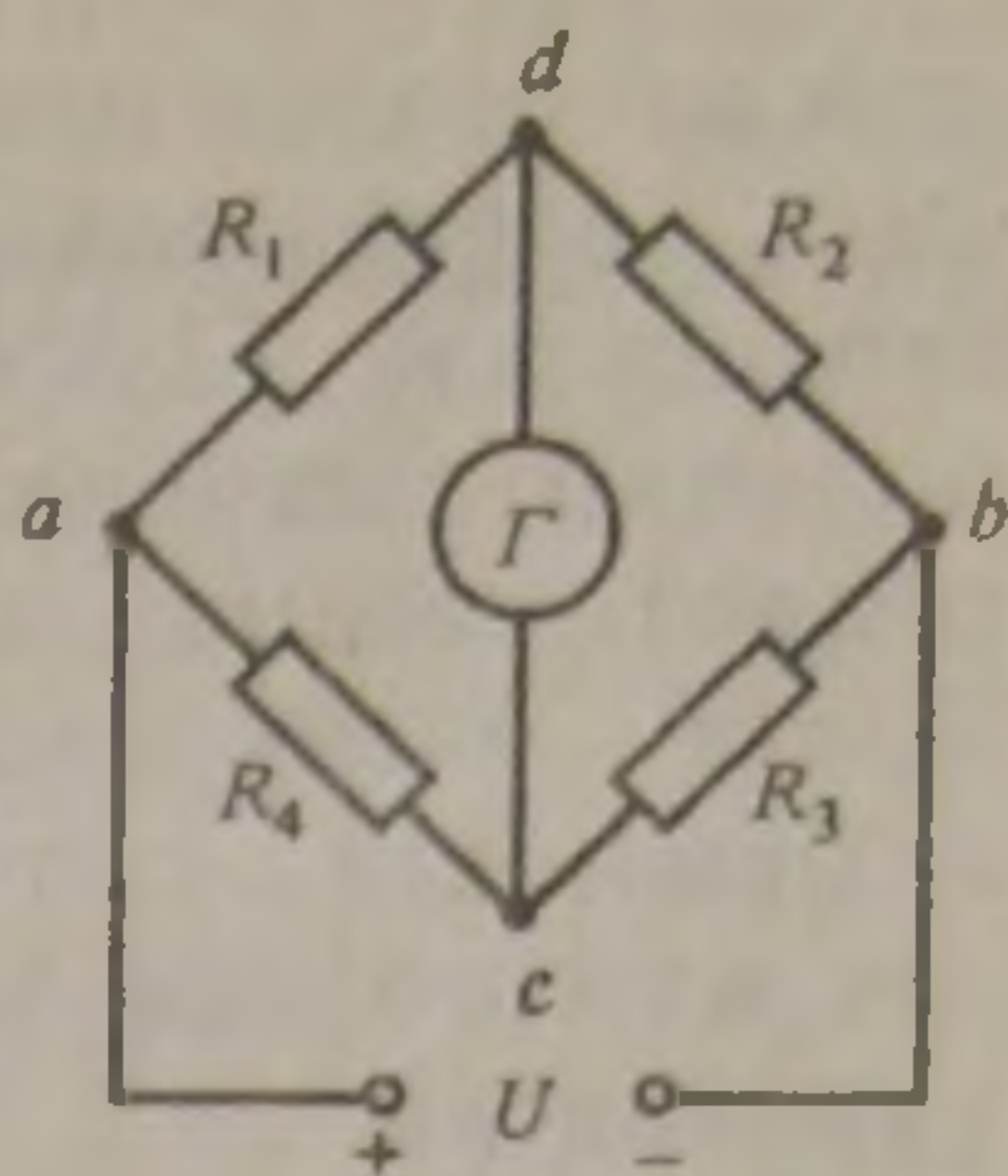


Рис. 5.9. Схема одинарного моста постоянного тока

ний же предел измерения $10^6 \dots 10^8$ Ом ограничивается чувствительностью гальванометра. При больших значениях измеряемого сопротивления токи в плечах моста очень малы и чувствительности гальванометра недостаточно для четкой фиксации равновесия.

В режиме неуравновешенного моста измерение сопротивления производится по показаниям гальванометра, предварительно в комплекте с мостовой схемой отградуированного в единицах сопротивления. Неуравновешенные мосты часто применяются в устройствах для разбраковки изделий по сопротивлению (резисторов, обмоток реле и т.п.). Так, если при изготовлении резисторов необходимо отобрать из партии резисторы с сопротивлением $R = R_{\text{ном}} \pm \Delta R$, то, уравновесив предварительно мост с помощью образцового магазина сопротивления при $R_x = R_{\text{ном}}$, изменяют сопротивление магазина на $\pm \Delta R$ и фиксируют соответствующие отклонения стрелки гальванометра $\pm \Delta \alpha$ (гальванометр с нулем посередине шкалы). Затем, вместо магазина сопротивления ко входу моста подключаются контролируемые резисторы и если стрелка гальванометра выходит за допустимые пределы, резистор бракуется.

Неуравновешенные мосты по точности значительно уступают уравновешенным, так как на результат измерения кроме факторов, указанных для уравновешенных мостов, оказывают влияние колебания напряжения питания и сопротивления гальванометра.

Двойной мост постоянного тока. Для измерения малых сопротивлений (от 1 до 10^{-8} Ом) применяют двойные мосты. Схема двойного моста представлена на рис. 5.10.

Для исключения влияния сопротивлений соединительных проводов и переходных сопротивлений контактов измеряемое сопротивление R_x присоединяется по четырехзажимной схеме включения: двумя токовыми зажимами в цепь источника питания моста, а двумя потенциальными — в измерительную цепь. Аналогичные зажимы имеет образцовое сопротивление R_0 . В цепь источника питания моста входит регулировочное сопротивление R_p , измеряемое сопротивление R_x , образцовое сопротивление R_0 (одного порядка по величине с R_x) и сопротивление $R_{\text{ш}}$.

Сопротивление плеч R_1, R_2, R_3 и R_4 , входящие в измерительную цепь, выбирают достаточно большими (сотни и тысячи Ом), поэтому влияние

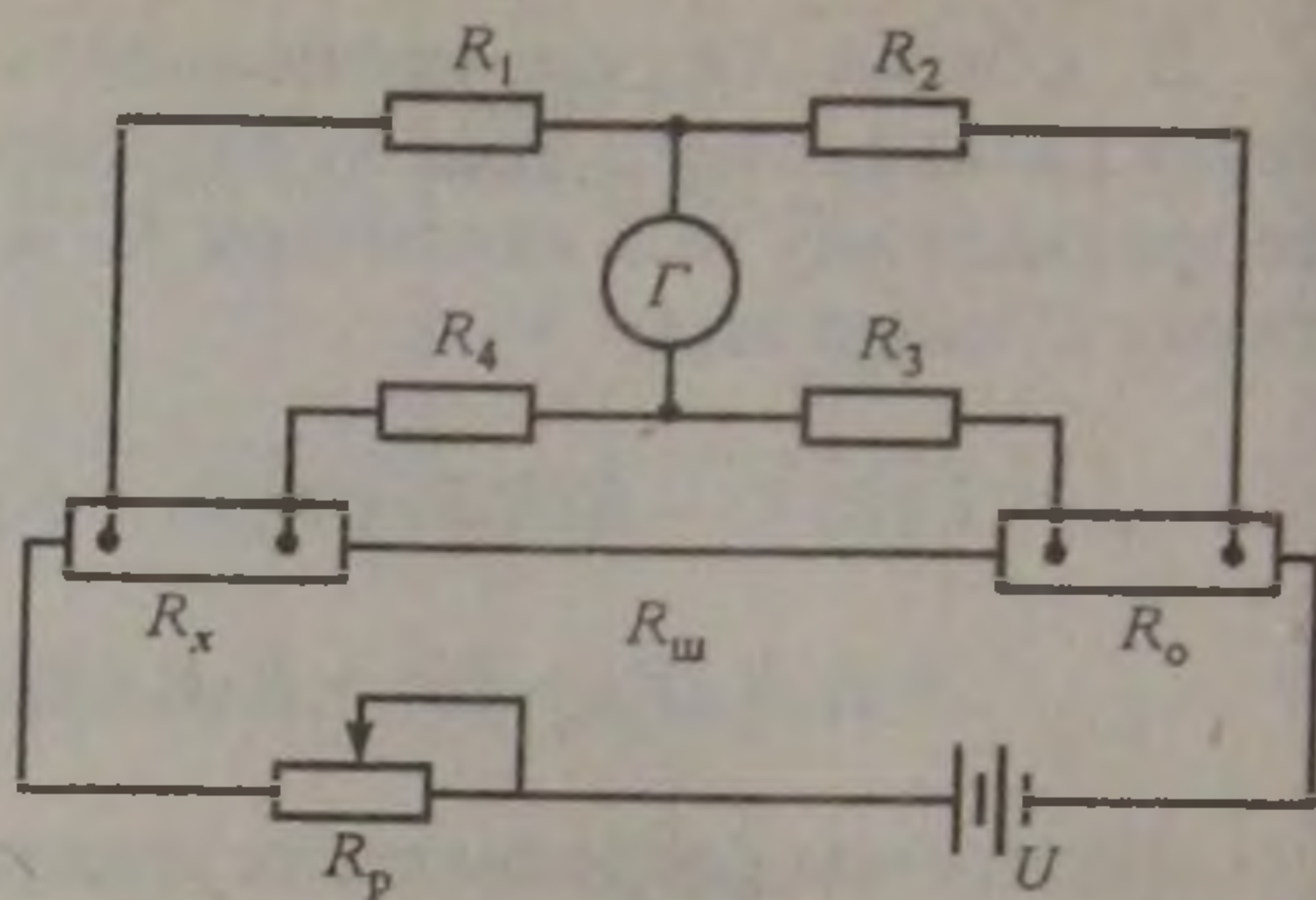


Рис. 5.10. Схема двойного моста постоянного тока

сопротивлений монтажных проводов и переходных сопротивлений в контактах пренебрежимо мало.

При равновесии моста формула для определения сопротивления имеет вид

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 + \frac{R_3 R_{ш}}{R_3 + R_4 + R_{ш}} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_4}{R_3} \right). \quad (5.6)$$

При соблюдении равенства

$$R_1 / R_2 = R_4 / R_3 \quad (5.7)$$

и достаточно малом сопротивлении $R_{ш}$ вторым членом формулы (5.6) можно пренебречь. Тогда формула (5.6) упрощается

$$R_x = (R_1 / R_2) R_0.$$

Равенство (5.7) должно соблюдаться постоянно, поэтому резисторы R_1 , R_2 и R_3 , R_4 регулируются при помощи спаренных органов управления. Резистор $R_{ш}$ представляет собой короткий отрезок медной шины большого сечения, сопротивление которого очень мало.

Как указано выше, ограниченная чувствительность гальванометра и мостовой схемы приводит к погрешности от неполного уравнивания мостов.

Чувствительность гальванометра $S_{г}$ представляет собой отношение приращения отклонения стрелки $\Delta\alpha$ к приращению тока $\Delta I_{г}$ через гальванометр:

$$S_{г} = \Delta\alpha / \Delta I_{г}.$$

Чувствительность мостовой схемы $S_{сх}$ определяется как отношение изменения выходного сигнала $\Delta I_{г}$ к изменению входного сигнала ΔR_x

$$S_{сх} = \Delta I_{г} / \Delta R_x.$$

Чувствительность моста $S_{м} = \Delta\alpha / \Delta R_x$ можно представить в виде

$$S_{м} = (\Delta\alpha / \Delta I_{г})(\Delta I_{г} / \Delta R_x) = S_{г} S_{сх}. \quad (5.8)$$

Отсюда видно, что чувствительность моста тем больше (а, следовательно, погрешность от неполного уравнивания тем меньше), чем больше чувствительность мостовой схемы и гальванометра. Необходимая чувствительность моста достигается выбором гальванометра и правильным расчетом мостовой схемы.

Промышленностью выпускаются одинарные и одинарно-двойные мосты постоянного тока классов от 0,005 до 5.

5.5. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОСТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Для измерения емкости, индуктивности, взаимной индуктивности и тангенса угла потерь конденсаторов применяются мосты переменного тока, схемы которых отличаются большим разнообразием. Кроме простых четырехплечих мостовых схем существуют и более сложные мостовые схемы. Эти схемы путем последовательных эквивалентных преобразований могут быть приведены к простой четырехплечей схеме, которая является, таким образом, основной.

Схема одинарного четырехплечего моста переменного тока приведена на рис. 5.11. Так как мост питается напряжением переменного тока, то в качестве индикатора в нем применяются электронные милливольтметры переменного тока, либо осциллографические индикаторы нуля.

В общем случае сопротивления плеч моста переменного тока представляют собой комплексные сопротивления вида $\dot{Z}_i = R_i + jX_i$.

Аналогично соотношению (5.5) условие равновесия одинарного моста переменного тока имеет вид:

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_4.$$

Записав это выражение в показательной форме, получим

$$Z_1 e^{j\varphi_1} \cdot Z_3 e^{j\varphi_3} = Z_2 e^{j\varphi_2} \cdot Z_4 e^{j\varphi_4}. \quad (5.9)$$

где Z_i — модуль комплексного сопротивления; φ_i — фазовый сдвиг между током и напряжением в соответствующем плече.

Соотношение (5.9) распадается на два скалярных условия равновесия:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 Z_3 &= Z_2 Z_4; \\ \varphi_1 + \varphi_3 &= \varphi_2 + \varphi_4. \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

Отсюда следует, что в схеме моста переменного тока равновесие наступает только при равенстве произведений модулей комплексных сопротивлений противоположащих плеч и равенстве сумм их фазовых сдвигов. При этом нужно иметь в виду, что при изменении значений активных и реактивных составляющих одновременно изменяются и модуль, и фаза, поэтому мост переменного тока можно привести к состоянию равновесия лишь большим или меньшим числом переходов от регулирования одного параметра к регулированию другого.

Второе уравнение (5.10) показывает, какими по характеру должны быть сопротивления плеч мостовой схемы, чтобы обеспечить возможность ее уравно-

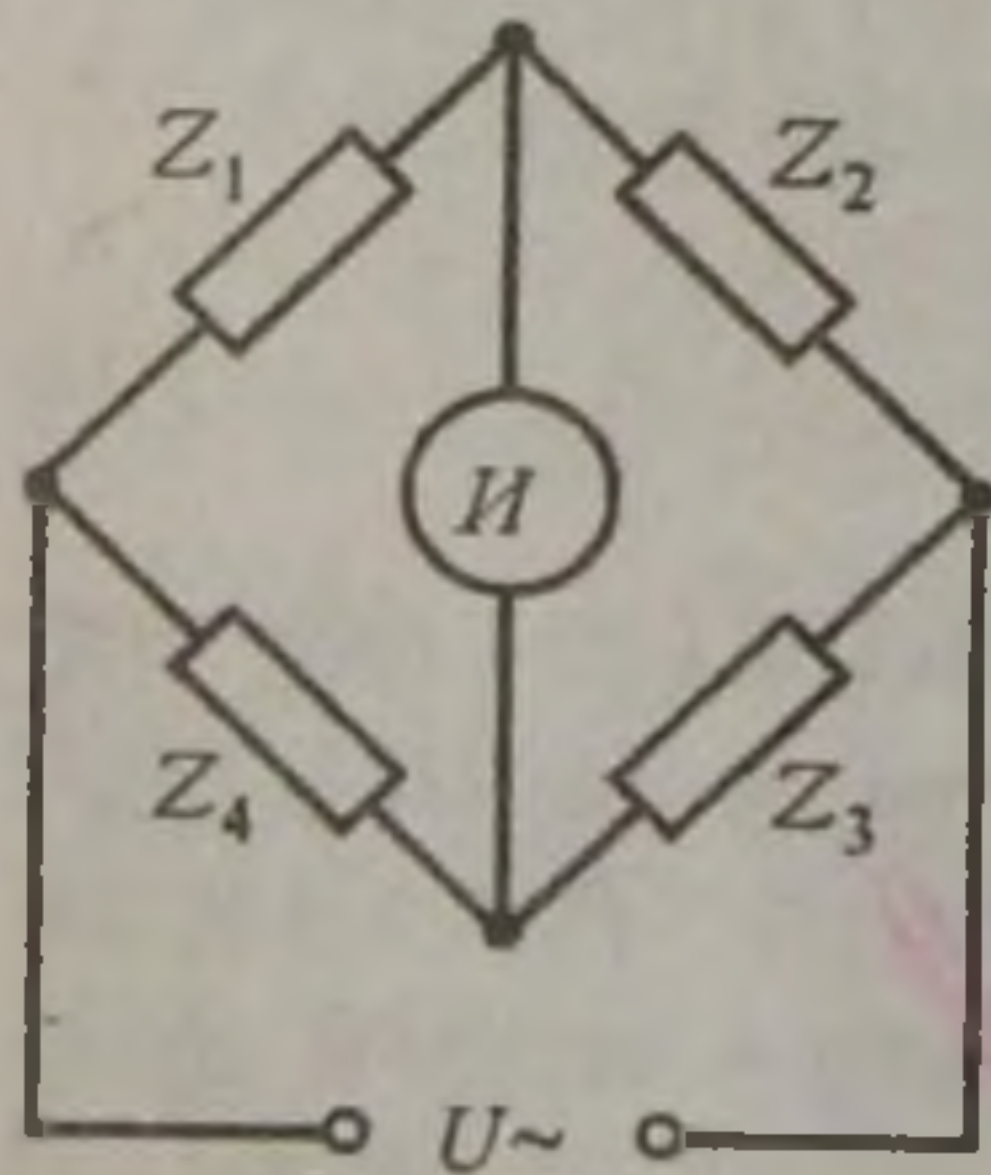


Рис. 5.11. Схема моста переменного тока

вешивания. Так, например, если в двух смежных плечах включены активные сопротивления ($\varphi = 0$), то в двух других смежных плечах обязательно должны быть сопротивления одного характера — или индуктивности, или емкости.

Для измерения емкости конденсаторов без потерь используется мостовая схема, приведенная на рис. 5.12, а. Условие равновесия для этой схемы имеет вид

$$R_1 / \omega C_{\text{обр}} = R_2 / \omega C_x,$$

где $C_{\text{обр}}$ — образцовый конденсатор переменной емкости, откуда

$$C_x = (R_2 / R_1) C_{\text{обр}}.$$

Мостовая схема для измерения индуктивности приведена на рис. 5.12, б. В качестве плеча сравнения здесь также используется конденсатор переменной емкости $C_{\text{обр}}$. Полагая, что активное сопротивление катушки пренебрежимо мало ($R_L = 0$), получим условие равновесия

$$\omega L_x / \omega C_0 = R_2 \cdot R_4,$$

откуда

$$L_x = R_2 \cdot R_4 C_{\text{обр}}.$$

Чувствительность мостов переменного тока определяется аналогично (5.8). Погрешность моста переменного тока также определяется погрешностями значений элементов образующих мост, переходных сопротивлений контактов, чувствительностью схемы и индикатора. Мосты переменного тока больше, чем мосты постоянного тока, подвержены влиянию помех и паразитных связей между плечами, плечами и землей, мостом и оператором. Именно поэтому, даже при тщательном экранировании моста и принятии других мер защиты, погрешности мостов переменного тока больше, чем погрешности мостов постоянного тока. Промышленностью выпускаются мосты переменного тока классов точности от 0,1 до 5,0.

Мосты переменного тока работают обычно на низких частотах 100 Гц и 1000 Гц. При работе на повышенных частотах погрешности измерения резко возрастают.

5.6. РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Резонансный метод измерения основывается на определении резонансной частоты колебательного контура, составленного из образцово-

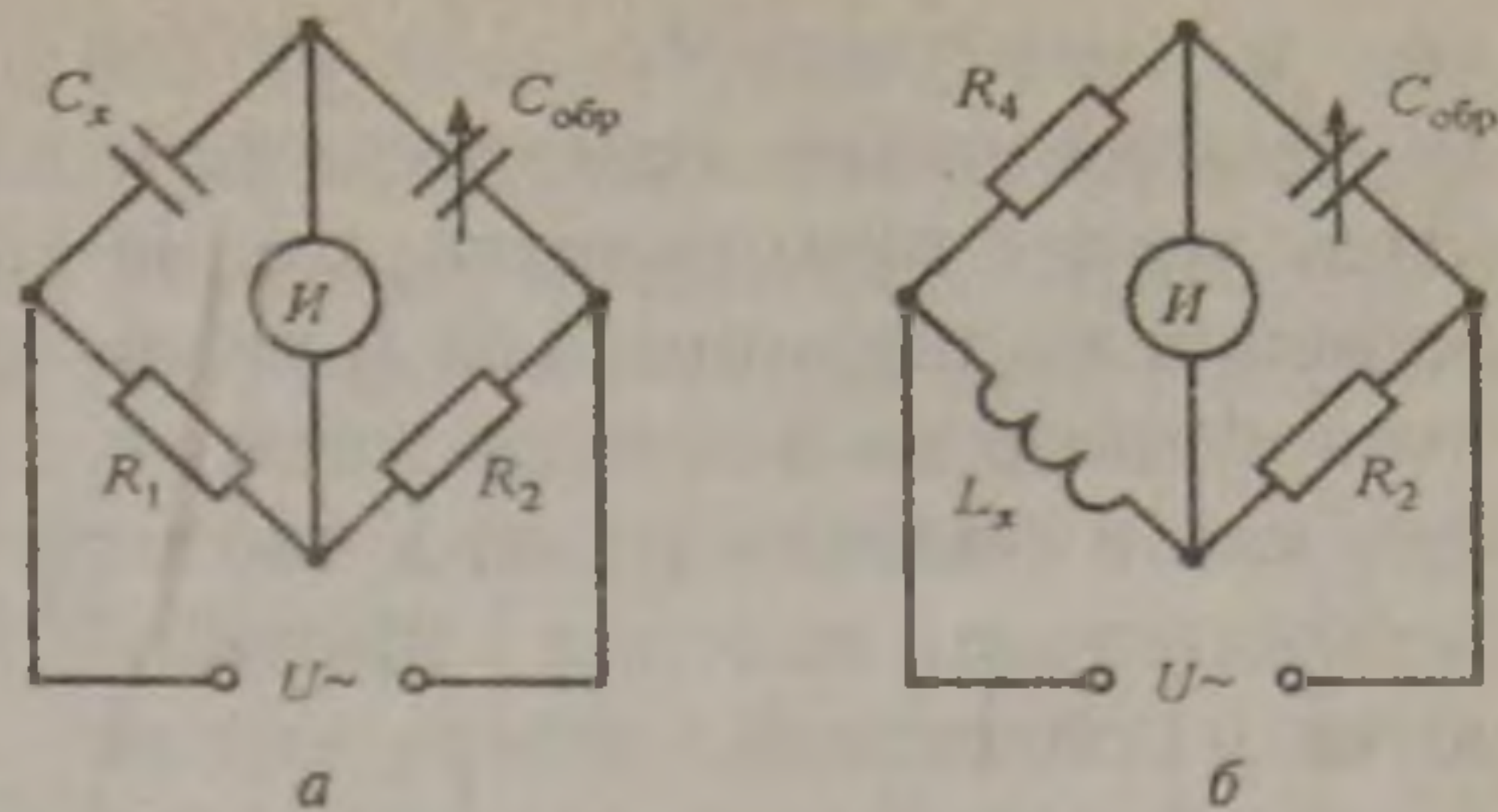


Рис. 5.12. Измерение емкости и индуктивности мостом переменного тока

го и измеряемого элементов (индуктивностей или емкостей). Этот метод применяется для измерения индуктивностей и емкостей только на высокой частоте, так как в области низких частот резонансные явления проявляются недостаточно резко, что не позволяет получить высокую точность измерения.

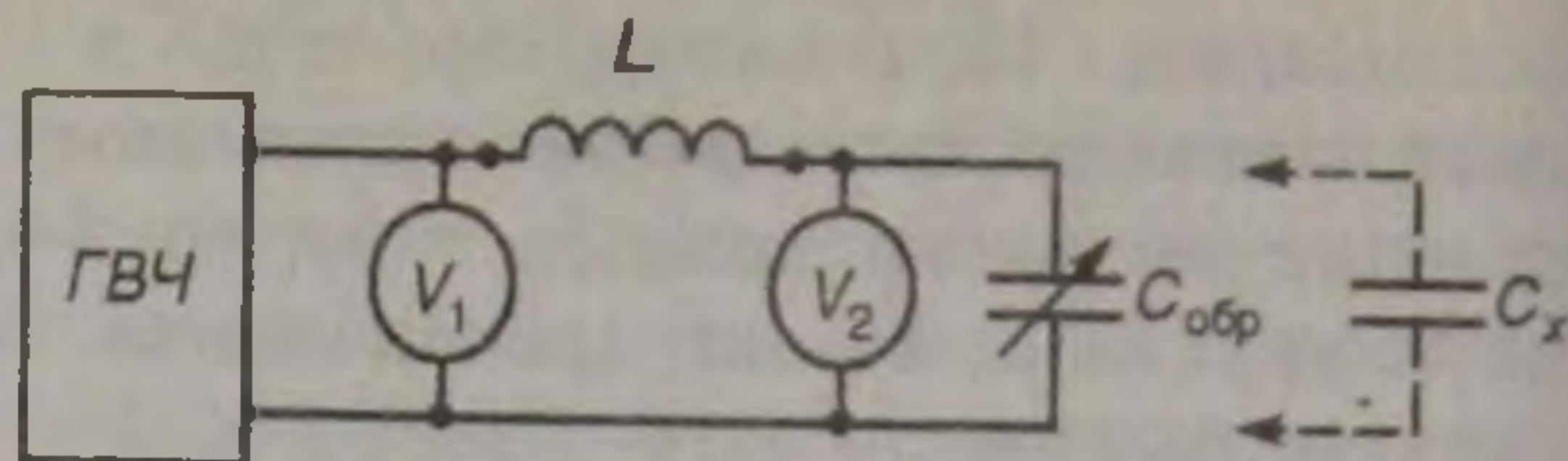


Рис. 5.13. Принцип действия измерителя добротности

Известно несколько вариантов резонансного метода, на основе которых построены средства измерения параметров двухполюсников. Рассмотрим принцип действия прибора, называемого измерителем добротности или куметром. Схема измерителя добротности (рис. 5.13) включает источник питания — высокочастотный генератор ГВЧ, последовательный колебательный контур, образуемый катушкой L с активным сопротивлением R_L и конденсатором $C_{обр}$. Напряжение на выходе генератора и на конденсаторе $C_{обр}$ измеряется вольтметрами с высокоомным входом V_1 и V_2 . Изменением частоты ГВЧ или емкости конденсатора $C_{обр}$ можно настроить колебательный контур в резонанс. Из теории электрических цепей известно, что при резонансе напряжение на конденсаторе и на индуктивности оказывается в Q раз больше, чем напряжение питания U_1 . Здесь Q — добротность контура

$$Q = 1/\omega C_{обр} R_L \quad (5.11)$$

или

$$Q = \omega L / R_L. \quad (5.12)$$

Измерение индуктивности производится следующим образом: катушка, индуктивность L_x которой необходимо измерить, подсоединяется к зажимам L и при заданной частоте питания f контур настраивается в резонанс изменением емкости $C_{обр}$. При резонансе отклонение стрелки вольтметра V_2 будет максимальным. Приравняв (5.11) и (5.12), получим

$$L_x = 1/\omega^2 C_{обр},$$

где значение $C_{обр}$ отсчитывается по шкале конденсатора переменной емкости.

При измерении емкости к зажимам L подсоединяется образцовая катушка индуктивности $L_{обр}$ и измерение выполняется в два этапа. Вначале изменением частоты генератора контур $L_{обр} C_{обр}$ настраивается в резонанс. Резонансная частота в этом случае будет

$$f_{рез} = 1/(2\pi \sqrt{L_{обр} C_{обр1}}). \quad (5.13)$$

Далее, конденсатор, емкость которого C_x необходимо измерить, подключается параллельно конденсатору $C_{обр}$ и, не меняя частоты генератора, контур снова настраивают в резонанс изменением емкости образцового конденсатора. Так как резонансная частота (частота питающего напряжения) не изменилась, то

$$f_{рез} = 1/2\pi \sqrt{L_{обр}(C_{обр2} + C_x)}. \quad (5.14)$$

Приравняв (5.13) и (5.14), получим

$$C_x = C_{обр1} - C_{обр2}.$$

При измерении добротности контура она может быть определена по показаниям вольтметров

$$Q = U_2/U_1.$$

Если поддерживать напряжение питания U_1 постоянным, то очевидно, что шкала вольтметра U_2 может быть проградуирована непосредственно в единицах добротности. Выпускаемые промышленностью измерители добротности обеспечивают проведение измерений на частотах от 1 кГц до 300 МГц с погрешностью в пределах 0,5... 5%.

5.7. МЕТОД ДИСКРЕТНОГО СЧЕТА. ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ

В основу работы цифровых средств измерения параметров двухполюсников, реализующих метод дискретного счета, положено преобразование измеряемого параметра в пропорциональный интервал времени и измерение этого интервала путем заполнения его счетными импульсами. Для этого используются закономерности апериодического процесса, возникающего при подключении заряженного конденсатора или катушки с током (индуктивности) к образцовому резистору. При измерении активного сопротивления используется процесс разряда образцового конденсатора через измеряемый резистор. Наибольшее применение метод дискретного счета нашел при создании цифровых измерителей емкостей и сопротивлений. Структурная схема цифрового измерителя емкости и сопротивления приведена на рис. 5.14. Прибор работает следующим образом.

Перед началом измерения ключ $Kл$ находится в положении 1 и конденсатор C_x заряжается через ограничительный резистор R до напряжения источника U . В момент начала измерения t_1 (рис. 5.15, а) управляющее устройство $УУ$ вырабатывает импульс, который сбрасывает предыдущее показание счетчика импульсов $Сч$, открывает электронный ключ $ЭК$ и переводит ключ $Kл$ в положение 2. Конденсатор C_x начинает разряжаться через образцовый резистор $R_{обр}$ по экспоненциальному закону (рис. 5.15, б)

$$U_C = U e^{-(t-t_1)/\tau},$$

где $\tau = R_{обр}C_x$ — постоянная времени цепи разряда.

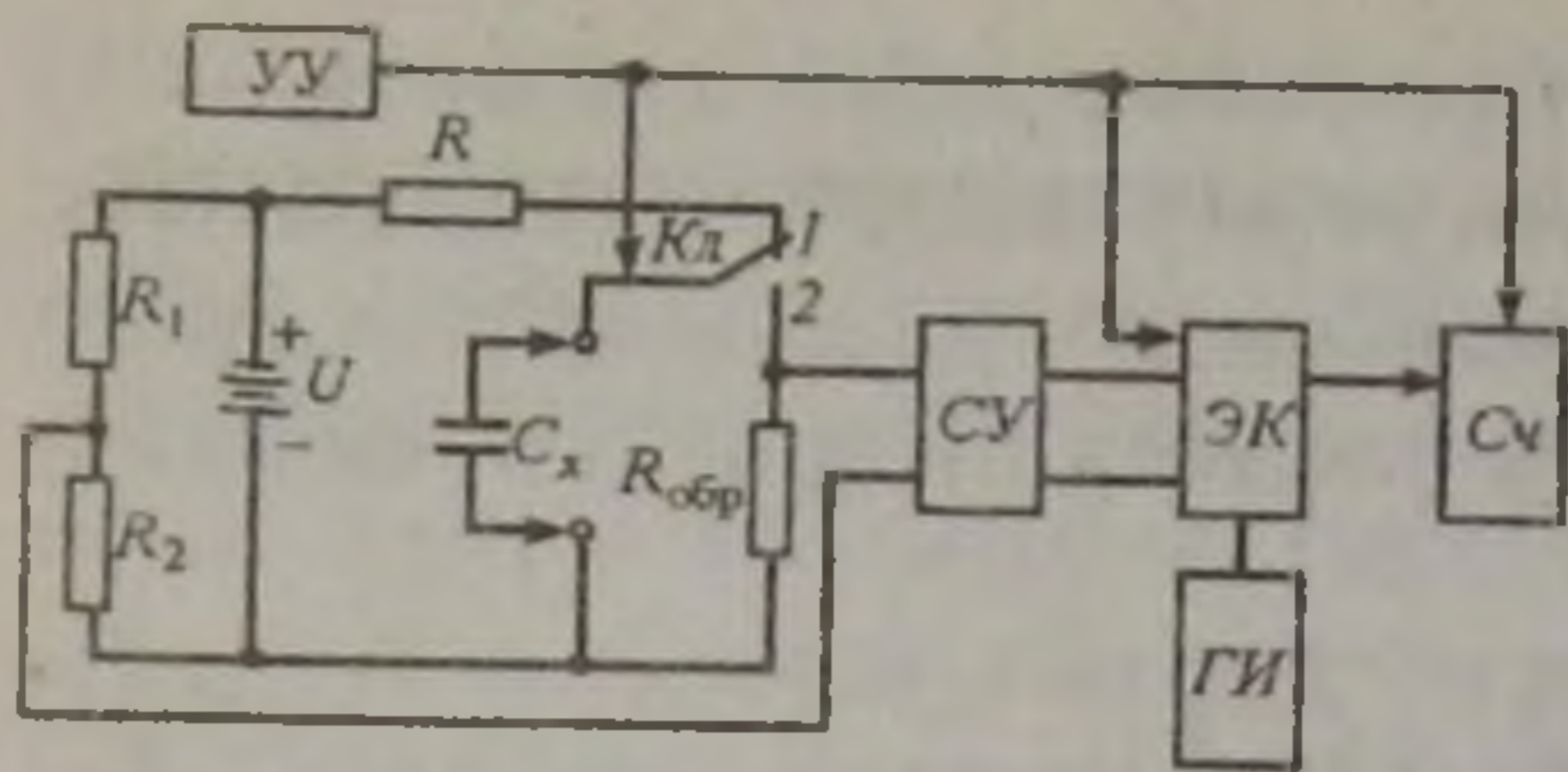


Рис. 5. 14. Цифровой прибор для измерения емкости и сопротивления

В момент t_1 импульсы генератора импульсов ГИ, следующие с частотой f_0 , начинают поступать на вход счетчика импульсов Сч. Через интервал времени τ напряжение на конденсаторе принимает значение

$$U_C = U / e = 0,37 U.$$

Напряжение U_C подается на один из входов сравнивающего устройства СУ, ко второму входу устройства подводится напряжение U_R , снимаемое с резистора R_2 делителя, состоящего из резисторов R_1 и R_2 . Если подобрать резисторы R_1 и R_2 так, чтобы напряжение U_R было равно $0,37U$, то в момент t_2 равенства напряжений U_C и U_R на входе сравнивающего устройства возникает второй импульс, который закрывает электронный ключ и счетчик прекращает подсчет импульсов (рис. 5.15, в).

Если за время $t_2 - t_1 = \tau$ на счетчик поступило N импульсов, то можно записать $N = f_0 \tau$.

Так как $\tau = R_{обр} C_x$, то при фиксированных значениях f_0 и $R_{обр}$

$$C_x = N / R_{обр} f_0 = KN,$$

т.е. измеряемая емкость прямо пропорциональна показанию счетчика, и счетчик может быть отградуирован в единицах емкости.

При наличии образцового конденсатора $C_{обр}$ можно аналогичным образом измерить сопротивление резистора

$$R_x = N / C_{обр} f_0 = KN.$$

Приборы для измерения параметров электрических цепей, использующие метод дискретного счета, обеспечивают сравнительно малую погрешность измерения (0,1 ... 0,2%). К недостаткам таких приборов можно отнести невозможность измерения параметров на рабочей частоте.

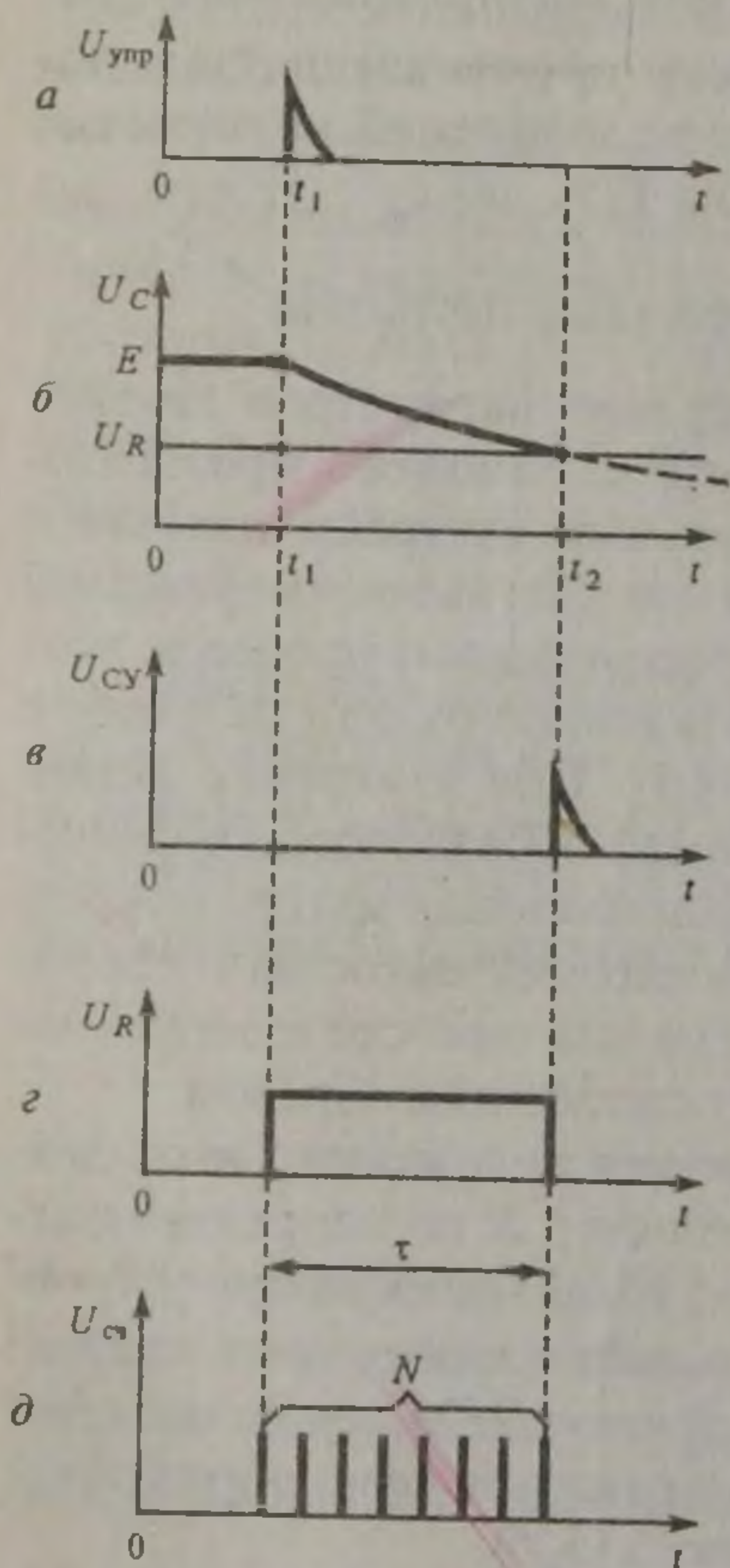


Рис. 5. 15. Временные диаграммы прибора при измерении емкости

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Частота колебаний является важнейшей характеристикой переменного тока, а измерение частоты — одной из основных задач, решаемых в радиотехнике и электронике. *Частотой колебаний* называют число полных колебаний в единицу времени:

$$f = N / T_{\text{сч}},$$

где $T_{\text{сч}}$ — интервал времени, за которое совершается N колебаний.

Для гармонических колебаний частота $f = 1/T$, где T — период колебаний.

Спектр частот электромагнитных колебаний, которые используются и которые необходимо измерять, простирается от долей герца до тысяч гигагерц. Весь спектр электромагнитных колебаний условно разделяется на два диапазона — низких и высоких частот. Низкие частоты занимают область частот от инфразвуковых (ниже 20 Гц) до ультразвуковых (20...200 кГц); высокие частоты — от высоких (20 кГц...30 МГц) до сверхвысоких (выше 300 МГц).

Так как измерение частоты, по самому определению частоты занимает определенный промежуток времени, то результатом измерения является усредненное на интервале времени $T_{\text{сч}}$ значение частоты и, следовательно, можно ожидать, что погрешность измерения частоты будет зависеть от времени усреднения.

В зависимости от участка частотного спектра и допустимой погрешности для измерения частоты применяют различные способы и приемы измерения, основанные как на использовании методов непосредственной оценки, так и методов сравнения.

На основе метода сравнения реализуются осциллографические способы измерения частоты и гетеродинные частотомеры. К приборам, работающим по методу непосредственной оценки, относятся резонансные и электронно-счетные (цифровые) частотомеры. В настоящее время гетеродинные частотомеры полностью вытеснены электронно-счетными частотомерами, обладающими лучшими метрологическими и эксплуатационными характеристиками. Резонансные частотомеры также вытесняются из эксплуатации, однако небольшая номенклатура таких приборов еще встречается в обращении. С учетом сказанного рассмотрим только принципы построения цифровых и резонансных частотомеров и осциллографический вариант измерения частоты методом сравнения.

6.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Для измерения частоты методом сравнения необходимо иметь меру частоты и сравнивающее устройство, с помощью которого можно зафиксировать равенство измеряемой частоты и частоты воспроизводимой мерой или кратность этих частот.

В качестве образцовой меры частоты при технических измерениях обычно применяются измерительные генераторы.

Измерительный генератор представляет собой источник электрических сигналов определенной формы, параметры которых (частота, напряжение, мощность) могут регулироваться и поддерживаться с требуемой точностью. Измерительные генераторы применяются также для питания измерительных цепей, при настройке и испытаниях измерительной, радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры, устройств автоматики и др. Номенклатура измерительных генераторов, выпускаемых промышленностью, охватывает диапазон от инфранизких до сверхвысоких частот, с пределами регулирования напряжения выходного сигнала от долей микровольта до десятков вольт.

В зависимости от диапазона воспроизводимых частот и формы колебаний измерительные генераторы подразделяются на генераторы сигналов низкочастотные, генераторы сигналов высокочастотные, генераторы импульсов, генераторы сигналов сложной формы, синтезаторы частоты, генераторы испытательных импульсов.

Основными нормируемыми метрологическими характеристиками измерительных генераторов являются пределы и диапазоны частот и уровней воспроизводимых сигналов, погрешность установки частоты, нестабильность частоты, погрешность установки выходного напряжения, пределы искажения формы сигнала.

При измерениях частоты методом сравнения применяются генераторы синусоидальных сигналов низких и высоких частот.

Генераторы сигналов низких частот являются источниками электрических колебаний синусоидальной формы в диапазоне частот от 20 Гц до 300 кГц. Имеется тенденция к расширению этого диапазона вниз до единиц герц и вверх до единиц мегагерц.

Структурная схема генератора сигналов низких частот представлена на рис. 6.1. Задающий генератор $ZГ$ вырабатывает напряжение синусоидальной формы требуемой частоты. Это напряжение поступает на усилитель $УНЧ$, где осуществляется его усиление, а также плавная регулировка опорного уровня выходного напряжения, которое контролируется отсчетным устройством $ОУ$. Атенюатор $Ат$ позволяет ослаблять опорное выходное напряжение в заданное число раз. Для передачи максимальной мощности от генератора в нагрузку должно быть выполнено условие согласования их сопротивлений, для чего в некоторых генераторах имеется согласующий трансформатор $СТ$, имеющий переменный коэффициент трансформации.

Основным узлом генератора, определяющим его тип, является задающий генератор. В зависимости от схемы задающего генератора различают три типа измерительных генераторов

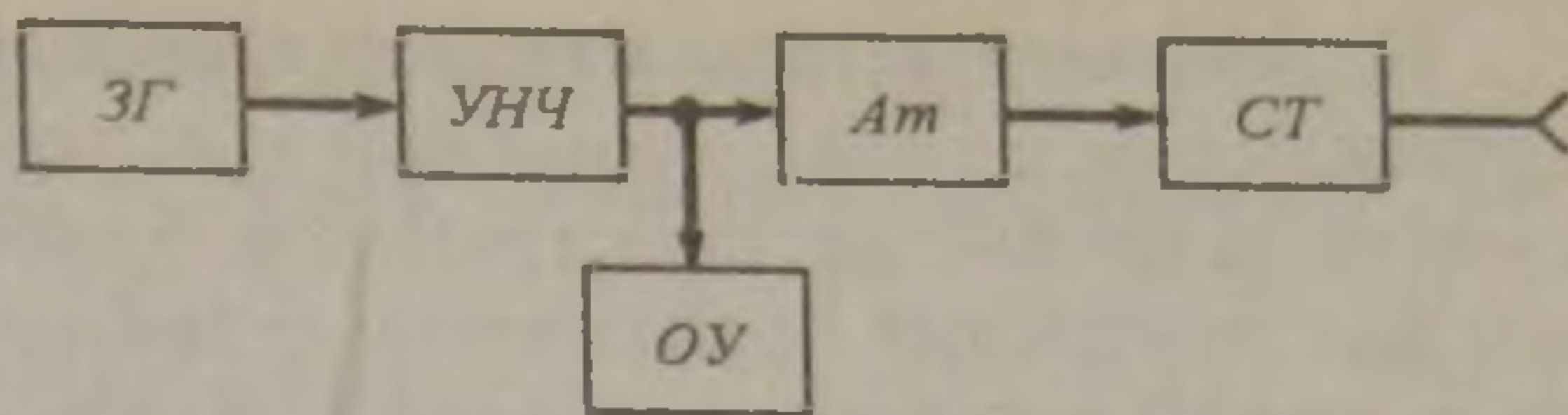


Рис. 6.1. Структурная схема генератора сигналов низких частот

низкой частоты: *RC*-генераторы, генераторы на биениях и генераторы с диапазонно-кварцевой стабилизацией частоты. Принципы действия задающих генераторов рассматриваются в специальных дисциплинах. Здесь отметим лишь, что наилучшие метрологические характеристики обеспечиваются генераторами с кварцевой стабилизацией частоты. Относительная погрешность установки частоты в генераторах этого типа составляет $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-7}$, нестабильность частоты $3 \cdot 10^{-7} \dots 3 \cdot 10^{-9}$; коэффициент гармоник $1 - 2\%$.

Генераторы сигналов высоких частот являются источниками незатухающих или модулированных по амплитуде синусоидальных сигналов в диапазоне $0,1 \dots 100$ МГц. Основным узлом генератора является задающий *LC*-генератор. Диапазон генерируемых частот разбивается на поддиапазоны. Переход от одного поддиапазона к другому осуществляется путем переключения катушек индуктивности. Плавная перестройка частоты в пределах поддиапазона производится конденсатором переменной емкости. Амплитудная модуляция осуществляется в модуляторе, представляющем собой широкополосный усилитель с нелинейным коэффициентом передачи, изменяемым модулирующим напряжением. Модуляция сигнала может осуществляться как от внутреннего, так и от внешнего источника модулирующего напряжения.

Метрологические характеристики высокочастотных измерительных генераторов с *LC* контурами не столь высоки, как у стабилизированных кварцем генераторов низкой частоты. Относительная погрешность установки частоты примерно $1 \cdot 10^{-2}$; нестабильность частоты $1 \cdot 10^{-2} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$.

Существенное уменьшение погрешности и улучшение других метрологических характеристик достигается в измерительных генераторах, в которых задающий генератор выполнен на базе синтезатора частоты. Принцип работы синтезатора частоты основан на многократном преобразовании опорной частоты f_0 , получаемой от генератора с кварцевой стабилизацией, в сетку дискретных выходных частот $f_{\text{вых}}$. Таким образом, обеспечивается получение сигналов с высокой стабильностью частоты в диапазоне от единиц герц до десятков мегагерц с шагом дискретности установки частоты $0,1 \dots 0,01$ Гц. Диапазон частот выходных сигналов синтезаторов частоты 20 Гц $\dots 50$ МГц; погрешность установки опорной частоты $1 \cdot 10^{-8}$.

Измерение частоты методом сравнения. Измерение частоты на основе сравнения ее с точно известной и высокостабильной мерой частоты получило широкое распространение благодаря своей простоте, пригодности для измерения практически в любом диапазоне частот и сравнительно высокой точности результата измерения.

Для измерения частоты f_x необходимо иметь источник образцовых частот (меру) $f_{обр}$ и сравнивающее устройство — индикатор равенства или кратности f_x и $f_{обр}$. При технических измерениях в качестве источников образцовых частот используются измерительные генераторы. Индикатором равенства или кратности частот обычно является электронно-лучевой осциллограф. При этом возможно измерение частоты при линейной, либо при синусоидальной развертке в осциллографе.

При линейной развертке сигнал измеряемой частоты f_x сравнивается с частотой меток времени от калибратора длительностью f_m . Измерение выполняется следующим образом: напряжение с частотой f_x подается на вход Y , а напряжение с выхода калибратора длительности — в канал Z (на модулятор трубки). Генератор развертки осциллографа включен. Устанавливают на экране несколько периодов измеряемой частоты и регулируют частоту меток так, чтобы их изображение попадало в одну и ту же точку каждого периода. В этом случае измеряемая частота $f_x = f_m / n$, где n — число меток, приходящихся на один период исследуемого напряжения (рис. 6.2, *a*).

При синусоидальной развертке (внутренний генератор развертки выключен) напряжение образцовой частоты $f_{обр}$ подается в канал X осциллографа, а неизвестной f_x в канал Y . Изменяя образцовую частоту, добиваются получения осциллограммы в виде неподвижной фигуры Лиссажу. Форма фигуры Лиссажу зависит от амплитудных и фазовых соотношений между напряжениями образцовой и измеряемой частот.

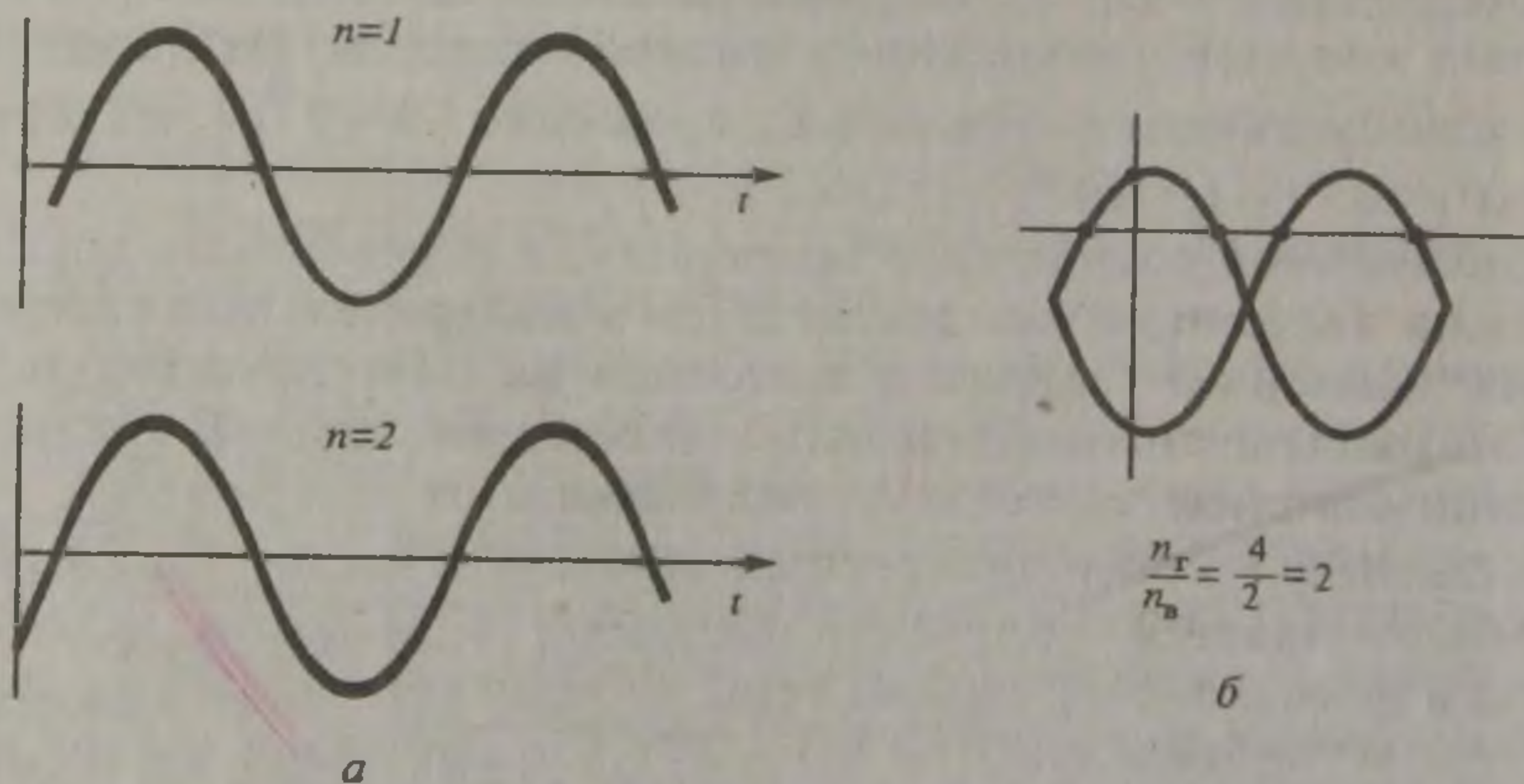


Рис. 6.2. Измерение частоты методом сравнения при линейной (*a*) и синусоидальной (*б*) развертке

Определив кратность частот (по осциллограмме) по числу пересечений фигуры Лиссажу горизонтальной (n_r) и вертикальной (n_v) линиям (рис. 6.2, б) получают

$$f_x = (n_r/n_v)f_{обр}. \quad (6.1)$$

Напряжение частот f_x и $f_{обр}$ можно подавать и на противоположные входы. В этом случае в формуле (6.1) перед $f_{обр}$ должно стоять обратное отношение. Синусоидальная развертка применяется до кратности 10, так как при большей кратности число пересечений трудно сосчитать. При увеличении кратности увеличивается и погрешность измерения. Так, если погрешность установки образцовой частоты равна $\Delta f_{обр}$, то, воспользовавшись правилом 3-м (§ 2.8) оценивания погрешности косвенного измерения, получим $\Delta f_x = (n_r/n_v) \Delta f_{обр}$.

При нестабильности частот f_x или $f_{обр}$ получение неподвижной фигуры Лиссажу затрудняется; фигура медленно перемещается и определение f_x возможно с большей погрешностью. Погрешность может быть уменьшена, если перейти к измерениям с многократными наблюдениями.

6.3. РЕЗОНАНСНЫЙ ЧАСТОТОМЕР

Резонансный частотомер (рис. 6.3) основан на явлении электрического резонанса в колебательном контуре. Колебательный контур LC через катушку связи $L_{св}$ возбуждается сигналом источника, частоту f_x колебаний которого необходимо измерить. С помощью прецизионного механизма настройки колебательный контур настраивают в резонанс с f_x . В момент резонанса, фиксируемого по максимальному показанию индикатора, производится отсчет по шкале настройки колебательного контура.

При измерении высоких частот применяется колебательный контур с сосредоточенными постоянными. В момент наступления резонанса измеряемая частота

$$f_x = 1/(2\pi \sqrt{LC}).$$

Для расширения диапазона измеряемых частот в частотомере применяются сменные катушки индуктивности. Конденсатор переменной емкости градуируется отдельно для каждой катушки. С целью повышения точности отсчета частоты и надежной фиксации резонанса механизм поворота ротора конденсатора делается с большим замедлением, а шкала разделена на большое число делений. В качестве индикатора резонанса используют электронный или детекторный вольтметр.

При измерениях ультравысоких и сверхвысоких частот в качестве резонансной системы

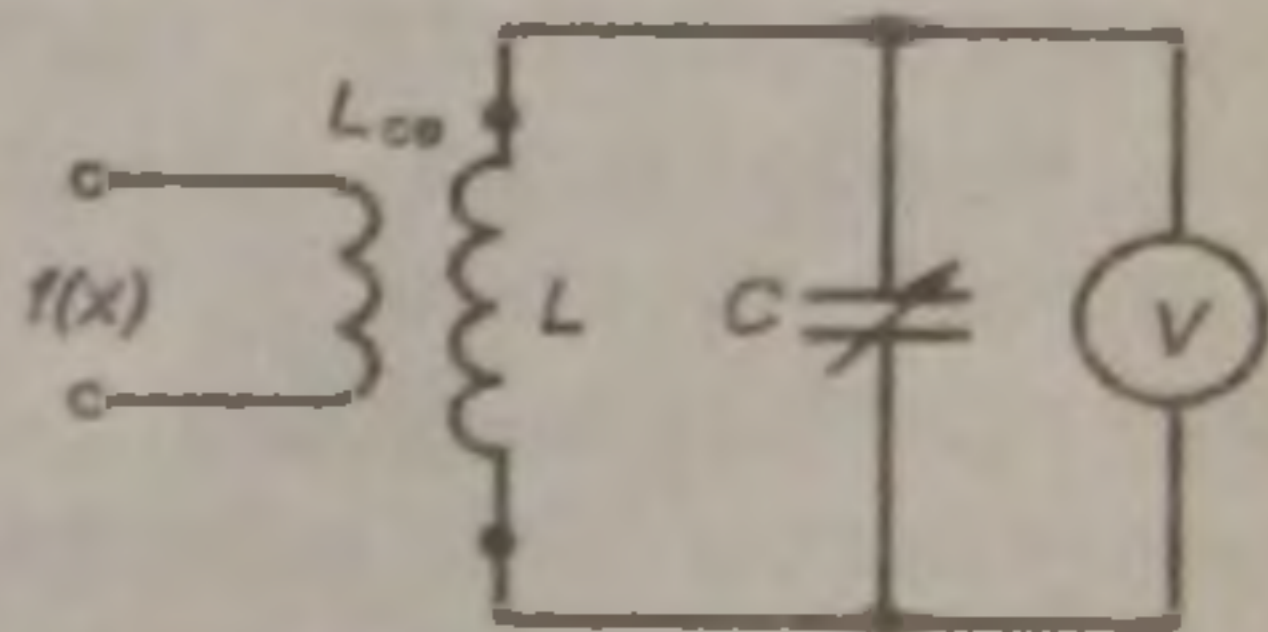


Рис. 6.3. Резонансный частотомер

применяется колебательный контур с распределенными постоянными. В зависимости от диапазона измеряемых частот он выполняется либо в виде отрезка коаксиальной линии, либо в виде объемного резонатора.

Из самого принципа измерения частоты f_x сравнением ее с резонансной частотой колебательного контура, следует, что резонансная кривая колебательного контура должна иметь достаточно четко выраженный максимум. Резонансная кривая тем острее, чем выше добротность Q контура. В зависимости от типа колебательного контура добротность составляет от нескольких сотен единиц у контуров с сосредоточенными постоянными, до 10 000...30 000 у контуров, выполненных в виде объемных резонаторов.

Неточность фиксации резонанса является одним из основных источников погрешности измерения. Если истинное значение напряжения при резонансе U_p , а отсчитанное по индикатору показание $U_{изм}$, то относительная погрешность измерения частоты от неточности фиксации резонанса

$$\frac{\Delta f}{f_p} = \pm \sqrt{\frac{(U_p / U_{изм})^2 - 1}{2Q}}$$

Другими источниками погрешности являются погрешности градуировки, погрешности механизма настройки, колебания температуры и влажности окружающей среды, недостаточная чувствительность индикатора резонанса. Тем не менее при тщательном изготовлении резонансные частотомеры обеспечивают погрешность измерения от 0,01 до 0,5%.

6.4. ЭЛЕКТРОННО-СЧЕТНЫЙ ЧАСТОТОМЕР

Принцип действия электронно-счетного частотомера основан на измерении частоты в соответствии с ее определением, т.е. на счете числа импульсов за интервал времени. Переменное напряжение, частоту f_x которого необходимо измерить, преобразуют в последовательность коротких импульсов с частотой следования, равной f_x . Если сосчитать число импульсов N за интервал времени $T_{сч}$, то частота

$$f_x = N / T_{сч}.$$

Структурная схема электронно-счетного частотомера изображена на рис. 6.4. Сигнал частоты f_x поступает на усилитель-формирователь импульсов УФ, который преобразует синусоидальное напряжение измеряемой час-

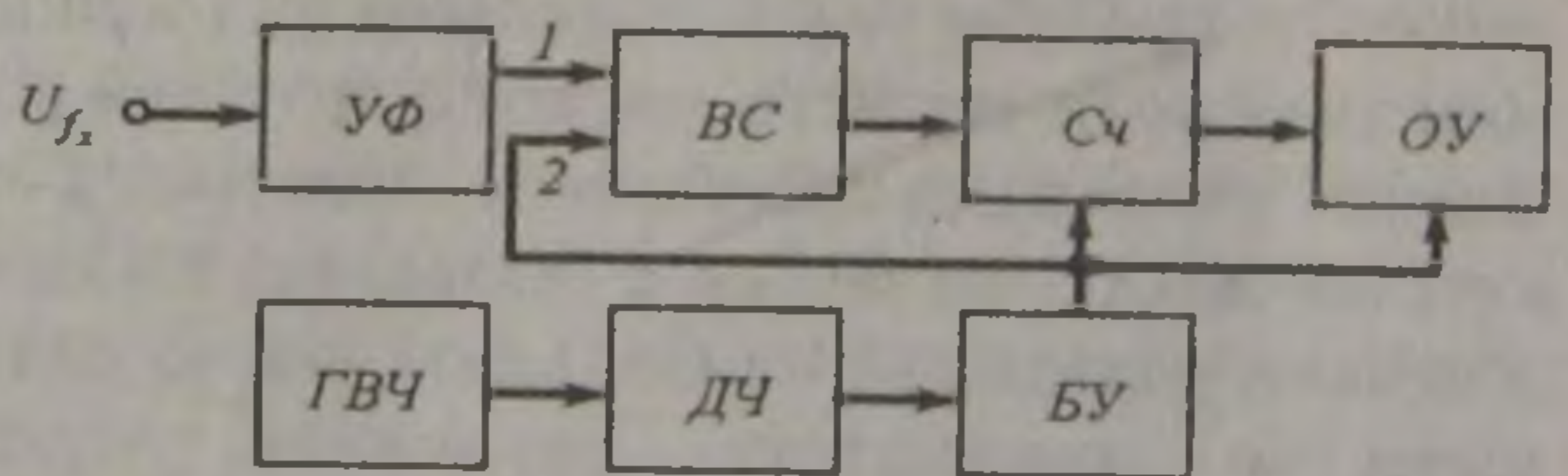


Рис. 6.4. Структурная схема электронно-счетного частотомера

тоты в последовательность однополярных импульсов. Частота следования этих импульсов равна измеряемой частоте. Импульсы поступают на вход 1 временного селектора ВС. На вход 2 селектора поступает импульс $T_{сч}$ строго определенной длительности. Длительность этого импульса задается генератором высокой частоты ГВЧ с кварцевой стабилизацией и делителем частоты ДЧ с коэффициентом деления 10^n . Частота генератора с кварцевой стабилизацией $f_{кв}$ обычно равна 1 или 5 МГц, и, следовательно, период колебаний $T_{кв}$ равен 1 или 0,2 мкс. При такой длительности времени счета измерять частоты, равные или меньшие $f_{кв}$, невозможно. Поэтому после кварцевого генератора включают декадные делители частоты, на выходах которых образуются частоты в 10^n ($n = 1, 2, 3, \dots, 7$) раз ниже частоты генератора, т.е. 100, 10 и 1 кГц, 100, 10, 1 и 0,1 Гц. Таким образом, длительность импульса, определяющего время счета, можно устанавливать ступенями от 10^{-5} до 10 с. Измеряемая частота при этом определяется по формуле $f_x = N \cdot 10^{-n} f_{кв}$. Импульс длительностью $T_{сч} = 10^n / f_{кв}$ формируется в блоке управления БУ. Импульсы измеряемой частоты поступают на электронный счетчик импульсов Сч лишь тогда, когда ко входу 2 селектора приложен импульс длительностью $T_{сч}$. С выхода счетчика информация о числе импульсов N , его заполнивших, в виде двоичного кода подается через дешифратор на цифровое отсчетное устройство (табло), на котором в цифровом виде фиксируется результат измерения в единицах частоты. Измерение производится повторяющимися циклами, задаваемыми блоком управления.

Одновременно с воздействием на временной селектор управляющее устройство выдает импульсы для автоматического сброса показаний цифрового индикатора и освобождения электронного счетчика от накопленной информации, а также для приведения в исходное состояние дешифратора и делителя частоты. Для того чтобы оператор имел возможность произвести отсчет показаний по цифровому табло, в управляющем устройстве предусмотрена блокировка временного селектора на некоторый интервал времени, в течение которого на табло сохраняются показания. Этот интервал времени называется временем индикации и может регулироваться оператором в пределах нескольких секунд. В частотомере предусмотрены автоматический и ручной режимы измерения. В автоматическом режиме счет импульсов повторяется каждый раз по окончании установленного времени индикации. В режиме ручного управления счет выполняется один раз при нажатии на кнопку; время индикации не ограничивается.

Относительная погрешность электронно-счетного частотомера при измерении частоты определяется выражением

$$\delta = \delta_0 + \delta_{нест} + 1/f_x T_{сч},$$

где δ_0 — относительная погрешность установки частоты кварцевого генератора при выпуске из производства или после корректировки

частоты после очередной поверки; $\delta_{\text{нест}}$ — относительная погрешность, вызванная нестабильностью частоты кварцевого генератора; $1/f_x T_{\text{сч}}$ — относительная погрешность, обусловленная некрatностью периодов T_x и времени счета $T_{\text{сч}}$.

Последняя составляющая погрешности оценивается исходя из того, что при некрatности периодов T_x и $T_{\text{сч}}$ подсчет числа импульсов за время счета может быть произведен с точностью ± 1 импульс. Но тогда $1/N = 1/f_x T_{\text{сч}}$.

У современных электронно-счетных частотомеров величины δ_0 и $\delta_{\text{нест}}$ составляют примерно $1 \cdot 10^{-8}$ и менее, и в силу малости при технических измерениях могут не учитываться.

Составляющая погрешности $1/f_x T_{\text{сч}}$ зависит от измеряемой частоты и времени счета. В табл. 6.1 приведены значения этой составляющей в зависимости от времени счета для различных частот.

Таблица 6.1

Время измерения $T_{\text{сч}}$, с	Погрешность $1/f_x T_{\text{сч}}$		
	0,1 Гц	100 Гц	100 кГц
10^{-2}	10^3	1	10^{-3}
10^{-1}	10^2	10^{-1}	10^{-4}
1	10	10^{-2}	10^{-5}

Из этой таблицы видно, что для измерения низких частот применение электронно-счетного частотомера нецелесообразно, так как погрешность измерения недопустимо велика.

Для того чтобы обеспечить приемлемую погрешность измерения низких частот, переходят к измерению периода с последующим пересчетом в частоту. Принцип измерения периода аналогичен рассмотренному принципу измерения частоты с той разницей, что временной селектор открывается импульсом, формируемым из напряжения, период T_x которого необходимо измерить, а длительность этого периода определяется подсчетом импульсов $f_{\text{сч}}$, получаемых от высокостабильного генератора. Если на счетчик прошло N импульсов с частотой следования $f_{\text{сч}}$, то измеряемый период

$$T_x = N / f_{\text{сч}},$$

или частота

$$f_x = f_{\text{сч}} / N.$$

Составляющая относительной погрешности измерения периода при ошибке в подсчете числа импульсов за время счета ± 1 импульс, будет равна f_x / f_0 .

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К числу основных параметров электромагнитных колебаний, определяющих состояние колебательного процесса в заданный момент времени, относится фаза. Для гармонического колебания $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ фаза Φ определяется аргументом синусоидальной функции, линейно зависящим от времени, т.е. $\Phi = \omega t + \varphi$, где φ — начальная фаза колебаний. Если начальные фазы двух синусоидальных колебаний с одинаковой частотой ω обозначить φ_1 и φ_2 , то угол сдвига фаз будет равен $\varphi_1 - \varphi_2$.

В теории колебаний *фазовым сдвигом* называется модуль разности фаз, т.е. $\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$. Приборы для измерения фазового сдвига называют *фазометрами*.

На одинаковых частотах фазовый сдвиг является постоянной величиной и не зависит от момента отсчета.

Обозначив через t_1 и t_2 моменты времени, когда переменные напряжения имеют одинаковую фазу, получим

$$\omega t_1 + \varphi_1 = \omega t_2 + \varphi_2$$

и

$$\varphi = \omega(t_2 - t_1) = 2\pi\Delta T / T, \quad (7.1)$$

или через угловые единицы

$$\varphi^\circ = 360\Delta T / T, \quad (7.2)$$

где T — период колебаний; ΔT — интервал времени между моментами, когда колебания имеют одинаковую фазу.

Из (7.1) следует, что фазовый сдвиг измеряется в долях периода и может выражаться в дуговых или угловых единицах (радианах или градусах).

Фазовый сдвиг как физическая величина широко используется для количественной оценки запаздывания прохождения сигнала через электрическую цепь. При этом, в зависимости от конкретной измерительной задачи и диапазона частот, в котором производятся измерения, требования к точности измерения фазового сдвига могут быть различными — от достаточно грубых измерений (с погрешностью измерения $1 \dots 5^\circ$) до весьма точных ($0,005^\circ$).

Для измерения фазового сдвига применяются различные по сложности способы и приемы измерений: осциллографический, суммирования напряжений, преобразования во временной интервал, компенсационный. Средства измерений фазового сдвига, реализующие перечисленные способы (кроме осциллографического), представлены аналоговыми и цифровыми электронными фазометрами, обеспечивающими измерения в диапазоне от инфразвуковых до высоких частот.

7.2. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА

Простейшими способами измерения фазового сдвига являются измерения по осциллограммам, получаемым на экране электронно-лучевого осциллографа при линейной и синусоидальной развертках. Существует несколько вариантов использования осциллографа.

Способ линейной развертки заключается в том, что напряжения $u_1(t)$ и $u_2(t)$ подаются в каналы вертикального отклонения двухлучевого или двухканального осциллографа. Полезно уравнивать амплитуды обоих напряжений. При этом осциллограмма будет иметь вид, представленный на рис. 7.1. Фазовый сдвиг вычисляют по формуле

$$\varphi = 360^\circ \cdot l / L,$$

где l и L — измеренные на осциллограмме длины отрезков, соответствующие ΔT и T .

При синусоидальной развертке напряжение $u_1(t)$ подается в канал вертикального отклонения, а напряжение $u_2(t)$ — в канал горизонтального отклонения однолучевого осциллографа; внутренний генератор развертки осциллографа при этом выключен. На экране осциллографа появляется фигура Лиссажу в форме эллипса (рис. 7.2).

Сдвиг фаз по фигуре Лиссажу может быть определен двумя способами. Первый способ заключается в измерении отклонения луча по одной из осей координат при условии, что отклонение по другой оси равно нулю. При $x = 0$ вертикальное отклонение луча $Y_{x=0}$; положив $y = 0$, получим отклонение луча по горизонтали $X_{y=0}$. Измерив отрезки $Y_{x=0}$ и Y_m

или $X_{y=0}$ и X_m вычисляют сдвиг $\varphi = \arcsin \frac{Y_{x=0}}{Y_m} = \arcsin \frac{X_{y=0}}{X_m}$.

Способ синусоидальной развертки не позволяет определить фазовый сдвиг однозначно. Когда оси эллипса совпадают с осями координат, фазовый сдвиг φ равен 90° или 270° (см. рис. 4.3). Если большая ось эллипса располагается в первом и третьем квадрантах, то фазовый сдвиг $0 < \varphi < 90^\circ$

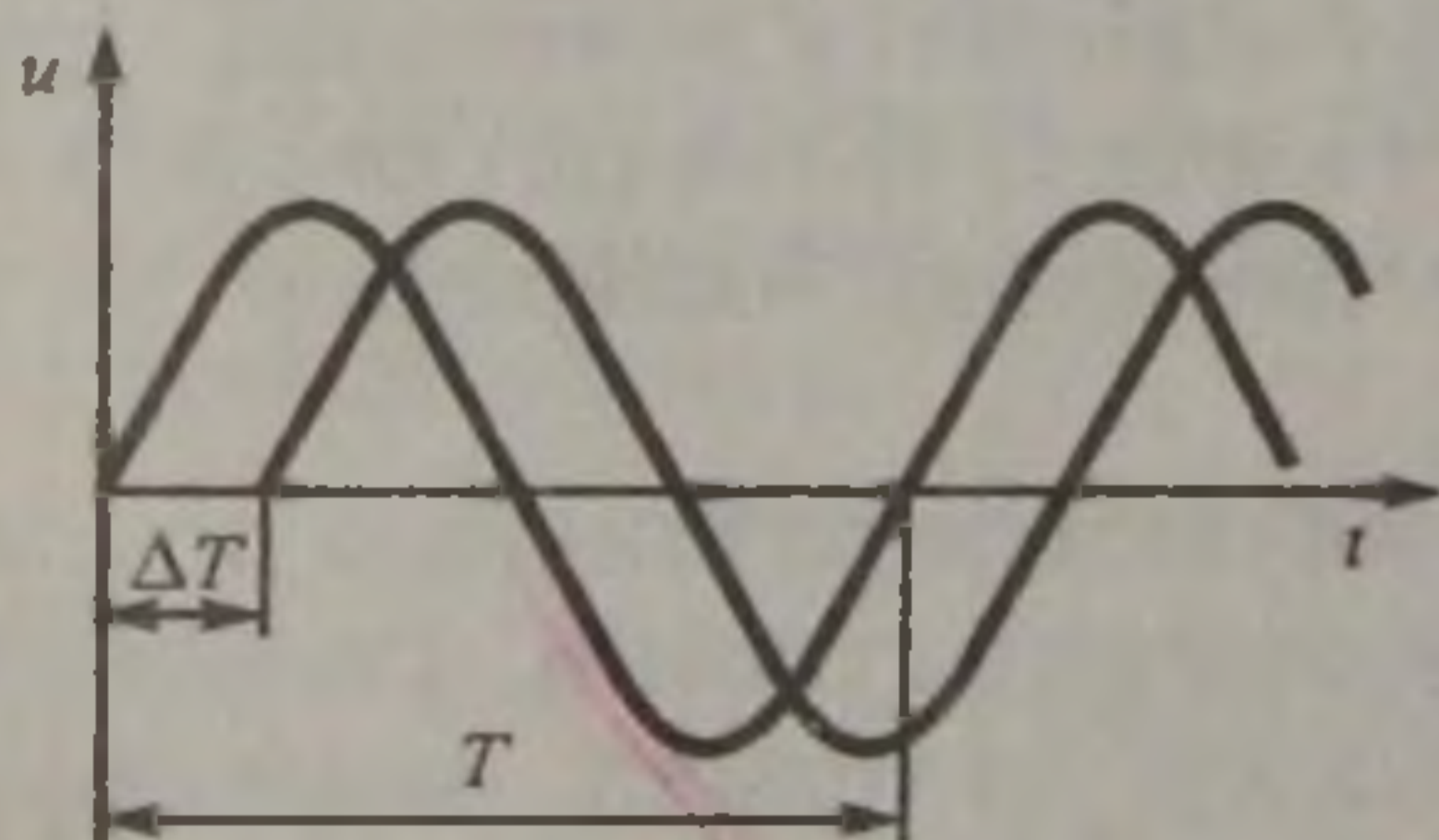


Рис. 7.1. Измерение фазового сдвига способом линейной развертки

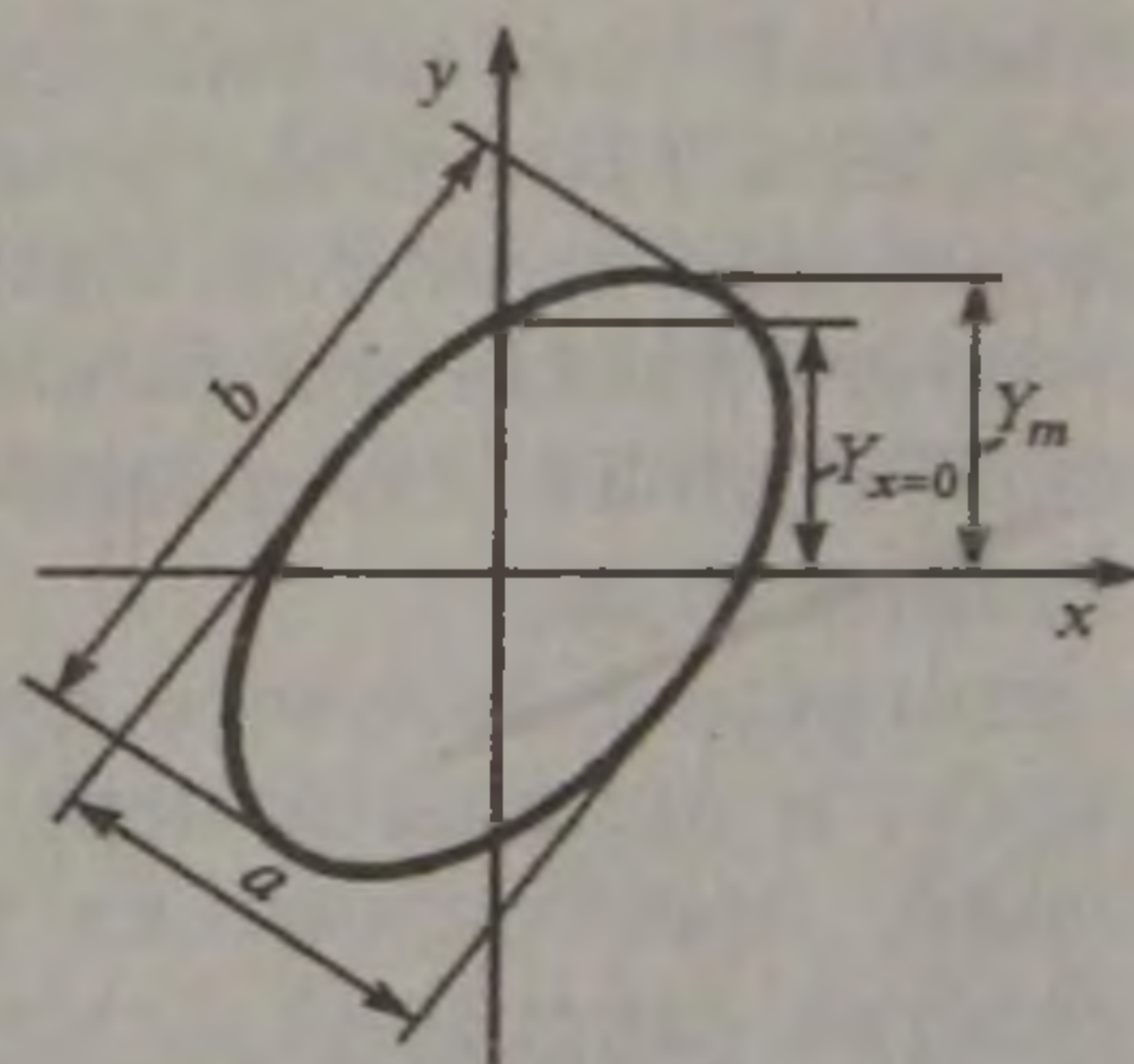


Рис. 7.2. Измерение фазового сдвига по фигуре Лиссажу

или $270^\circ < \varphi < 360^\circ$; если во втором и четвертом, то $90^\circ < \varphi < 180^\circ$ или $180^\circ < \varphi < 270^\circ$. Для определения действительного фазового сдвига в канал вертикального отклонения необходимо ввести дополнительный фазовый сдвиг 90° , тогда по изменению вида осциллограммы можно судить о его значении. Например, получив значение φ , равное 30 или 330° , введем дополнительный сдвиг 90° . Если осциллограмма осталась в прежних квадрантах, то $\varphi = 330^\circ$; если переместилась во второй и четвертый, то $\varphi = 30^\circ$.

Второй способ измерения фазового сдвига по фигуре Лиссажу заключается в измерении большой b и малой a осей эллипса и расчете фазового сдвига по формуле $\varphi = 2 \operatorname{arctg}(a/b)$. Условием правильного определения φ в этом случае является равенство размаха луча по оси X и по оси Y , т.е. предварительно необходимо, регулируя усиление каналов, «вписать эллипс в квадрат».

Погрешность измерения фазового сдвига с использованием осциллограмм составляет $2 \dots 5^\circ$. При этих измерениях существенную роль в формировании погрешности играют амплитудная и фазовая симметрия каналов осциллографа, качество фокусировки электронного луча, нелинейные искажения усилителей, генераторов и самой трубки.

Погрешность измерения фазового сдвига можно значительно снизить, используя осциллограф как сравнивающее устройство и применив для измерения метод полного уравнивания (компенсации). Сущность этого способа измерения заключается в компенсации измеряемого фазового сдвига (или дополнении его до 180°) с помощью градуированного фазовращателя.

Фазовращателем называется средство измерения, предназначенное для воспроизведения сигналов с заданными значениями фазового сдвига.

Простейшими фазовращателями являются дифференцирующие и интегрирующие RC -цепи. Для фазовращателя, представляющего собой дифференцирующую RC -цепь, модуль выходного напряжения U_2 и фазовый угол определяются выражениями

$$U_2 = U_1 \omega RC / \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg}(1/\omega RC);$$

где U_1 — напряжение на входе фазовращателя.

Для фазовращателя, построенного на основе интегрирующей RC цепи,

$$U_2 = U_1 / \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}; \quad \varphi = -\operatorname{arctg} \omega RC.$$

Фазовращатели RC -типа используются для получения фиксированного (обычно 90°) и плавно (в не очень широких пределах) изменяющегося фазового сдвига в области низких частот. Применяются и другие, более сложные, схемы фазовращателей, обеспечивающие широкий диапазон изменения фазы (0 — 360°) и работу на высоких и сверхвысоких частотах.

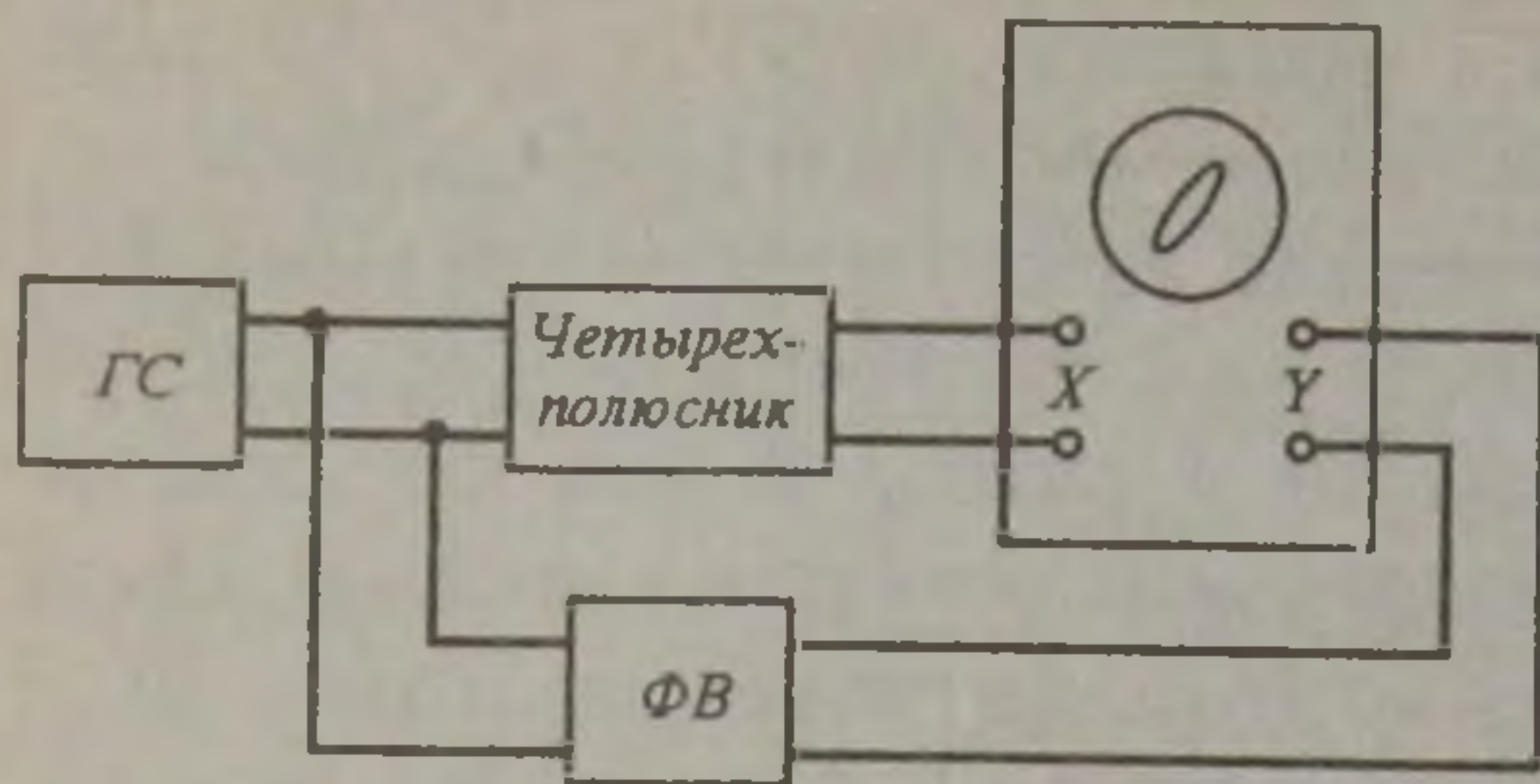


Рис. 7.3. Измерение фазового сдвига методом полного уравнивания

При измерении фазовых сдвигов, вносимых четырех-полюсниками, методом полного уравнивания (компенсации) применяется схема, представленная на рис. 7.3. После включения генератора сигналов ГС и осциллографа на экране появляется изображение эллипса. Фазовращателем ФВ изменяют фазу напряжения, подаваемого на вход осциллографа до тех пор, пока эллипс не преобразуется в прямую. Если прямая наклонена вправо, то фазовый сдвиг между напряжениями, подаваемыми на обе пары пластин осциллографа, равен нулю (см. рис. 4.3).

По шкале фазовращателя отсчитывают внесенный им сдвиг φ_0 . Измеряемый сдвиг — $\varphi = \varphi_0$. Если прямая наклонена влево, то общий фазовый сдвиг равен 180° и, следовательно, $\varphi = 180^\circ - \varphi_0$. Погрешность измерения будет наименьшей, когда наклон прямой к оси равен $45^\circ (135^\circ)$.

Пользуясь осциллографом как устройством сравнения, необходимо иметь в виду, что возможен начальный фазовый сдвиг между каналами вертикального и горизонтального отклонения. Наличие такого сдвига проверяют, подавая одно и то же напряжение на оба входа сразу. При необходимости начальный сдвиг компенсируют с помощью вспомогательного фазовращателя или вносят поправку в результаты измерений. При условии компенсации начального сдвига, погрешность измерения определяется в основном погрешностью фазовращателя. Современные фазовращатели, в зависимости от схемных решений и диапазона частот, обладают погрешностями от долей градуса до нескольких градусов.

7.3. СПОСОБ СУММИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Измерение фазового сдвига способом суммирования напряжений использует правило суммирования векторов гармонических напряжений. Представив напряжения U_1 и U_2 в виде векторов, сдвинутых по фазе на угол φ (рис. 7.4, а) запишем выражение для модуля вектора суммы этих напряжений

$$U_{\Sigma}^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos\varphi,$$

откуда

$$\varphi = \arccos \left(\frac{U_{\Sigma}^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1U_2} \right).$$

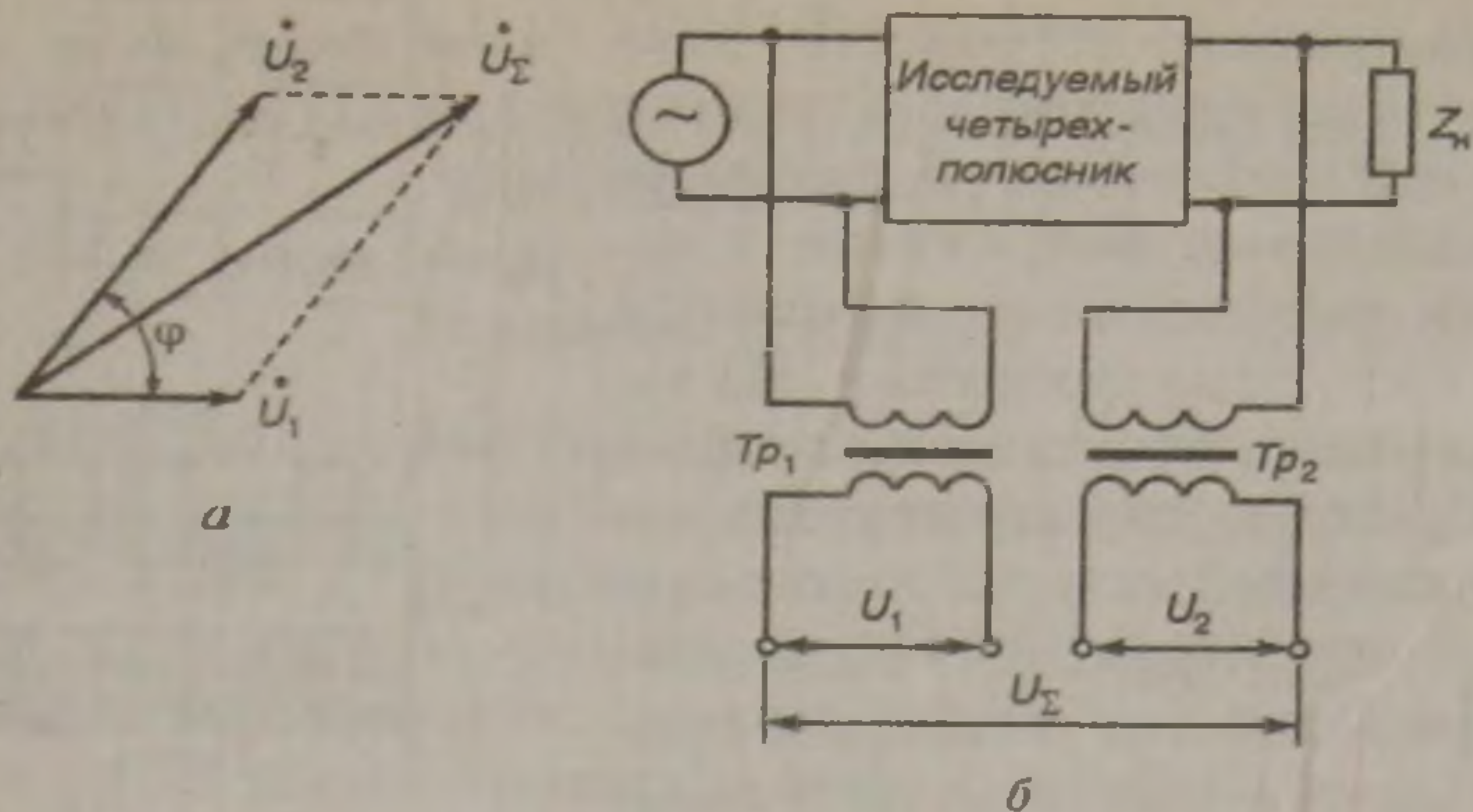


Рис. 7.4. Измерение фазового сдвига способом суммирования напряжений

Таким образом, фазовый сдвиг может быть определен прямым измерением напряжений U_1 , U_2 и U_Σ с помощью обычных вольтметров (рис. 7.4. б). Для упрощения расчетов амплитуды напряжений U_1 и U_2 выравнивают, тогда

$$\varphi = 2 \arccos(U_\Sigma / 2U).$$

Результирующая погрешность измерения фазового сдвига этим способом зависит от класса точности применяемых вольтметров и значения измеряемого фазового сдвига и лежит в пределах от 1 до 10°.

7.4. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ

В основе этого способа лежит преобразование двух синусоидальных напряжений U_1 и U_2 , фазовый сдвиг между которыми требуется измерить, в периодические последовательности коротких импульсов, соответствующих моментам перехода этих напряжений через нуль с производными одинакового знака; т.е. в моменты перехода от минуса к плюсу или наоборот (рис. 7.5). Если одно напряжение опережает другое по фазе на угол φ , то интервал времени ΔT между ближайшими импульсами U_{1k} и U_{2k} пропорционален фазовому сдвигу. Очевидно, что фазовый сдвиг определится по формуле (7.2).

Этот способ преобразования применяется в электронных аналоговых и цифровых фазометрах.

Структурная схема аналогового фазометра приведена на рис. 7.6, а. Двухка-

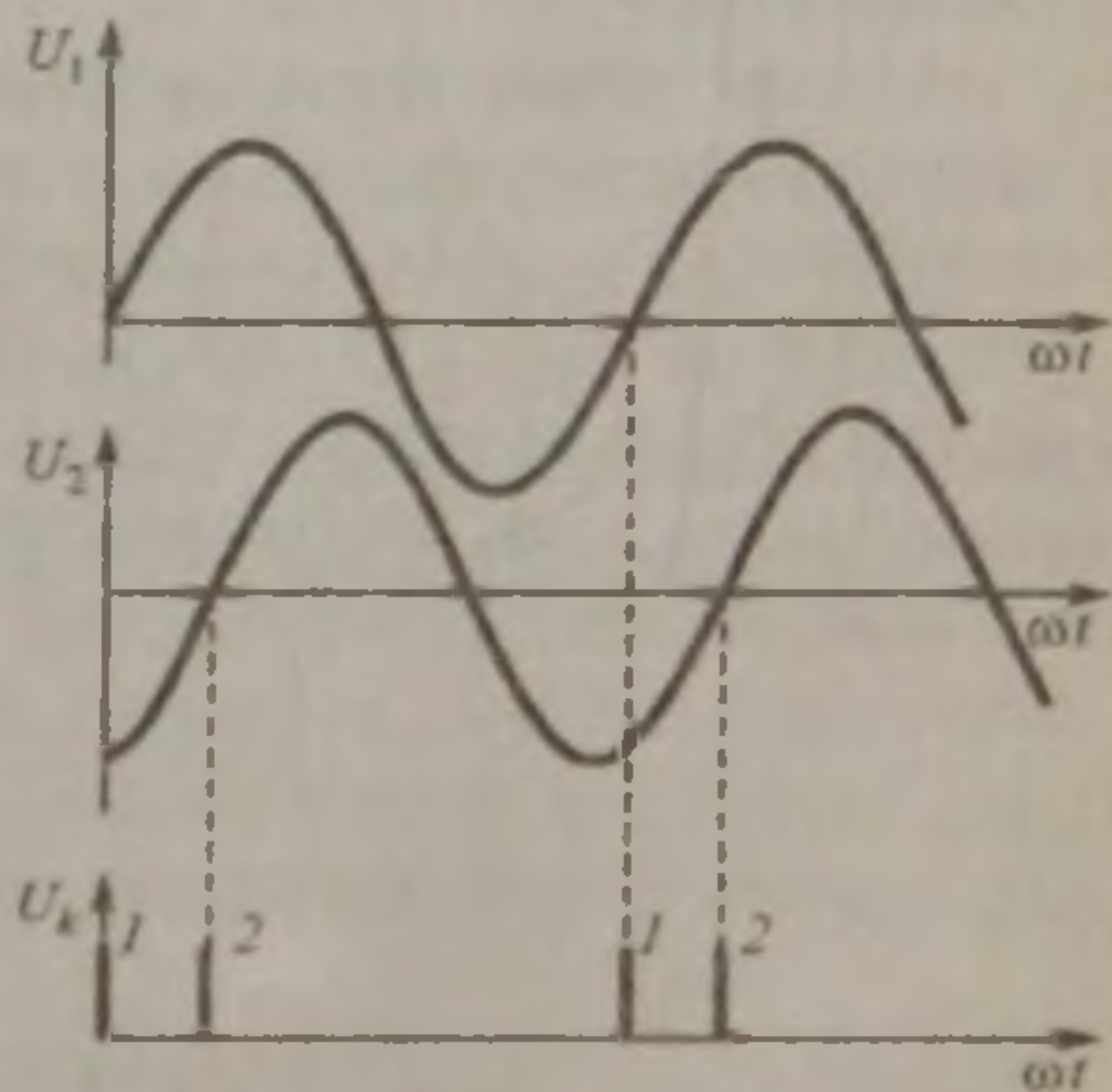


Рис. 7.5. Преобразование фазового сдвига во временной интервал

нальное формирующее устройство, каждый канал которого состоит из входного блока Bx и формирователя Φ , преобразует синусоидальные напряжения в серии коротких импульсов положительной полярности с крутыми фронтами. Из соседних пар импульсов с помощью триггера T_r формируются прямоугольные импульсы длительностью ΔT с постоянным значением напряжения $U_{\text{имп}}$ (рис. 7.6, б). Периодическая последовательность этих прямоугольных импульсов усредняется фильтром нижних частот Φ . Магнитоэлектрический прибор (миллиамперметр), включенный на выходе фильтра, показывает среднее за период значение тока:

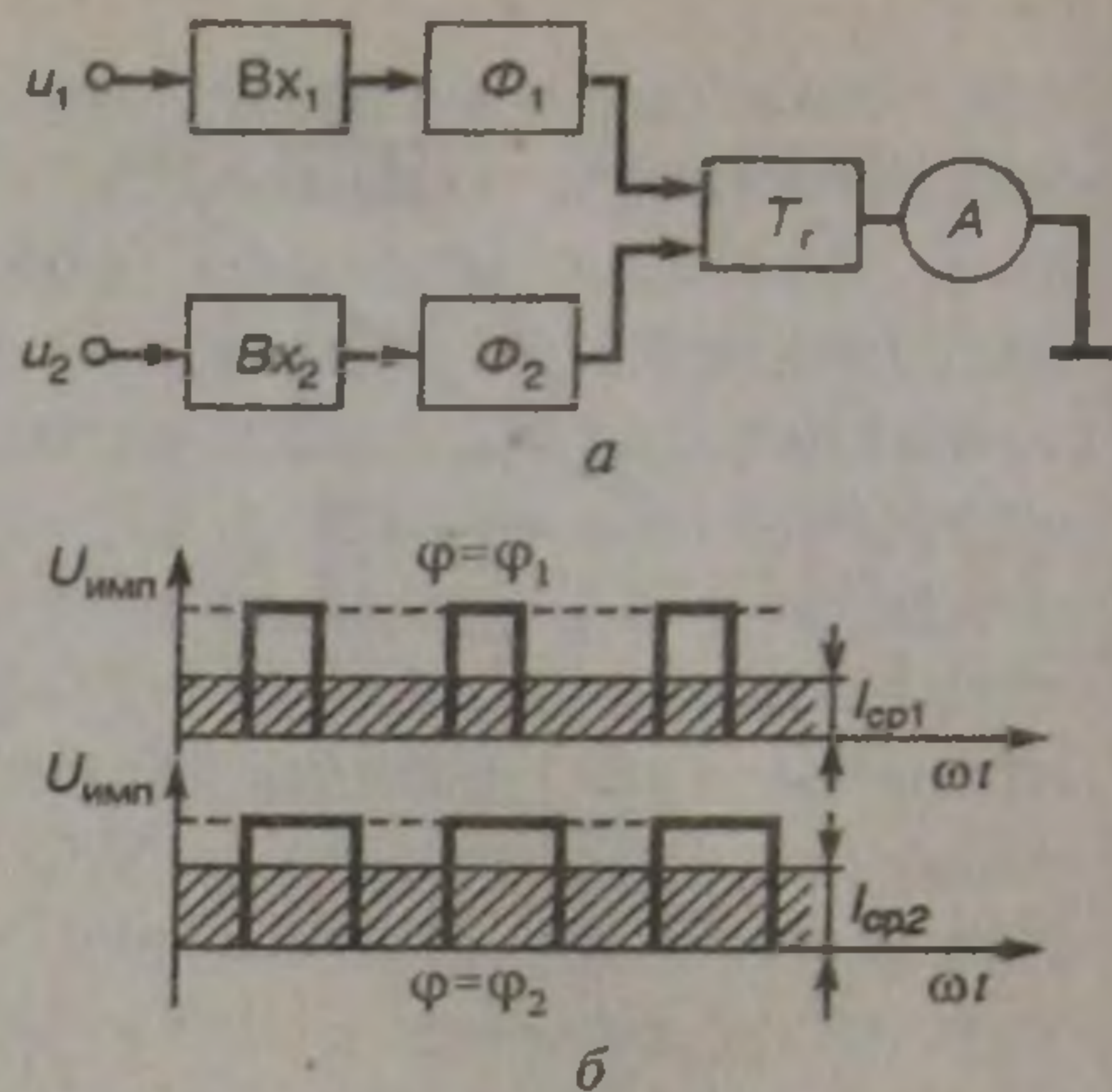


Рис. 7.6. Структурная схема и временные диаграммы аналогового фазометра

$$I_{\text{ср}} = (1/TR_A) \int_0^{\Delta T} U_{\text{имп}} dt = k\varphi, \quad (7.3)$$

где R_A — сопротивление миллиамперметра; k — коэффициент пропорциональности. Роль фильтра может выполнять сам миллиамперметр, обладающий большой инерцией подвижной части. Из (7.3) видно, что зависимость между величинами φ и $I_{\text{ср}}$ линейна. Шкалу миллиамперметра можно проградуировать в единицах фазового сдвига (градусах или радианах). На основе приведенной схемы может быть выполнен фазометр с цифровым отсчетом, если вместо миллиамперметра к выходу фильтра нижних частот подключить цифровой вольтметр.

Аналоговые фазометры позволяют выполнять измерения фазового сдвига в диапазоне частот от 20 Гц до 1 МГц с погрешностью 1,5... 3°.

Для измерения интервала времени ΔT в цифровых фазометрах используется способ дискретного счета, описанный в §3.6. Применение способа дискретного счета позволяет существенно уменьшить погрешность измерения фазового сдвига.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств является одной из важнейших проблем современной техники. Стандарт на термины и определения в области электромагнитной совместимости определяет *электромагнитную совместимость* как способность радиоэлектронных средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех и не создавать недопустимых радиопомех другим радиоэлектронным средствам. *Электромагнитной помехой* называют нежелательное воздействие электромагнитной энергии, которое ухудшает, либо может ухудшить, показатели качества функционирования аппаратуры. Электромагнитная помеха в полосе радиочастот называется *радиопомехой*.

В зависимости от источника возникновения, различают радиопомехи естественного происхождения, индустриальные радиопомехи и радиопомехи от излучения радиоэлектронных средств. Естественные радиопомехи образуются в результате теплового излучения Земли, ее атмосферы, а также в результате галактических или солнечных излучений. Естественные радиопомехи возникают при грозах, магнитных возмущениях ионосферы и других явлениях.

К индустриальным помехам относятся излучения, возникающие при работе электротехнических устройств, высокочастотных установок, систем зажигания транспортных средств, электронно-вычислительных машин. К индустриальным радиопомехам относят также излучения от внутренних частей и блоков радиоэлектронных и других устройств: генераторов строчной развертки, импульсных блоков питания и т.п.

Наиболее распространенными радиопомехами, с которыми приходится встречаться при решении вопросов электромагнитной совместимости, являются излучения передающих устройств. По интенсивности воздействия на радиоэлектронные средства помехи подразделяют на допустимые и недопустимые. Нормативная документация на уровне международных и государственных стандартов регламентирует нормы на различные параметры, характеризующие как помехозащищенность радиоэлектронной и иной электронной аппаратуры от внешних помех, так и на параметры, характеризующие помехи со стороны аппаратуры работе других технических средств.

Нормативной документацией также регламентированы методы измерения параметров при испытаниях и эксплуатации радиоэлектронных и электронных средств и устройств.

Комплекс измерительных задач, возникающих при решении проблемы электромагнитной совместимости, достаточно широк. В него входят: измерение спектральных параметров излучений, измерения параметров и характеристик побочных излучений радиопередающих устройств; напряженности электромагнитного поля; частоты и стабильности частоты; диаграмм направленности антенн, измерения уровней помех различного происхождения и др. При этом, однако, перечень основных измеряемых электрических величин невелик. Это частота, напряжение, ток, мощность, общие принципы и методы измерения которых рассмотрены в предыдущих главах (кроме измерения мощности). Одно из главных мест при измерении электромагнитной совместимости занимает измерение напряженности электромагнитного поля.

8.2. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Электромагнитные волны, излучаемые антенной передатчика, помехи, излучаемые аппаратурой и другими источниками и распространяющиеся земным лучом, на достаточно большом расстоянии от источника можно рассматривать в первом приближении как плоские волны, поляризованные в вертикальной плоскости. Электромагнитное поле плоской волны характеризуется системой трех взаимно перпендикулярных векторов \vec{E} , \vec{H} , \vec{P} (рис. 8.1), где \vec{E} — вектор напряженности электрического поля; \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля; \vec{P} — вектор плотности потока мощности (вектор Пойнтинга), указывающий направление распространения электромагнитных волн. Численные значения этих векторов однозначно связаны между собой соотношениями $\vec{E} / \vec{H} = 120\pi$; $\vec{P} = \vec{E} \cdot \vec{H}$.

Следовательно, при измерениях напряженности электромагнитного поля достаточно измерить только одно из значений — \vec{E} , \vec{H} или \vec{P} .

Напряженность электромагнитного поля принято оценивать по величине вектора электрического поля \vec{E} и измерять его в вольтах на метр (мВ/м, мкВ/м). В диапазоне сантиметровых волн напряженность поля более удобно определять по плотности потока мощности и измерять в ваттах на квадратный метр (Вт/м²).

Методы измерения напряженности поля зависят от величины измеряемого поля. Для измерения напряженности сильных полей используется метод непосредственной оценки, т.е. прямого измерения ЭДС, индуцированной в приемной антенне. Напряженность слабых электромагнитных полей измеряется методом сравнения ЭДС, индуцированной измеряемым полем в приемной антенне с напряжением той же частоты, вводимым в антенну от калибровочного генератора сигналов.

В комплект приборов для измерения напряженности поля входят специальные измерительные антенны. При измерениях на частотах ниже 30 МГц применяют рамочную (одновитковую или многовитковую) или штыре-

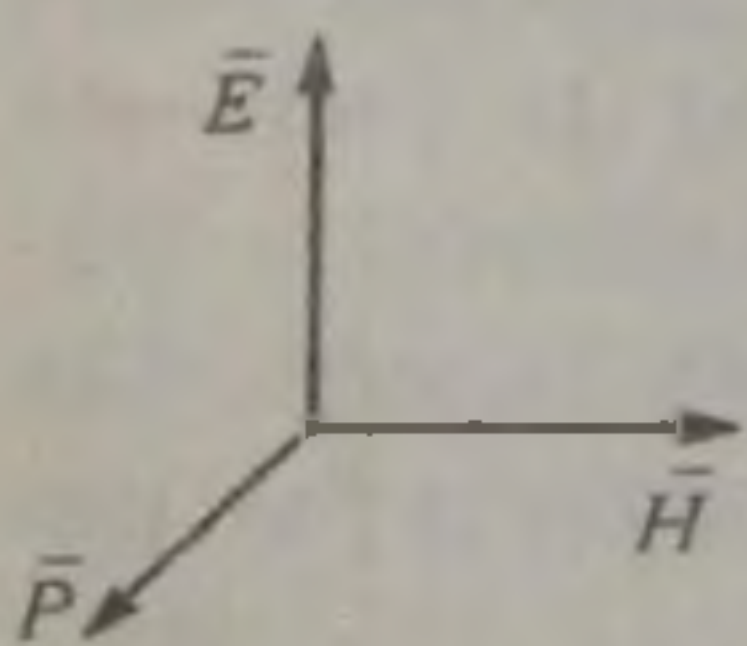


Рис. 8.1. Электромагнитное поле плоской волны

вую антенну. В полосе частот от 30 до 300 МГц используют антенну в виде симметричного полуволнового диполя, а на частотах свыше 300 МГц — рупорные антенны.

В общем случае ЭДС e , индуцированная в антенне полем напряженностью E , определяется равенством

$$e = E h_g, \quad (8.1)$$

где h_g — действующая высота антенны.

Значение h_g определяется расчетным путем для любого типа антенны. Для рамочной антенны, состоящей из w витков, действующая высота рассчитывается по формуле

$$h_g = \frac{2\pi Sw}{\lambda},$$

где S — площадь рамки; λ — длина волны электромагнитного поля.

Тогда ЭДС, индуцированная в рамке измеряемым полем,

$$e = \frac{2\pi Sw}{\lambda} E \cos\varphi,$$

где φ — угол между плоскостью рамки и направлением распространения электромагнитной волны.

Для штыревой антенны длиной l ,

$$h_g = l/2.$$

Для полуволнового вибратора

$$h_g = \lambda/\pi.$$

При измерении напряженности поля методом непосредственной оценки (рис. 8.2), рамочную антенну располагают в измеряемом поле, настраивают антенный контур, образованный рамкой и конденсатором переменной емкости, в резонанс с частотой измеряемых колебаний и ориентируют антенну так, чтобы получить на выходе антенны максимальный сигнал ($\varphi = 90^\circ$). Для обеспечения возможности ориентации антенны она закрепляется на специальном координатном устройстве, которое позволяет осуществлять ее поворот и изменять высоту подъема в требуемых пределах с заданной точностью.

Измерение ЭДС, индуцированной в антенне, производится либо высокочувствительным вольтметром с высокоомным входом, либо посредством измерительных приемников с калиброванным усилением, снабженных вольтметром на выходе приемника.



Рис. 8.2. Измерение напряженности поля методом непосредственной оценки

При резонансе, измеренное вольтметром напряжение на конденсаторе C

$$U_C = Eh_g Q,$$

откуда

$$E = U_C / h_g Q,$$

где Q — добротность антенного контура, определяемая расчетно или экспериментально.

Если напряженность электрического поля рассчитывается по напряжению $U_{\text{вых}}$, измеренному на выходе измерительного приемника, коэффициент усиления которого K , то

$$E = U_{\text{вых}} / Kh_g.$$

Если необходимо измерить плотность потока мощности, то применяют антенну с известной эффективной площадью $S_{\text{эф}}$ и измеритель мощности. Плотность потока мощности Π определяют по измеренной на выходе измерительной антенны мощности $P_{\text{вых}}$:

$$\Pi = P_{\text{вых}} / S_{\text{эф}}.$$

Эффективную площадь антенны рассчитывают по формуле

$$S_{\text{эф}} = 30\pi h_g^2 / R_A,$$

где R_A — входное сопротивление антенны.

Измерение напряженности слабых полей методом сравнения производится в соответствии со схемой рис. 8.3. Индуцированная в антенном контуре ЭДС e поступает на вход измерительного приемника и вызывает некоторое показание вольтметра. Приемник и контур настраиваются на частоту источника излучения и поворачивая рамку, добиваются максимума показания вольтметра U_B . Затем рамка поворачивается на 90° и включается калибровочный генератор, вводящий через аттенюатор в рамку напряжение той же частоты. Напряжение, вводимое генератором в антенный контур

$$U_\Gamma = IR / \alpha, \quad (8.2)$$

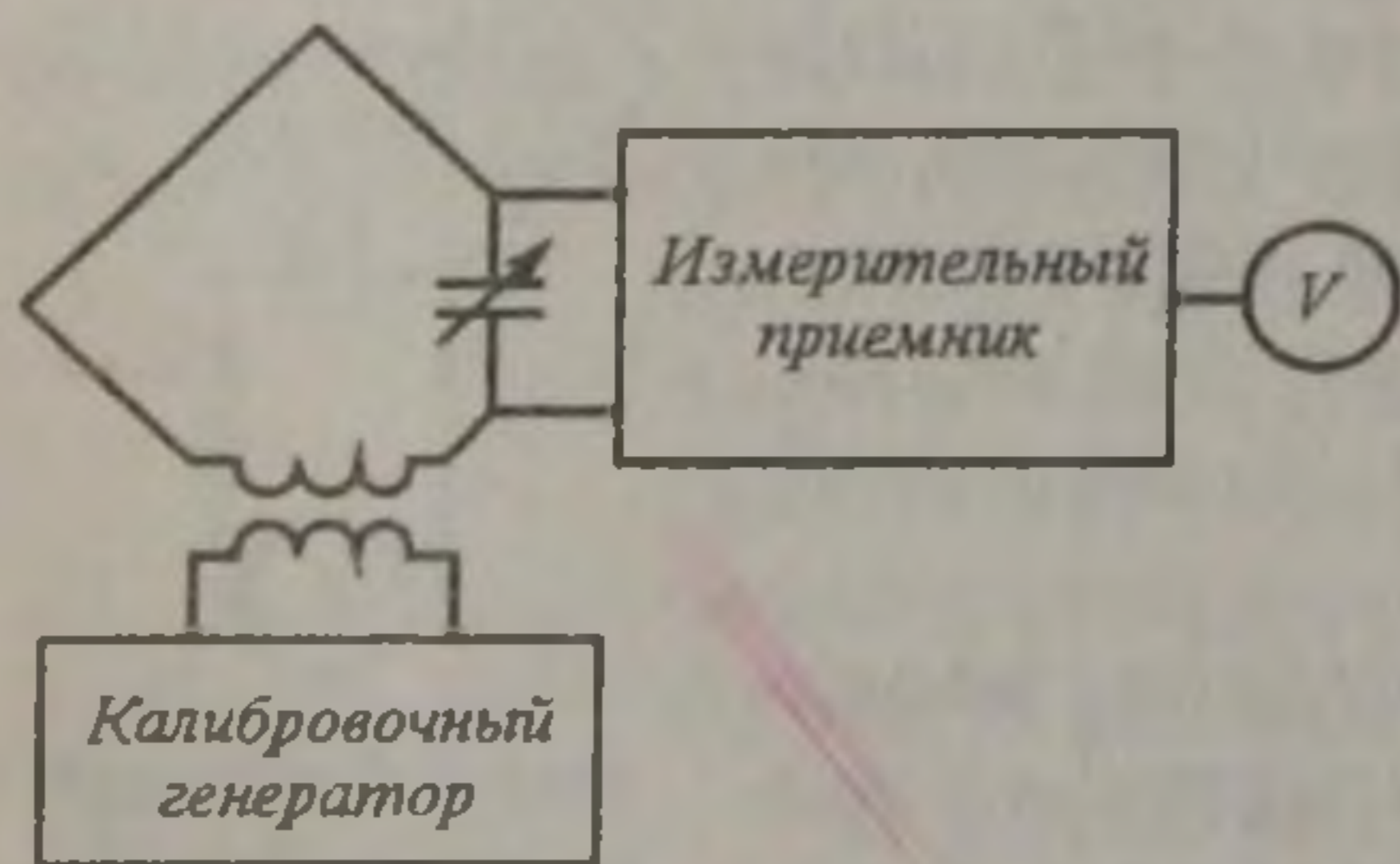


Рис. 8.3. Измерение напряженности поля методом сравнения

где R — входное сопротивление аттенюатора; α — коэффициент ослабления аттенюатора; I — ток на входе аттенюатора, измеряемый термоэлектрическим прибором. Напряжение U_Γ регулируется аттенюатором так, чтобы показание вольтметра U_B стало таким же, как и при первом измерении: равенство показаний означает, что $U_\Gamma = U_B = e$.

Приравняв (8.2) и (8.1) получим

$$E = IR/\alpha h_z$$

Измерение параметров промышленных радиопомех производится методами и средствами, аналогичными методам и средствам измерения напряженности радиопомех от излучения радиоэлектронных средств. Различие заключается лишь в том, что промышленные радиопомехи имеют в большинстве случаев хаотический импульсный характер и, следовательно, в измерительном приемнике должна быть предусмотрена возможность некоторой интегральной оценки, позволяющей охарактеризовать их мешающее воздействие. Это достигается с помощью детектирования напряжения помехи, для чего в измерителях радиопомех предусмотрены детекторы среднего, среднего квадратического и пикового значений.

8.3. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ РАДИОПОМЕХ

На переменном токе различают активную мощность P_a , т.е. мощность, поглощенную в нагрузке, и реактивную мощность P_p :

$$P_a = UI \cos\varphi;$$

$$P_p = UI \sin\varphi,$$

где U, I — среднее квадратическое значение напряжения и тока; φ — фазовый сдвиг между напряжением и током.

Активная мощность представляет собой энергию, которая выделяется в единицу времени на сопротивлении нагрузки R . В практике измерения мощности электромагнитного поля пользуются понятием среднего значения активной мощности, т.е.

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T mP(t) dt,$$

где T — период усреднения; $P(t)$ — мгновенное значение мощности.

Приборы для измерения мощности называются ваттметрами. Особенностью измерений мощности на высоких частотах является то, что при определенных условиях в тракте передачи, соединяющем источник мощности с нагрузкой, могут одновременно существовать падающая волна, характеризующаяся падающей мощностью $P_{\text{пад}}$ и отраженная волна, характеризующаяся отраженной мощностью $P_{\text{отр}}$. Падающая волна распространяется от источника к нагрузке, отраженная — от нагрузки к источнику. Поступающую в нагрузку мощность определяют по разности мощностей падающей и отраженной волн и называют ее проходящей мощностью (рис. 8.4, а)

$$P_{\text{прох}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}} = P_{\text{погл.}} \quad (8.3)$$

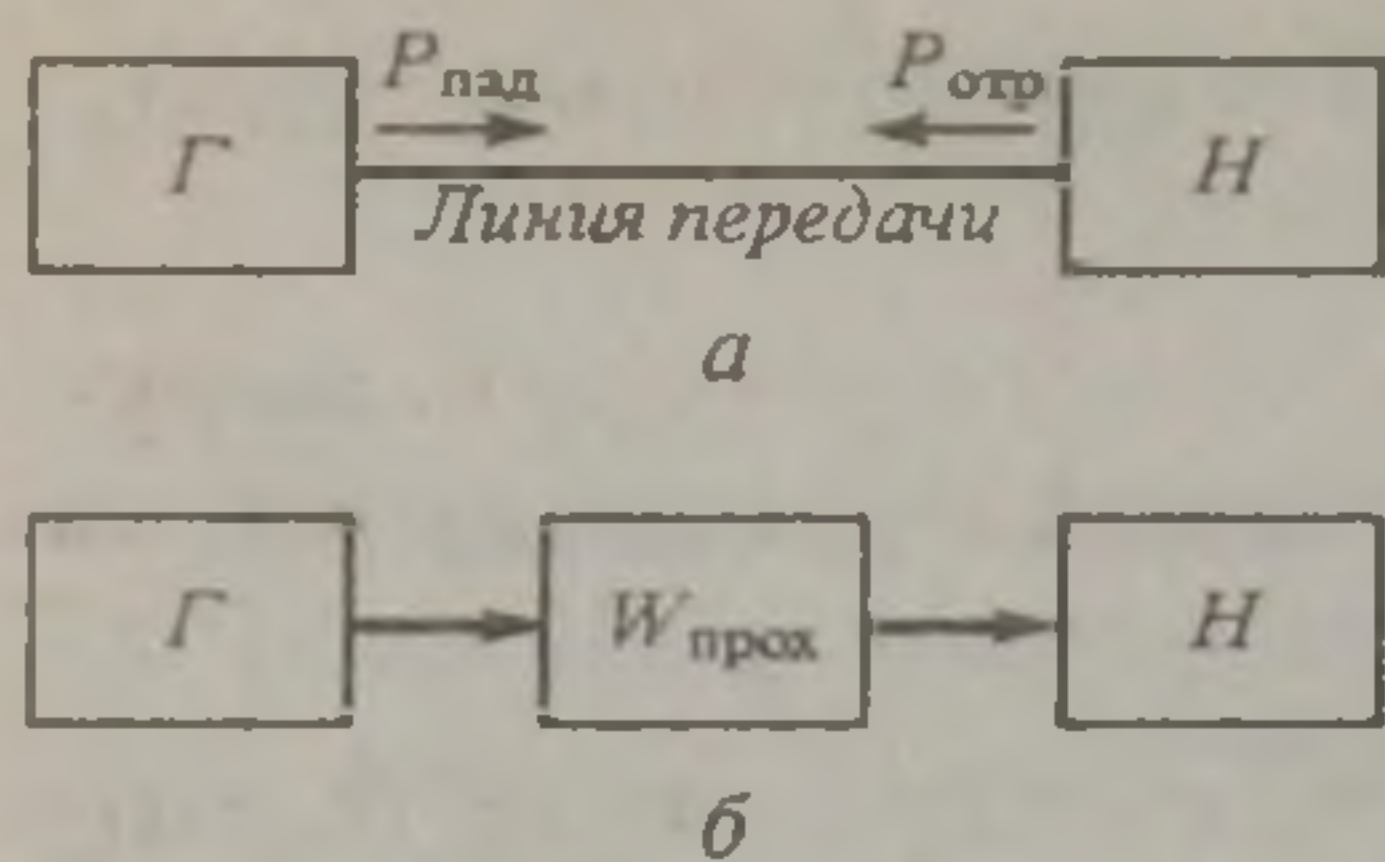


Рис. 8.4. Тракт передачи мощности

Принципы измерения мощности излучения в области высоких и сверхвысоких частот основаны на преобразовании энергии электромагнитного поля в другой, более удобный для измерения вид энергии с помощью соответствующих измерительных преобразователей.

По роду используемых измерительных преобразователей ваттметры подразделяются на тепловые, пондеромоторные и электронные.

В зависимости от способа включения в тракт ваттметры измеряют падающую, отраженную или поглощенную мощность. Ваттметры проходящей мощности ($W_{\text{прох}}$) позволяют измерять мощность, проходящую к нагрузке, в реальных условиях эксплуатации систем. В этом заключается их несомненное преимущество (рис. 8.4, б). Ваттметры поглощаемой мощности включают в тракт вместо реальных нагрузок. Поэтому они не позволяют измерять мощность в реальных условиях работы систем, так как полное сопротивление ваттметра в общем случае всегда отличается от полного сопротивления нагрузки, вследствие чего возникает так называемая погрешность рассогласования. Однако в связи с большей простотой схемных решений и методик измерения, ваттметры поглощаемой мощности получили более широкое распространение.

По значению верхнего предела измеряемой мощности различают ваттметры малой — до 10 мВт, средней — до 10 Вт и большой — свыше 10 Вт, мощности. Наиболее распространены ваттметры с тепловыми измерительными преобразователями. Общим для различных типов тепловых преобразователей является наличие некоего рабочего тела, которое при воздействии на него электромагнитного поля нагревается за счет поглощения мощности излучения. При этом перегрев рабочего тела над температурой окружающей среды θ является функцией поглощенной мощности $P_{\text{погл}}$. Отсюда следует, что, измерив перегрев рабочего тела и имея зависимость $\theta(P_{\text{погл}})$, можно определить $P_{\text{погл}}$. В качестве рабочего тела в тепловых преобразователях мощности используются температурозависимые резисторы, термопары, объемы воды (калориметры). Для технических измерений чаще используются измерительные преобразователи с температурозависимыми резисторами: болометрами или термисторами. Ваттметры на основе болометров и термисторов обеспечивают измерения малых уровней мощности (от 100 мВт и ниже).

Болометрами называются терморезисторы, выполненные в виде тонкой (1...10 мкм) проволоочки или пленки из чистого металла (платины, вольфрама). Зависимость сопротивления болометра от температуры описывается известной формулой

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (8.4)$$

где R_0 — сопротивление болометра при 0°C ; α — температурный коэффициент сопротивления металла; t — температура.

С учетом (8.4) перегрев болометра на θ° над температурой окружающей среды приводит к приращению его сопротивления на $\Delta R = R_0\alpha\theta$, которое может быть измерено.

Термисторы (гл. 9) представляют собой полупроводниковые терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Термисторы для измерения мощности изготавливают из смеси окислов различных металлов в виде миниатюрных бусинок диаметром $0,2 \dots 0,5$ мм, снабженных тончайшими проволочными выводами. Зависимость сопротивления термисторов от температуры нелинейна. Температурный коэффициент сопротивления термистора зависит от температуры; в пределах рабочего диапазона температур он на порядок выше, чем у болометра, что обеспечивает большую чувствительность термисторного ваттметра.

Для удобства монтажа в тракт передачи мощности и обеспечения требуемого режима измерения мощности терморезисторы монтируются в специальные конструктивные элементы (коаксиальные и волноводные вставки). Измерение сопротивления терморезистора чаще всего производится с помощью мостовых схем. Упрощенная схема терморезисторного моста постоянного тока приведена на рис. 8.5. Терморезистор R_4 включен в одно из плеч моста. Сопротивление резистора R_3 устанавливается примерно равным сопротивлению R_4 . Сопротивления плеч $R_1 = R_2$. Измерение поглощаемой мощности производится в два этапа. Вначале, не подавая на вход ваттметра мощность, уравнивают мост подбором сопротивления R_3 и вольтметром с высоким входным сопротивлением измеряют напряжение U_1 на резисторе R_3 . Поскольку при равновесии $R_3 = R_4$, то мощность, рассеиваемая резистором

$$P_1 = U_1^2 / R_4. \quad (8.5)$$

Затем на вход моста подают измеряемую мощность $P_{\text{вч}}$, в результате чего происходит нагрев терморезистора R_4 . Регулировкой (уменьшением) напряжения питания моста вновь уравнивают мост и измеряют напряжение U_2 на резисторе R_3 . При этом суммарная мощность, поглощаемая терморезистором:

$$P_{\text{вч}} + P_2 = P_{\text{вч}} + U_2^2 / R_4. \quad (8.6)$$

Поскольку и в первом, и во втором случаях мост уравновешен, то приравняв (8.5) и (8.6) получим

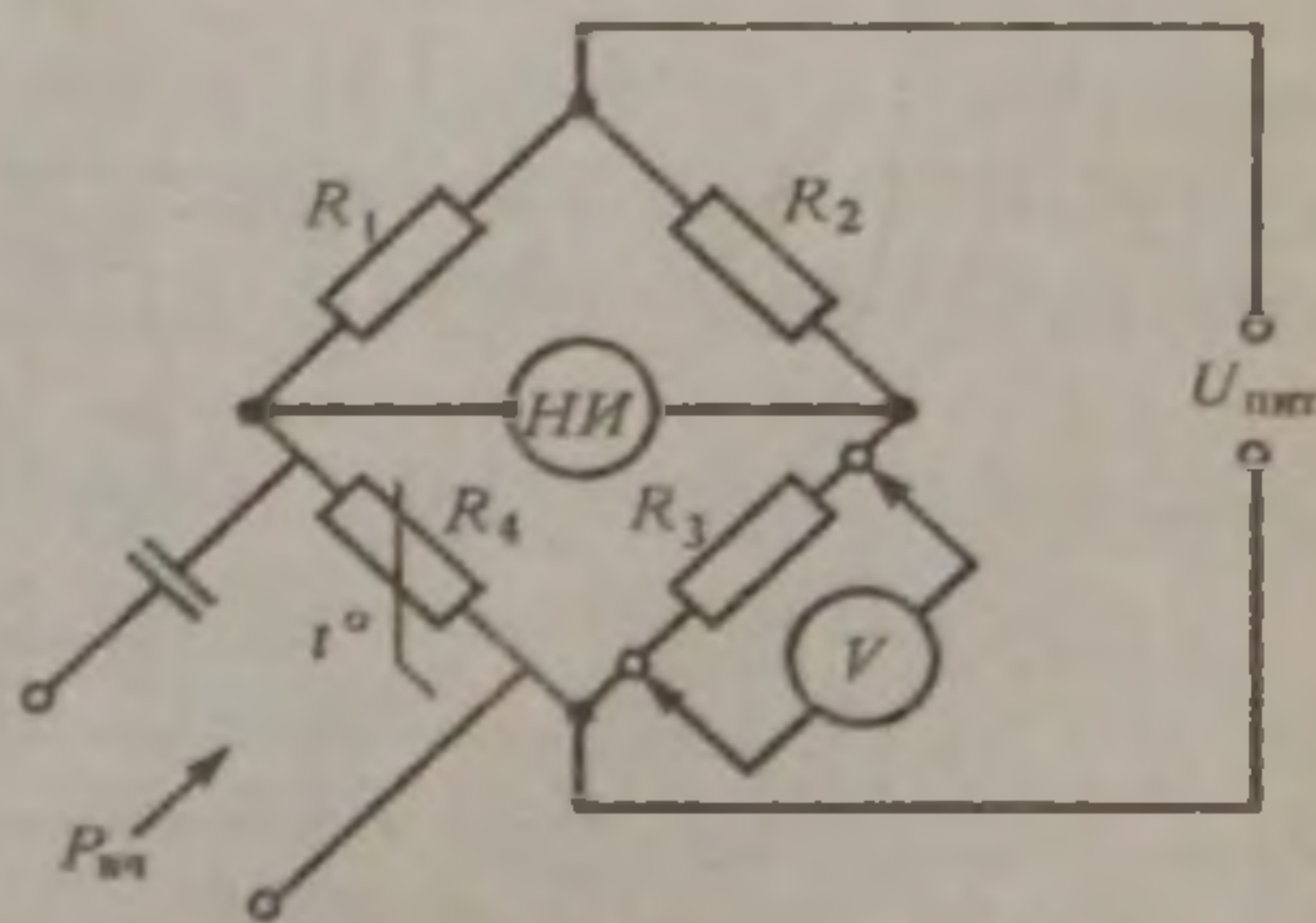


Рис. 8.5. Схема терморезисторного моста для измерения мощности

$$P_{вч} = (U_1^2 - U_2^2) / R_4.$$

В ваттметрах, выпускаемых промышленностью, обычно применяются мостовые схемы с автоматическим уравниванием, что упрощает процедуру измерения. Достоинствами терморезисторных ваттметров является широкий диапазон частот (0,03...100 ГГц) и относительная простота схемных решений. Пределы допускаемых погрешностей таких ваттметров 2,5...25%. К недостаткам можно отнести возможность измерения только малых уровней мощности, малую перегрузочную способность болометров и термисторов и невысокую стабильность их сопротивления.

8.4. ВАТТМЕТРЫ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ

Для измерения проходящей мощности наибольшее распространение получили ваттметры на основе направленных ответвителей. *Направленным ответвителем* называется устройство, позволяющее ответвлять часть проходящей в основном тракте мощности падающей и отраженной волн в боковой канал. При этом падающая волна ответвляется в одно плечо канала, а отраженная — в другое. На рис. 8.6 штриховыми линиями показан путь распространения падающей волны мощности. К выходу правого плеча бокового канала ответвителя подключен ваттметр поглощаемой мощности *ВПМ*, фиксирующий мощность $P_{пад}$, являющуюся частью падающей в основном канале мощности. К выходу левого плеча бокового канала ответвителя подключен ваттметр *ВОМ*, фиксирующий часть отраженной мощности. Выходные сигналы ваттметров поступают в отсчетное устройство *ОУ*, осуществляющее вычитание сигналов в соответствии с (8.3). Таким образом, показания *ОУ* соответствуют проходящей мощности.

Достоинствами ваттметров на основе направленных ответвителей являются широкие пределы измеряемой мощности $10^{-4}...10^5$ Вт; возможность раздельного измерения падающей, отраженной и проходящей мощности. Диапазон частот таких ваттметров 0,03...40 ГГц, пределы допускаемых погрешностей 2,5...25%.

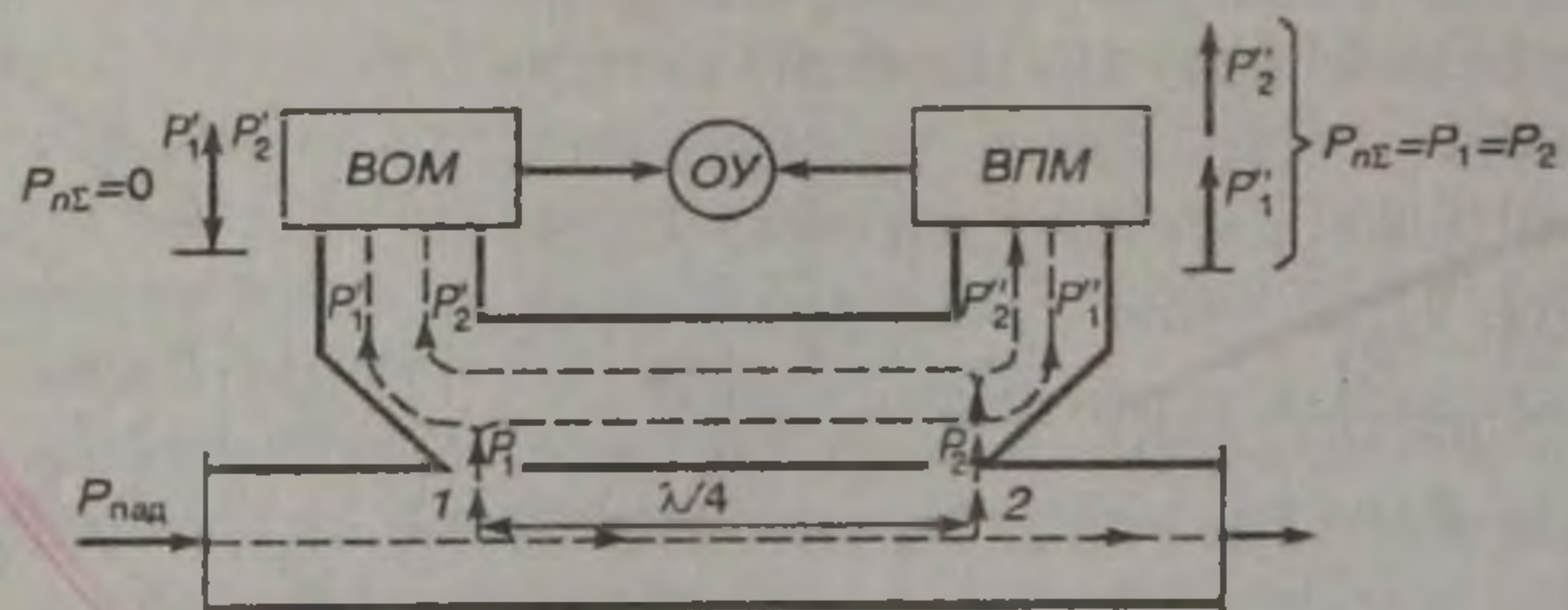


Рис. 8.6. Схема ваттметра проходящей мощности на направленном ответвителе

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Среди множества физических величин большая часть относится к неэлектрическим (температура, влажность, скорость, ускорение, перемещение и т.д.). При измерениях таких величин часто возникают задачи дистанционного измерения, передачи, регистрации и обработки измерительной информации. Наилучшим образом эти задачи решаются путем преобразования измеряемой неэлектрической величины $X_{нэ}$ в электрический сигнал $X_э$, связанный с измеряемой величиной однозначной функциональной зависимостью $X_э = f(X_{нэ})$. Полученный электрический сигнал измеряется средствами электрических измерений или может быть передан по линии связи на значительное расстояние.

Преобразование неэлектрической величины в электрическую осуществляется с помощью измерительных преобразователей ИП — датчиков (рис. 9.1). Структурная схема любого средства измерения неэлектрических величин электрическими методами содержит такой измерительный преобразователь.

Измерительные преобразователи классифицируют по роду измеряемой величины (температуры, давления, влажности и др.) и по выходной величине (генераторные, параметрические).

Выходным сигналом *генераторных датчиков* является ЭДС, напряжение, ток или электрический заряд, функционально связанные с измеряемой величиной. В *параметрических преобразователях* выходной величиной является изменение параметра электрической цепи (R , L , C).

Важнейшими метрологическими характеристиками измерительных преобразователей являются: номинальная статическая характеристика преобразования, чувствительность, основная и дополнительные погрешности, динамические характеристики и др.

Промышленностью выпускаются как отдельные измерительные преобразователи неэлектрических величин, так и приборы для измерения неэлектрических величин, неотъемлемой частью которых является соответствующий датчик.

Поскольку средства электрических измерений, применяемые при измерениях неэлектрических величин, имеют, как правило, несравненно лучшие метрологические характеристики по сравнению с датчиками неэлектрических величин, то основной вклад в погрешность результата измерения вносится составляющей, обусловленной погрешностью датчика. Это необхо-

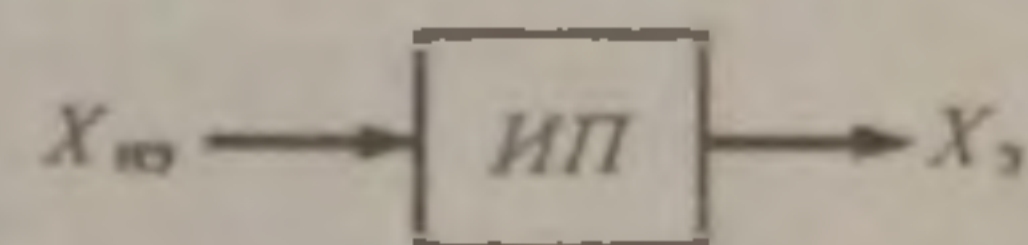


Рис. 9.1. Структурная схема преобразования неэлектрических величин

димо иметь в виду при выборе датчиков неэлектрических величин для решения конкретной измерительной задачи.

Рассмотрим принципы действия и устройство некоторых преобразователей неэлектрических величин.

9.2. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Термоэлектрические преобразователи (термопары). Эти преобразователи применяются для измерения температуры. Принцип действия термопары поясняется рис. 9.2, а, где изображена термоэлектрическая цепь, составленная из двух разнородных проводников *A* и *B*. Точки 1 и 2 соединения проводников называются спаями термопары. Если температуры *t* спаев 1 и 2 одинаковы, то ток в термоэлектрической цепи отсутствует. Если же температура одного из спаев (например, спая 1) выше, чем температура спая 2, то в цепи возникает термоэлектродвижущая сила (ТЭДС) *E*, зависящая от разности температур спаев

$$E = f(t_1 - t_2). \quad (9.1)$$

Если поддерживать температуру спая 2 постоянной, то

$$E = f(t_1). \quad (9.2)$$

Эту зависимость используют для измерения температуры с помощью термопар. Для измерения ТЭДС электроизмерительный прибор включают в разрыв спая 2 (рис. 9.2, б). Спай 1 называют горячим (рабочим)

спаем, а спай 2 — холодным (концы — 2 и 2' называют свободными концами).

Чтобы ТЭДС термопары однозначно определялась температурой горячего спая, необходимо температуру холодного спая поддерживать всегда одинаковой.

Для изготовления электродов термопар используют как чистые металлы, так и специальные сплавы стандартизованного состава. Градуировочные таблицы для стандартных термопар составлены при условии равенства температуры свободных концов 0°C. На практике не всегда удается поддерживать эту температуру. В таких случаях в показания термопары вводят поправку на температуру свободных концов. Существуют схемы для автоматического введения поправок.

Конструктивно термопары выполняются в виде двух изолированных термоэлектродов с рабочим спаем, получаемым способом сварки,

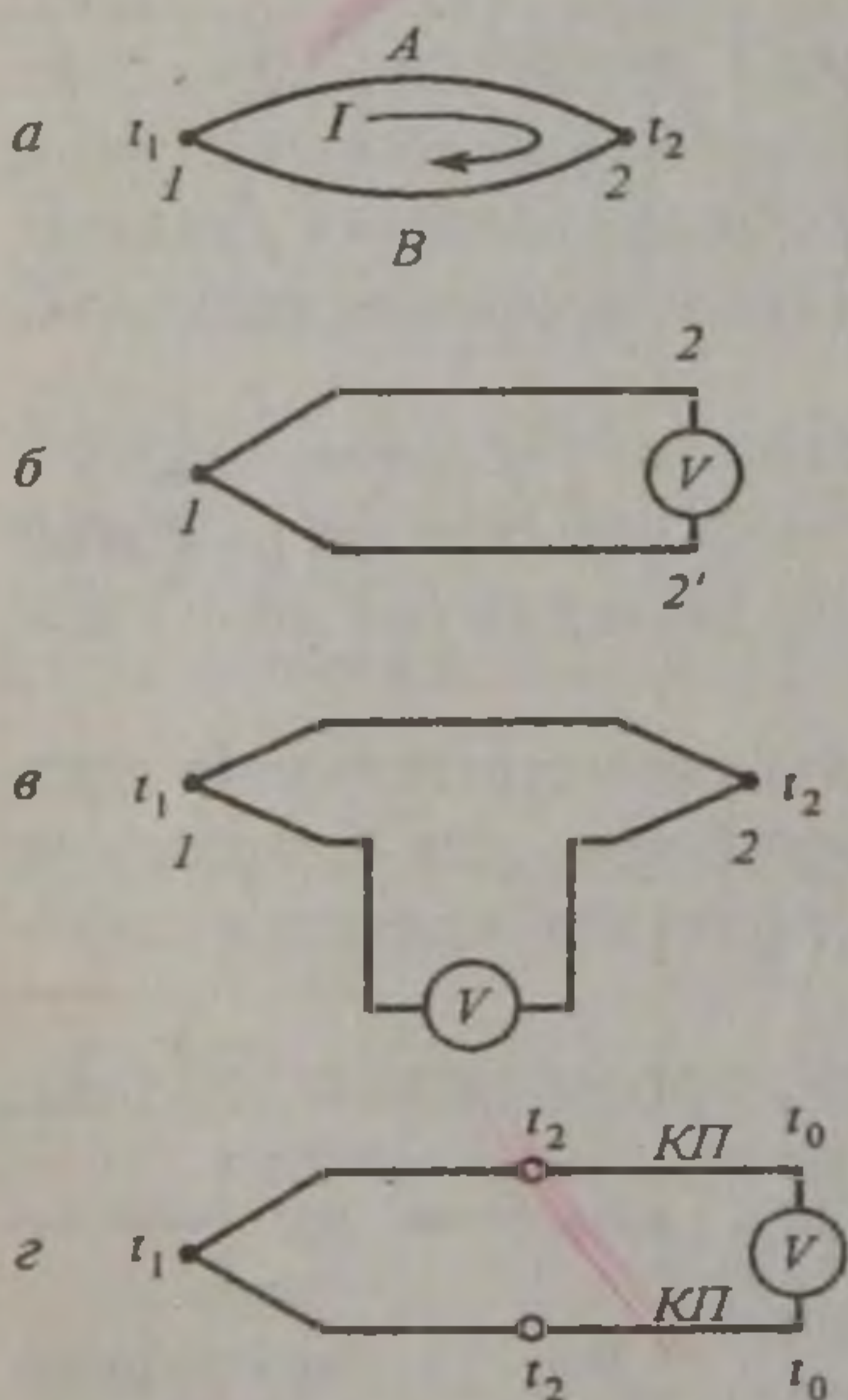


Рис. 9.2. Термоэлектрические цепи

помещенных в защитную арматуру, предохраняющую термопару от внешних воздействий и повреждений. Рабочие концы термопары выведены в головку термопары, снабженную зажимами для включения термопары в электрическую цепь.

В табл. 9.1 приведены характеристики термопар, выпускаемых промышленностью. Для измерения высоких температур применяют термопары ПП, ПР и ВР. Термопары из благородных металлов используют при измерении с повышенной точностью.

В зависимости от конструкции термопары могут иметь тепловую инерцию, характеризующуюся постоянной времени от единиц секунд до нескольких минут, что ограничивает возможность их применения для измерения быстроменяющихся температур.

Кроме включения измерительного прибора в спай термопары возможно включение прибора «в электрод»; т.е. в разрыв одного из термоэлектродов (рис. 9.2, в). Такое включение, в соответствии с (9.1), позволяет измерять разность температур $t_1 - t_2$. Например, может быть измерен перегрев обмоток трансформатора над температурой окружающей среды при его испытаниях. Для этого рабочий спай термопары заделывают в обмотку, а свободный спай оставляют при температуре окружающей среды.

Требование постоянства температуры свободных концов термопары вынуждает по возможности удалять их от места измерения. Для этой цели применяют так называемые удлиняющие или компенсационные провода КП, подключаемые к свободным концам термопары с соблюдением полярности (рис. 9.2, г). Компенсационные провода состоят из разнородных проводников, которые в интервале возможных колебаний температуры свободных концов развивают в паре между собой такую же ТЭДС, как и термопара. Поэтому, если места подключения компенсационных проводов находятся при температуре t_2 , а температура в месте

Таблица 9.1

Термопара	Обозначение	Диапазон применения, °С
Медь-копель	МК	-200...100
Хромель-копель	ХК	-200...600
Хромель-алюмель	ХА	-200...1000
Платинородий (10%Rh) – платина	ПП	0...1300
Платинородий (30%Rh) – платинородий (6%Rh)	ПР	300...1600
Вольфрамрений (5%Re) – вольфрамрений (20%Re)	ВР	0...2200

подключения термопары к прибору t_0 , то ТЭДС термопары будет соответствовать ее градуировке при температуре свободных концов t_0 .

Максимальная развиваемая стандартными термопарами ТЭДС составляет от единиц до десятков милливольт.

Для измерения ТЭДС могут применяться магнитоэлектрические, электронные (аналоговые и цифровые) милливольтметры и потенциометры постоянного тока. При использовании милливольтметров магнитоэлектрической системы следует иметь в виду, что измеряемое милливольтметром напряжение на его зажимах

$$U = IR_B,$$

где I — ток в цепи термопары, а R_B — сопротивление милливольтметра.

Так как источником тока в цепи является термопара, то

$$I = E/(R_B + R_{вн}),$$

где $R_{вн}$ — сопротивление участка цепи внешнего по отношению к милливольтметру (т.е. электродов термопары и компенсационных проводов). Поэтому измеряемое милливольтметром напряжение будет равно

$$U = E/(1 + R_{вн}/R_B).$$

Таким образом, показания милливольтметра тем больше отличаются от ТЭДС термопары, чем больше отношение $R_{вн}/R_B$. Для уменьшения погрешности от влияния внешнего сопротивления милливольтметры, предназначенные для работы с термопарами (так называемые пирометрические милливольтметры) градуируются для конкретного типа термопар и при определенном номинальном значении $R_{вн}$, указываемом на шкале прибора. Пирометрические милливольтметры серийно выпускаются классов точности от 0,5 до 2,0.

Входное сопротивление электронных милливольтметров очень велико, и влияние сопротивления $R_{вн}$ на показания пренебрежимо мало.

Пьезоэлектрические преобразователи. Такие преобразователи основаны на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, заключающегося в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварца, турмалина, сегнетовой соли и др.) под влиянием механических напряжений. Пьезоэлектрическим эффектом обладают также некоторые поляризованные керамические материалы (титанат бария, цирконат-титанат свинца).

Если из кристалла кварца вырезать пластинку в форме параллелепипеда с гранями, расположенными перпендикулярно оптической Oz , механической Oy и электрической Ox осям кристалла (рис. 9.3), то при воздействии на пластинку усилия F_x , направленного вдоль электрической оси, на гранях x появляются заряды

$$Q_x = K_p F_x, \quad (9.3)$$

где K_p — пьезоэлектрический коэффициент (модуль).

При воздействии на пластину усилия F_y вдоль механической оси, на тех же гранях x возникают заряды

$$Q_y = K_p F_y a/b,$$

где a и b — размеры граней пластины. Механическое воздействие на пластину вдоль оптической оси появления зарядов не вызывает.

Пьезоэлектрический эффект является знакопеременным; при изменении направления прилагаемого усилия знаки зарядов на поверхности граней меняются на противоположные. Материалы сохраняют свои пьезоэлектрические свойства только при температурах ниже точки Кюри.

Величина пьезоэлектрического коэффициента (модуля) K_p и температура точки Кюри для кварца и распространенных керамических пьезоэлектриков приведены в табл. 9.2.

Изготовление преобразователей из пьезокерамики значительно проще, чем из монокристаллов. Керамические датчики производят по технологии, обычной для радиокерамических изделий — путем прессования или литья под давлением; на керамику наносятся электроды, к электродам привариваются выводы. Для поляризации керамические изделия помещают в сильное электрическое поле, после чего они приобретают свойства пьезоэлектриков.

Электродвижущая сила, возникающая на электродах пьезоэлектрического преобразователя, довольно значительна — единицы вольт. Однако, если сила, приложенная к преобразователю постоянна, то измерить ЭДС трудно, поскольку заряд мал и быстро стекает через входное сопротивление вольтметра. Если же сила переменна и при этом период изменения силы много меньше постоянной времени разряда, определяемой емкостью преобразователя и сопротивлением утечки, то процесс утечки почти не влияет на выходное напряжение преобразователя. При изменении силы F по закону $F = F_m \sin \omega t$ ЭДС также изменяется синусоидально.

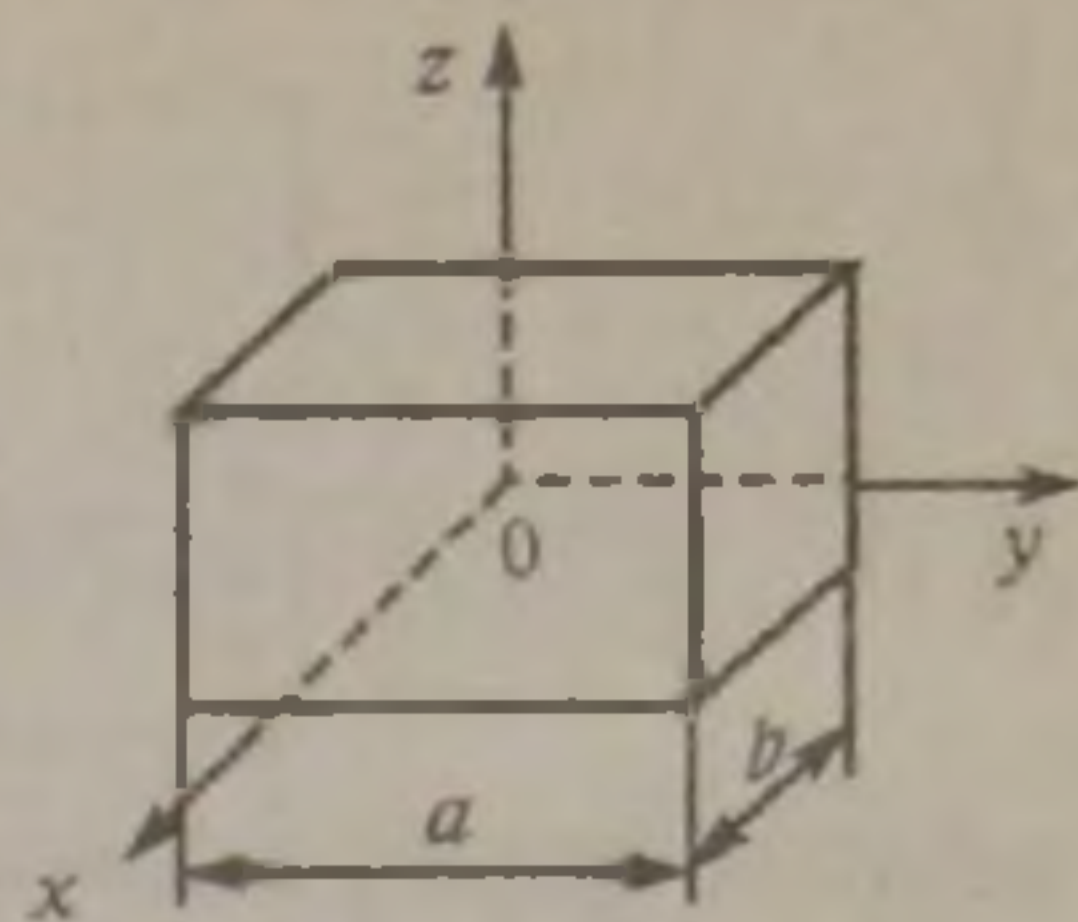


Рис. 9.3. Пластина из кристалла кварца

Таблица 9.2

Материал (марка)	K_p , Кл/Н	Точка Кюри, °С
Кварц	$2,3 \cdot 10^{-12}$	530
Титанат бария (ТБ-1)	$70,0 \cdot 10^{-12}$	120
Цирконат-титанат свинца (ЦТС-19)	$119,0 \cdot 10^{-12}$	290

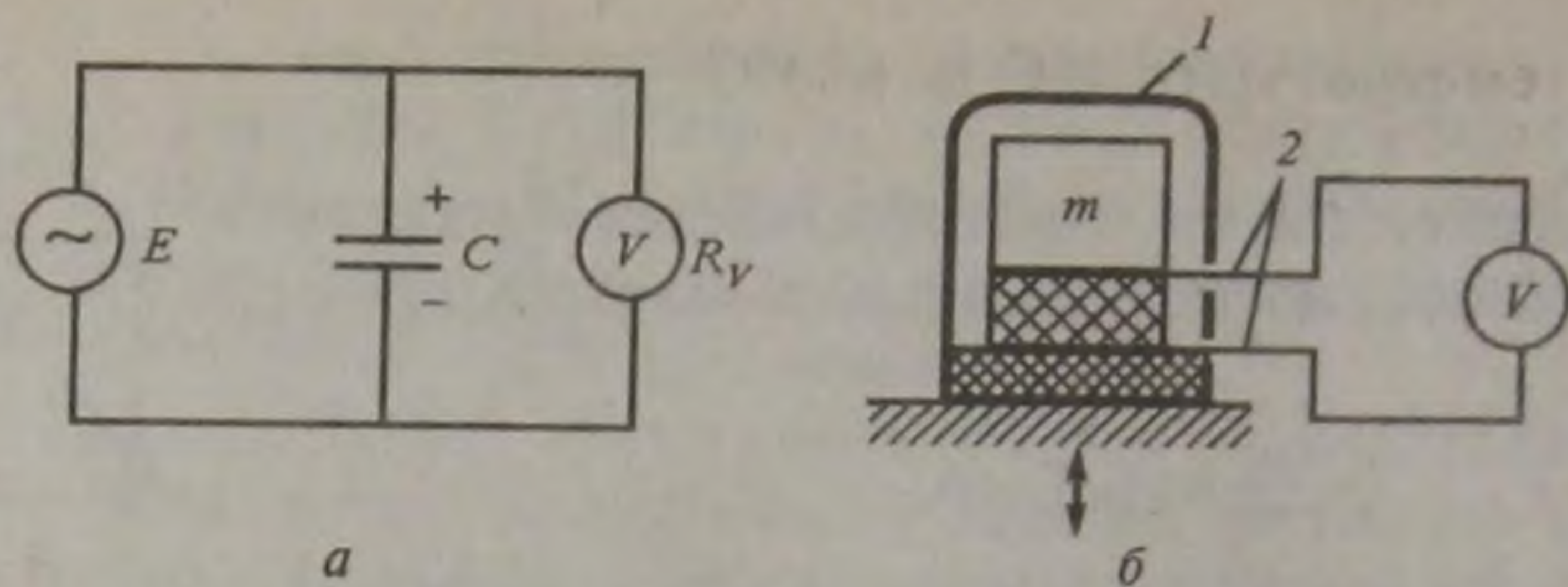


Рис. 9.4. Схема и устройство пьезоэлектрического датчика

Таким образом, измерение неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в переменную силу, действующую на пьезоэлектрический преобразователь, сводится к измерению переменного напряжения или ЭДС

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи находят широкое применение для измерения параметров движения: линейного и вибрационного ускорения, удара, акустических сигналов.

Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя представлена на рис. 9.4, а, в виде генератора с внутренней емкостью C . Поскольку мощность такого пьезоэлемента чрезвычайно мала, то для измерения выходного напряжения необходимо применять приборы с большим входным сопротивлением ($10^{11} \dots 10^{15}$ Ом).

Для увеличения полезного сигнала пьезодатчики выполняются из нескольких, последовательно соединенных пьезоэлементов.

Устройство пьезоэлектрического датчика для измерения вибрационного ускорения показано на рис. 9.4, б. Пьезоэлемент (обычно из пьезокерамики), нагруженный известной массой m , помещен в корпус 1 и через выводы 2 включен в цепь электронного милливольтметра V . Подставив в формулу для возникающего на гранях заряда выражение $F = ma$, где a — ускорение и учтя (9.3), получим

$$U = K_u a,$$

где K_u — коэффициент преобразования датчика по напряжению.

9.3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Термометры сопротивления. Термометры сопротивления как и термопары, предназначены для измерения температуры газообразных, твердых и жидких тел, а также температуры поверхности. Принцип действия термометров основан на использовании свойства металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление с температурой. Для проводников из чистых металлов эта зависимость в области температур от -200°C до 0°C имеет вид:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3],$$

а в области температур от 0°C до 630°C

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

где R_t , R_0 — сопротивление проводника при температуре t и 0°C ; A , B , C — коэффициенты; t — температура, $^{\circ}\text{C}$.

В диапазоне температур от 0°C до 180°C зависимость сопротивления проводника от температуры описывается приближенной формулой

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где α — температурный коэффициент сопротивления материала проводника (ТКС).

Для проводников из чистого металла $\alpha \approx 6 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Для полупроводниковых материалов зависимость сопротивления от температуры имеет вид

$$R_T = A \exp(B/T),$$

где A , B — постоянные; T — температура, К.

Измерение температуры термометром сопротивления сводится к измерению его сопротивления R_t с последующим переходом к температуре t по формулам или градуировочным таблицам.

Различают проволочные и полупроводниковые термометры сопротивления. Проволочный термометр сопротивления представляет собой тонкую проволоку из чистого металла, закрепленную на каркасе из температуростойкого материала (чувствительный элемент), помещенную в защитную арматуру (рис. 9.5). Выводы от чувствительного элемента подведены к головке термометра.

Выбор для изготовления термометров сопротивления проволок из чистых металлов, а не сплавов, обусловлен тем, что ТКС чистых металлов больше, чем ТКС сплавов и, следовательно, термометры на основе чистых металлов обладают большей чувствительностью.

Промышленностью выпускаются платиновые, никелевые и медные термометры сопротивления. Для обеспечения взаимозаменяемости и единой градуировки термометров стандартизованы величины их сопротивления R_0 и ТКС. В табл. 9.3 приведены основные данные о термометрах сопротивления.

Зависимость сопротивления термометров ТСП, ТСН и ТСМ от температуры дается стандартными градуировочными таблицами, составленными для ряда значений R_0 (1, 10, 50, 100, 500 Ом).

Полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы) представляют собой бусинки, диски или стержни из полупроводникового материала с выводами для подключения в измерительную цепь.

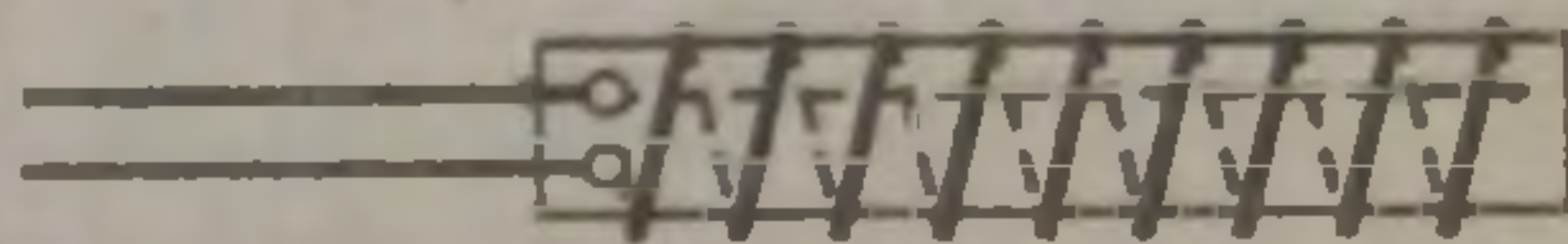


Рис. 9.5. Чувствительный элемент термометра сопротивления

Тип термометра	Материал чувствительного элемента	Диапазон температур применения, °С
ТСП	Платина	-260...1100
ТСН	Никель	-50...180
ТСМ	Медь	-200...200

Промышленность серийно выпускает множество типов термисторов в различном конструктивном оформлении.

Размеры термисторов, как правило, малы — около нескольких миллиметров, а отдельные типы десятых долей миллиметра. Для предохранения от механических повреждений и воздействия среды термисторы защищаются покрытиями из стекла или эмали, а также металлическими чехлами.

Термисторы обычно имеют сопротивление от единиц до сотен килоом; их ТКС в рабочем диапазоне температур на порядок больше, чем у проволочных термометров. В качестве материалов для рабочего тела термисторов используют смеси оксидов никеля, марганца, меди, кобальта, которые смешивают со связующим веществом, придают ему требуемую форму и спекают при высокой температуре. Применяют термисторы для измерения температур в диапазоне от -100 до 300°C . Инерционность термисторов сравнительно невелика. К числу их недостатков следует отнести нелинейность температурной зависимости сопротивления, отсутствие взаимозаменяемости из-за большого разброса номинального сопротивления и ТКС, а также необратимое изменение сопротивления во времени.

Для измерения в области температур, близких к абсолютному нулю, применяются германиевые полупроводниковые термометры.

Измерение электрического сопротивления термометров производится с помощью мостов постоянного и переменного тока или компенсаторов. Особенностью термометрических измерений является ограничение измерительного тока с тем, чтобы исключить разогрев рабочего тела термометра. Для проволочных термометров сопротивления рекомендуется выбрать такой измерительный ток, чтобы мощность, рассеиваемая термометром, не превышала $20...50$ мВт. Допустимая рассеиваемая мощность в термисторах значительно меньше и ее рекомендуется определять экспериментально для каждого термистора.

Тензочувствительные преобразователи (тензорезисторы). В конструкторской практике часто необходимы измерения механических напряжений и деформаций в элементах конструкций. Наиболее распространенными преобразователями этих величин в электрический сигнал являются тензорезисторы. В основе работы тензорезисторов лежит свойство металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление под действием приложенных к ним сил. Простейшим тензорезистором может быть отрезок проволоки, жестко сцепленный с поверхностью деформируемой детали. Растяжение или сжатие детали вызывает пропор-

циональное растяжение или сжатие проволоки, в результате чего изменяется ее электрическое сопротивление. В пределах упругих деформаций относительное изменение сопротивления проволоки связано с ее относительным удлинением соотношением

$$\Delta R/R = K_T \Delta l/l, \quad (9.4)$$

где l , R — начальные длина и сопротивление проволоки; Δl , ΔR — приращение длины и сопротивления; K_T — коэффициент тензочувствительности.

Величина коэффициента тензочувствительности зависит от свойств материала, из которого изготовлен тензорезистор, а также от способа крепления тензорезистора к изделию. Для металлических проволок из различных металлов $K_T = 1 \dots 3,5$.

Различают проволочные и полупроводниковые тензорезисторы. Для изготовления проволочных тензорезисторов применяются материалы, имеющие достаточно высокий коэффициент тензочувствительности и малый температурный коэффициент сопротивления. Наиболее употребительным материалом для изготовления проволочных тензорезисторов является константановая проволока диаметром 20... 30 мкм.

Конструктивно, проволочные тензорезисторы представляют собой решетку, состоящую из нескольких петель проволоки, наклеенных на тонкую бумажную (или иную) подложку (рис. 9.6). В зависимости от материала подложки тензорезисторы могут работать при температурах от -40 до $+400$ °С. Существуют конструкции тензорезисторов, прикрепляемых к поверхности деталей с помощью цементов, способные работать при температурах до 800 °С.

Основными характеристиками тензорезисторов являются номинальное сопротивление R , база l и коэффициент тензочувствительности K_T .

Промышленностью выпускается широкий ассортимент тензорезисторов с величиной базы от 5 до 30 мм, номинальными сопротивлениями от 50 до 2000 Ом, с коэффициентом тензочувствительности $2 \pm 0,2$.

Дальнейшим развитием проволочных тензорезисторов являются фольговые и пленочные тензорезисторы, чувствительным элементом которых являются решетка из полосок фольги или тончайшая металлическая пленка, наносимые на подложки на лаковой основе.

Тензорезисторы выполняются, на основе полупроводниковых материалов. Наиболее сильно тензоэффект выражен у германия, кремния и др. Основным отличием полупроводниковых тензорезисторов от проволочных является большое (до 50%) изменение сопротивления при деформации благодаря большой величине коэффициента тен-

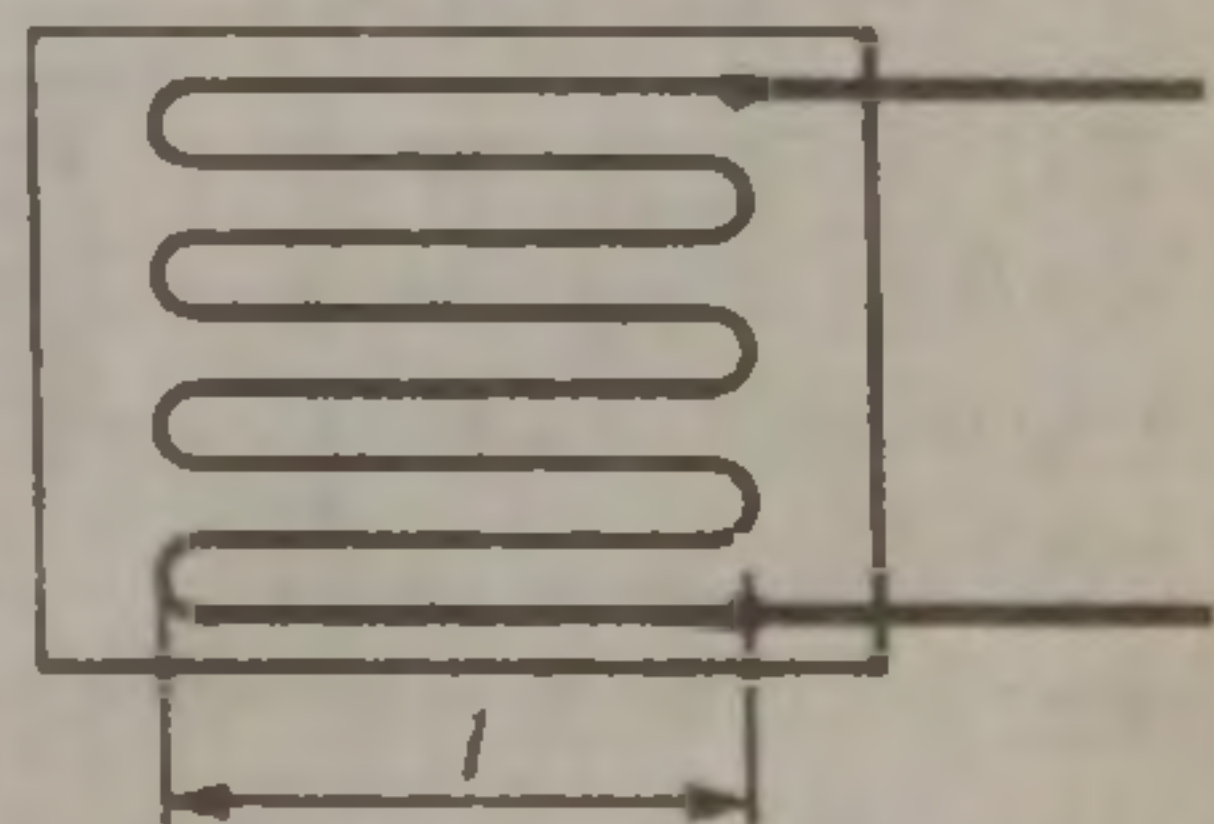


Рис. 9.6. Тензометр

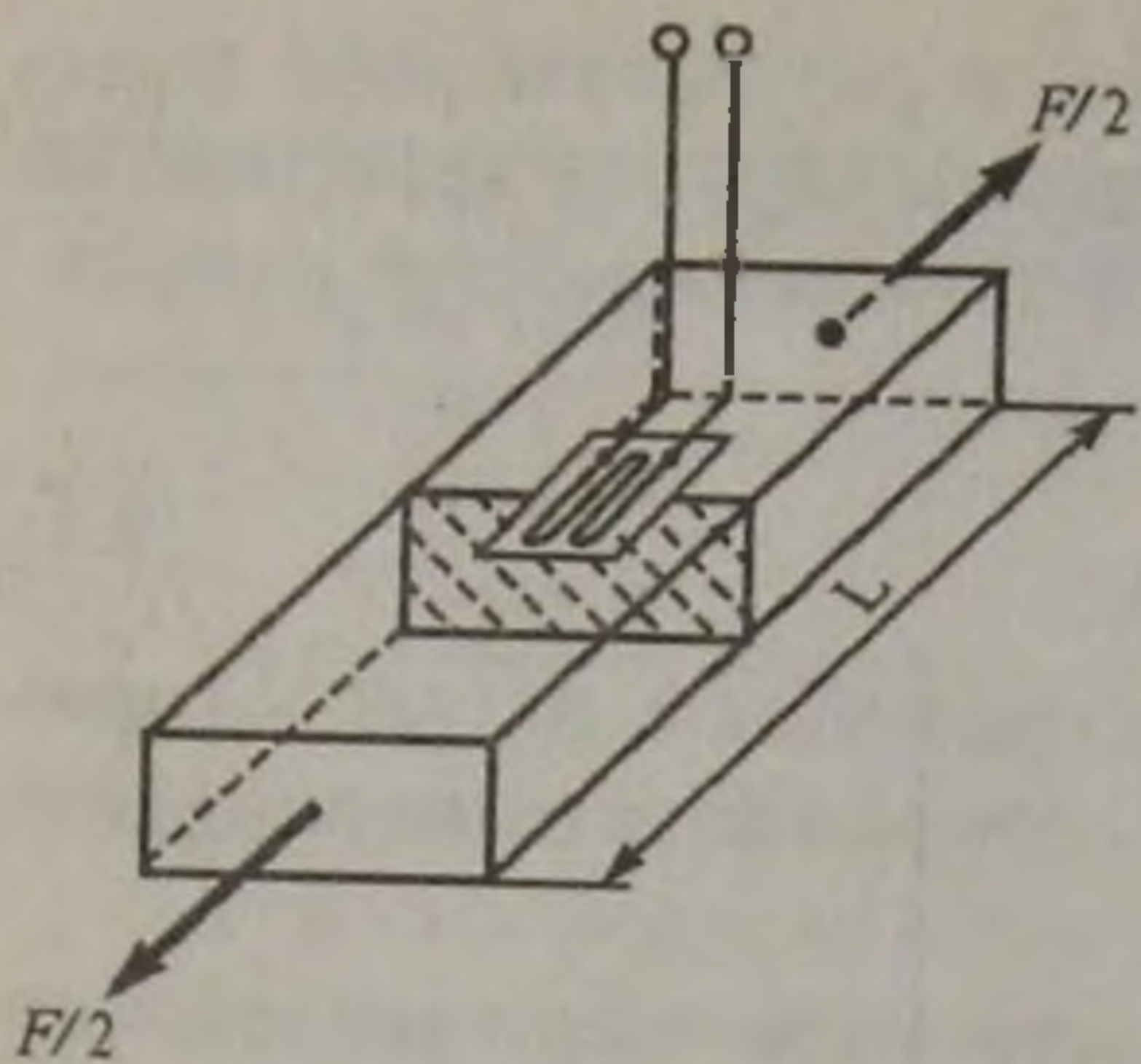


Рис. 9.7. Тензорезистор на исследуемом объекте

ной деформацией $\epsilon = \Delta L/L$ соотношением $\sigma = \epsilon E$, где S — поперечное сечение элемента; E — модуль упругости материала; L — длина образца. Учитывая (9.4) получим

$$\sigma = E \frac{\Delta R}{RK_T}$$

Измерив ΔR тензорезистора можно по известным R , K_T и E определить напряжение σ .

Индуктивные преобразователи. Индуктивные преобразователи применяются для измерения перемещений, размеров, отклонений формы и расположения поверхностей. Преобразователь состоит из неподвижной катушки индуктивности с магнитопроводом и якоря, также являющегося частью магнитопровода, перемещающегося относительно катушки индуктивности. Для получения возможно большей индуктивности магнитопровод катушки и якорь выполняются из ферромагнитных материалов. При перемещении якоря (связанного, например, со щупом измерительного устройства) изменяется индуктивность катушки и, следовательно, изменяется ток, протекающий в обмотке.

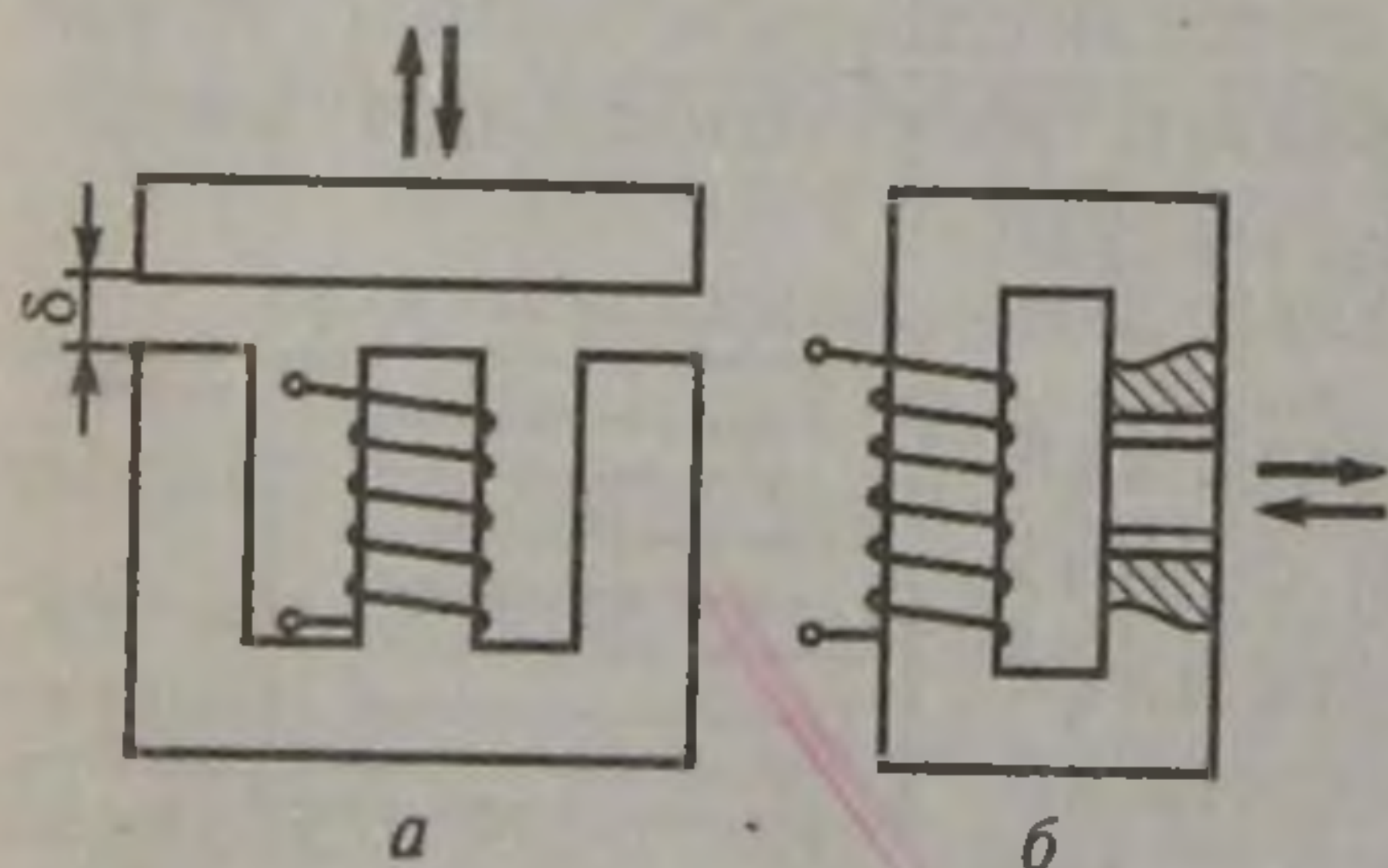


Рис. 9.8. Индуктивные преобразователи перемещений

На рис. 9.8 приведены схемы индуктивных преобразователей: с переменным воздушным зазором δ (рис. 9.8, а), применяемых для измерения перемещений в пределах 0,01...10 мм; с переменной площадью воздушного зазора S_δ (рис. 9.8, б), применяемых в диапазоне 5...20 мм.

При небольшом зазоре δ индуктивность катушки преобразователя (рис. 9.8, а)

зочувствительности (от -100 до +200).

Измерение сопротивления тензорезисторов производится теми же методами и средствами, что и термометров сопротивления.

Для измерения механического напряжения в элементе конструкции тензорезистор наклеивают на исследуемый элемент в интересующем сечении таким образом, чтобы его продольная ось совпадала с направлением деформации (рис. 9.7). Если на элемент конструкции действует сила F , то величина возникающего в нем механического напряжения $\sigma = F/S$ связана с относитель-

$$L = \frac{w^2}{R_m + R_\delta} = \frac{w^2}{\frac{l_m}{\mu S} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}}, \quad (9.5)$$

где w — число витков обмотки; R_m, R_δ — магнитное сопротивление магнитопровода и зазора; l_m — средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе; S, S_0 — площади сечения магнитопровода и воздушного зазора; μ, μ_0 — магнитные проницаемости материала магнитопровода и воздушного зазора.

Когда магнитное сопротивление зазора значительно больше магнитного сопротивления магнитопровода, т.е. $R_\delta \gg R_m$ или $\delta \gg l_m/2\mu$ выражение (9.5) принимает вид

$$L = w^2 S_0 \mu_0 / 2\delta. \quad (9.6)$$

Индуктивные преобразователи с переменным зазором имеют высокую чувствительность и реагируют на изменение зазора порядка 0,1...0,5 мкм. Ток в обмотке катушки определяется выражением

$$I = U / \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad (9.7)$$

где U — напряжение питания; R — активное сопротивление обмотки; ω — частота питающего напряжения.

Из (9.6) и (9.7) следует, что зависимость $I = f(\delta)$ нелинейна. Спрямление нелинейности достигается применением дифференциальных преобразователей с двумя раздельными магнитными цепями и общим якорем. Индуктивные преобразователи широко применяют в современных средствах линейных и угловых измерений: профилографах, контрольных автоматах и в электронных аналоговых и цифровых приборах для активного контроля линейных размеров. Приведенная погрешность индуктивных преобразователей не превосходит 1...2%.

Глава 10

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При работе средств измерений в динамическом режиме (в режиме динамических измерений) возникает специфическая составляющая погрешности — динамическая погрешность. В общем случае, при измерении величин, изменяющихся во времени, динамическая погрешность Δx является функцией времени

$$\Delta x(t) = x(t)_{\text{изм}} - x(t)_{\text{ист.}}$$

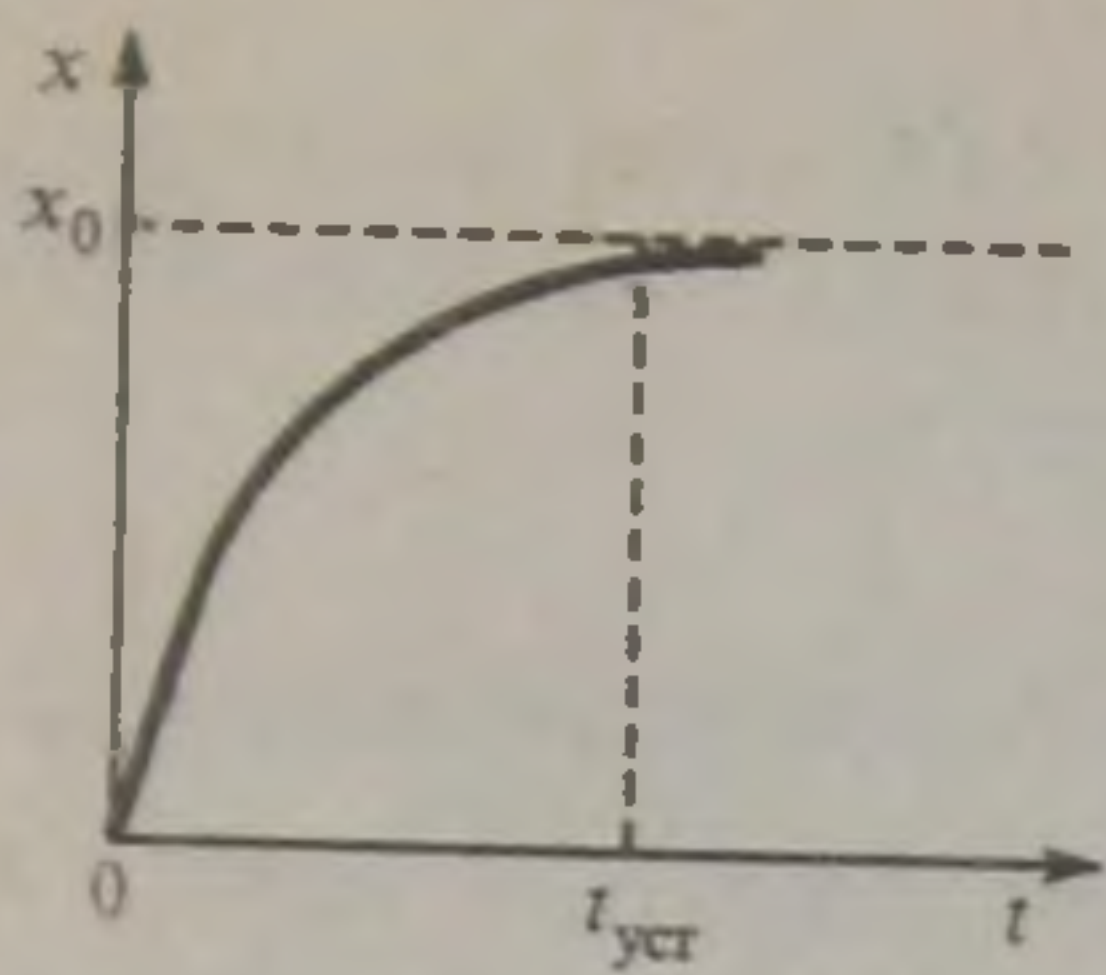


Рис. 10.1. Измерение постоянной величины инерционным датчиком

Динамической может являться и погрешность при измерении постоянной величины x_0 инерционным средством измерения (рис. 10.1). Если отсчет показаний средства измерения производится в моменты времени $t \geq t_{уст}$, то динамическая погрешность отсутствует и режим измерения является статическим. В интервале времени от 0 до $t_{уст}$ средство измерения работает в динамическом режиме и динамическая погрешность также изменяется во времени.

Целью обработки результатов динамических измерений является либо нахождение сигнала на выходе средства измерения $x(t)_{изм}$ по заданному сигналу на входе $x(t)_{ист}$, либо нахождение значения входной величины средства измерения по значениям выходной величины. Точное решение последней задачи с учетом реальных свойств входного сигнала и средства измерения наталкивается на серьезные математические трудности. Поэтому при анализе динамических режимов средств измерений и динамических погрешностей часто прибегают к определенным упрощениям и ограничениям, накладываемым на входные сигналы, полагая, что они являются неслучайными и детерминированными (ступенчатые, гармонические и др.), а средства измерений — линейными звеньями.

При таких ограничениях динамические погрешности измерения по характеру проявления являются систематическими и задача отыскания $x(t)_{ист}$ сводится к введению поправки в результат измерения. В ряде случаев предварительное оценивание динамических погрешностей необходимо для решения более простой задачи — выбора средства измерения с такими динамическими свойствами, чтобы при заданном (известном) характере входного сигнала динамические погрешности не превосходили допустимых значений. Для нахождения динамической погрешности необходимо знание динамических характеристик средства измерения, его динамических свойств. Существуют различные способы описания этих свойств на основе использования достаточно большого набора тех или иных динамических характеристик. Действующими стандартами предусматривается выбор динамических характеристик средств измерения из числа наиболее удобных для использования и экспериментального определения.

Динамические характеристики средств измерения подразделяются на полные и частные. К полным динамическим характеристикам относятся дифференциальное уравнение, передаточная функция, переходная и импульсная переходная характеристики, совокупность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик.

Любые параметры и функционалы полных динамических характеристик, которые могут быть пригодны для описания отдельных дина-

мических свойств средства измерения и качества динамической погрешности, относятся к частным динамическим характеристикам (постоянная времени, время успокоения и др.).

10.2. ПОЛНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

Дифференциальное уравнение. Динамический режим широкого класса средств измерений может быть описан линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами

$$\sum_{i=0}^n A_i \frac{d^i x(t)_{\text{изм}}}{dt^i} = \sum_{l=0}^m B_l \frac{d^l x(t)_{\text{ист}}}{dt^l}, \quad (10.1)$$

где i, l — порядок производных от $x(t)_{\text{изм}}$ и $x(t)_{\text{ист}}$; A_i, B_l — коэффициенты.

В статическом режиме, при $x_{\text{ист}} = \text{const}$ и $x_{\text{изм}} = \text{const}$ уравнение (10.1) вырождается в уравнение

$$x_{\text{изм}} = K x_{\text{ист}},$$

где $K = B_0 / A_0$ — номинальный коэффициент преобразования средства измерений.

Решение дифференциального уравнения позволяет оценивать динамическую погрешность и получить исправленный результат измерения, если известны коэффициенты A_i и B_l . Однако коэффициенты уравнения трудно определить расчетно и экспериментально, поэтому дифференциальное уравнение, как динамическая характеристика, для оценивания результатов и динамических погрешностей не нашло широкого применения на практике.

Передаточная функция. Выразив входящие в уравнение (10.1) $x(t)_{\text{ист}}$ и $x(t)_{\text{изм}}$ в операторной форме, запишем уравнение в виде

$$\sum_{i=0}^n A_i p^i x(p)_{\text{изм}} = \sum_{l=0}^m B_l p^l x(p)_{\text{ист}},$$

где p — оператор дифференцирования d/dt .

Передаточной функцией $W(p)$ называют отношение изображения выходной величины динамической системы к изображению входной величины

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{\sum_{i=0}^n A_i p^i}{\sum_{l=0}^m B_l p^l} = \\ &= (A_0 + A_1 p + A_2 p^2 + \dots + A_n p^n) / (B_0 + B_1 p + B_2 p^2 + \dots + B_m p^m). \end{aligned} \quad (10.2)$$

Как правило, передаточные функции реальных средств измерения удается с достаточной точностью аппроксимировать простым выражением ($n = 2 - 3, n < m$).

Если известен закон изменения измеряемой величины $x(t)_{\text{ист}}$ и передаточная функция средства измерения, то определяют изображение $x(p)_{\text{изм}} = W(p)x(p)_{\text{ист}}$, а затем переходят к оригиналу.

Заменяя в (10.2) p на $j\omega$, получим комплексную (амплитудно-фазовую) характеристику, действительная часть которой является амплитудно-частотной характеристикой $A(\omega)$, а мнимая — фазо-частотной $\varphi(\omega)$.

Переходная характеристика. Отклик средства измерения на ступенчатое возмущение единичной высоты называется *переходной характеристикой* $h(t)$.

Реакция средства измерения на воздействие единичного импульса с параметрами $x = 0$ при $t \neq 0$ и $x = \infty$ при $t = 0$, называется *импульсной переходной характеристикой* $g(t)$. Математически такой единичный импульс (дельта-функция) представляет собой производную от единичной ступенчатой функции.

Переходная и импульсная переходная характеристики сравнительно просто определяются экспериментально путем подачи на вход средства измерения соответствующего ступенчатого или импульсного входного воздействия и регистрации его выходного сигнала.

Полные динамические характеристики линейных аналоговых звеньев связаны между собой следующими соотношениями

$$h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau;$$

$$g(t) = dh(t)/dt;$$

$$W(j\omega) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-j\omega t} dt = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)};$$

$$g(t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{+\infty} W(j\omega)e^{j\omega t} d\omega;$$

$$W(p) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-pt} dt.$$

При известных $h(t)$ или $g(t)$ выходной сигнал средства измерения находят с помощью интеграла Дюамеля

$$x(t)_{\text{изм}} = (d/dt) \int_0^t x(\tau)h(t-\tau) d\tau;$$

$$x(t)_{\text{изм}} = \int_0^t x(\tau)g(t-\tau) d\tau.$$

Пример. Дифференциальное уравнение термопары имеет вид:

$$T \frac{dx(t)_{\text{изм}}}{dt} + x(t)_{\text{изм}} = x(t)_{\text{ист}}, \quad (10.3)$$

где T — постоянная времени термопары.

Динамическая система, описываемая уравнением (10.3), называется инерционным звеном первого порядка.

Полные динамические характеристики такого звена:
 переходная характеристика

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}};$$

импульсная переходная характеристика

$$g(t) = 1/T e^{-\frac{t}{T}};$$

передаточная функция

$$W(p) = 1/(Tp+1); \quad (10.4)$$

амплитудно-частотная характеристика

$$A(\omega) = 1/\sqrt{1+\omega^2 T^2};$$

фазо-частотная характеристика

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega T.$$

Реакция такого инерционного звена на изменения входного сигнала (температуры) по ступенчатому, линейному и гармоническому законам изображена на рис. 10.2.

При ступенчатом входном воздействии (рис. 10.2, а) динамическая погрешность изменяется по закону

$$\Delta x(t) = -x_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

и практически ею можно пренебречь, если отсчет показаний термопары производить в моменты времени t большие, чем $(3 \dots 4) T$.

При линейном изменении измеряемой температуры

$$x(t)_{\text{ист}} = bt$$

(рис. 10.2, б) динамическая погрешность постепенно увеличивается и достигает установившегося значения

$$\Delta x = -bT.$$

При гармоническом изменении измеряемой температуры инерция термопары приводит к уменьшению амплитуды и фазовому сдвигу сигнала на выходе средства измерения (рис. 10.2, в).

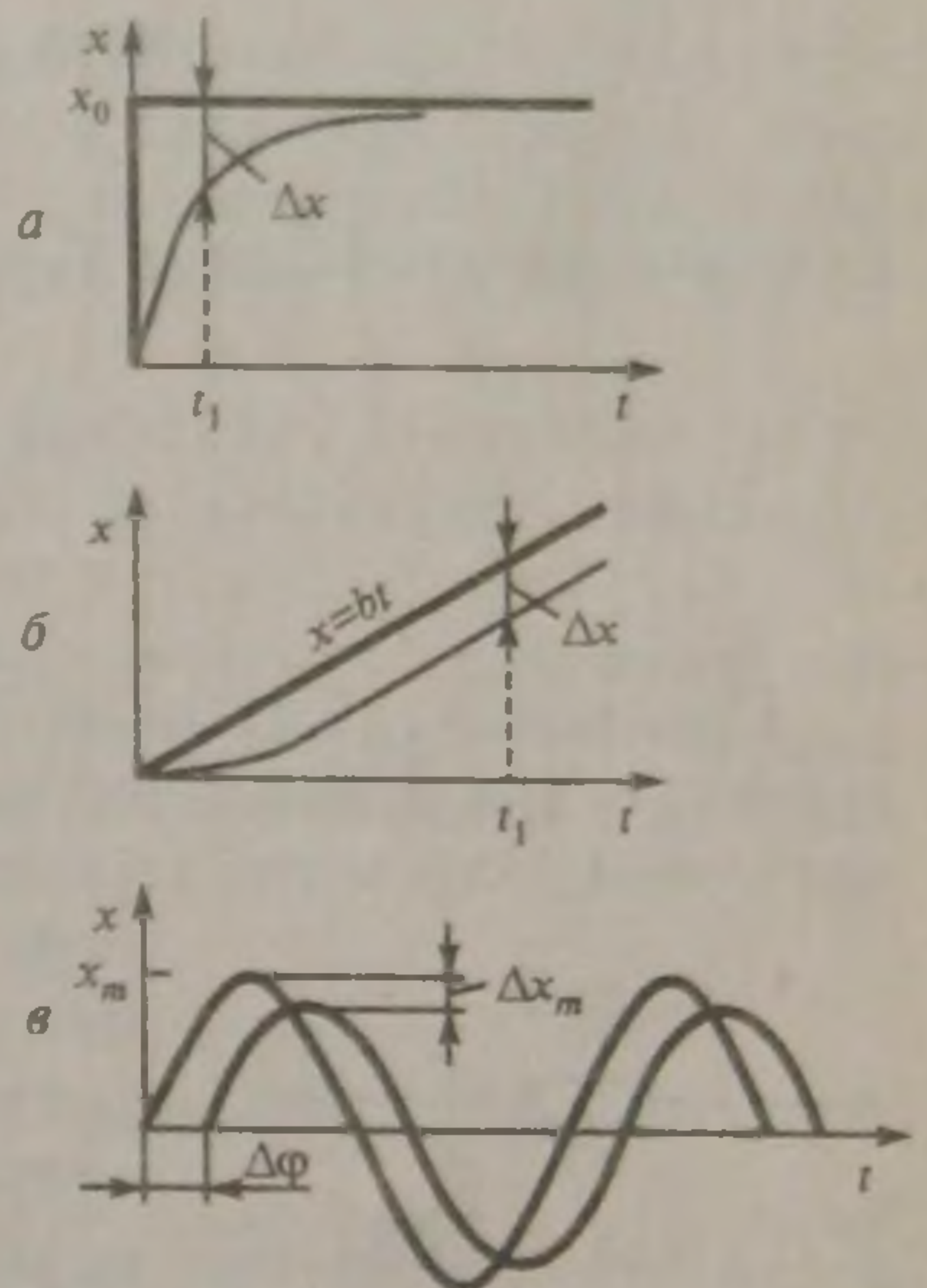


Рис. 10.2. Реакция инерционного датчика на различные входные воздействия

10.3. КОРРЕКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Современные технологические процессы осуществляются при высоких скоростях изменения физических величин подлежащих измерению. Избежать появления значительных динамических погрешностей в таких случаях можно применяя все менее и менее инерционные средства измерений. Однако существуют физические пределы уменьшения инерции материальных систем, в том числе и средств измерения. Поэтому одним из способов уменьшения динамических погрешностей является их автоматическая коррекция путем включения в измерительную цепь корректирующего звена, передаточная функция которого обратна передаточной функции средства измерения.

Так, используя в качестве средства измерения термопару с передаточной функцией инерционного звена первого порядка (10.4), при ступенчатом изменении входной величины получаем переходный процесс в виде экспоненты с постоянной времени T . Если же последовательно с термопарой включить корректирующее звено, передаточная функция которого

$$W_k(p) = \frac{T_k p + 1}{T_k p + k},$$

где T_k — постоянная времени корректирующего звена, k — коэффициент, то общая передаточная функция системы станет $W(p) \cdot W_k(p)$, т.е.

$$W(p)_{\text{общ}} = \frac{1}{T p + 1} \cdot \frac{T_k p + 1}{T_k p + k}.$$

Если выполнить условие $T_k = T$, то

$$W(p)_{\text{общ}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\frac{T}{k} p + 1}. \quad (10.5)$$

Сравнивая (10.5) и (10.4), видно, что включение корректирующего звена при его правильной настройке ($T_k = T$) равноценно уменьшению постоянной времени термопары T в k раз. Для инерционного звена первого порядка нужна передаточная функция может быть реализована в виде дифференцирующего звена (рис. 10.3), где $T_k = R_1 C$, $k = (R_1 / R_2) + 1$. Некоторым недостатком такого звена является ослабление в k раз сигнала на выходе. Существуют корректирующие звенья на активных элементах, в которых ослабления сигнала не происходит.

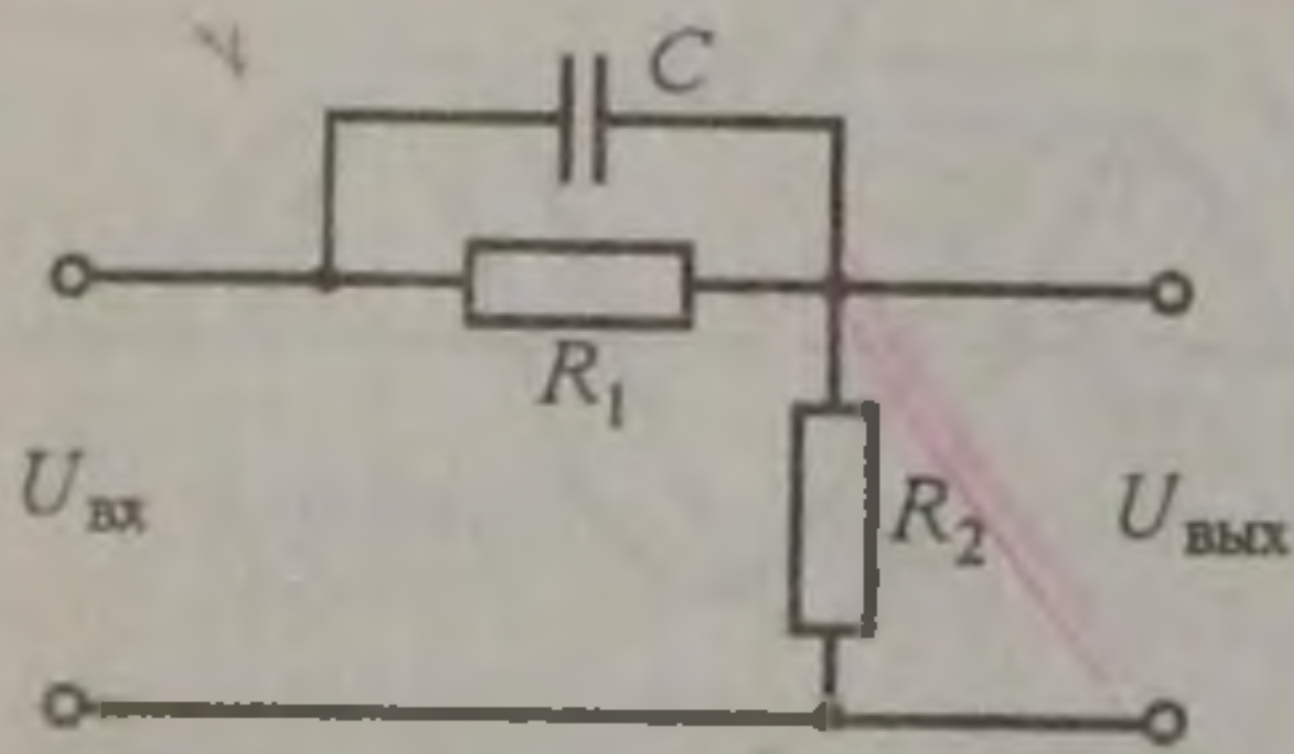


Рис. 10.3. Корректирующее звено

ИЗМЕРЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

11. 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Изготовление изделий машиностроения, микроэлектроники, оптоэлектроники и вычислительной техники связано с обработкой материалов по заданным размерам, форме и качеству поверхности. При этом качество изделий контролируется средствами измерения геометрических величин. По принятой классификации к технике измерения геометрических величин относят измерения длин и углов, отклонений размеров, формы и расположения поверхностей, параметров конусов, резьб и зубчатых колес.

Область линейно-угловых измерений характеризуется огромным числом измерительных задач и объектов измерения. Так, измерения отклонений формы и расположение поверхностей включают в себя измерения параметров шероховатости, отклонений от параллельности, биений, отклонений от перпендикулярности, эксцентриситетов и т.п. Множество измерительных задач возникает и при контроле качества конусов, резьб и зубчатых колес. Одно из главных мест в линейно-угловых измерениях занимает измерение длины. Диапазон задаваемых линейных размеров здесь простирается от долей микрометра (при измерении микронеровностей поверхности) до десятков миллиметров (в электронике) и метров (в машиностроении).

Методы и средства измерения геометрических величин подразделяют на несколько групп, основными из которых являются группы механических и оптико-механических приборов, рассмотрением которых мы и ограничимся. Но сначала изложим общие правила выполнения линейных и угловых измерений.

При проведении этих измерений на результат измерения значительное влияние оказывают: температура окружающей среды, атмосферное давление, влажность, вибрация и т.д. Для того чтобы избежать дополнительных погрешностей, вызываемых условиями, при которых выполняют измерения, Государственным стандартом установлены следующие требования производства линейных и угловых измерений:

- температура окружающей среды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- атмосферное давление $101324,72\text{ Па}$ (760 мм рт. ст.);
- относительная влажность окружающего воздуха 58% ;
- ускорение свободного падения $9,8\text{ м/с}^2$;
- направление линии измерения линейных размеров до 160 мм наружных поверхностей — вертикальное, в остальных случаях — горизонтальное;
- относительная скорость измерения углов, равная нулю.

Стандартом также установлено, что результаты измерений для сопоставимости должны приводиться к указанным нормальным значениям влияющих величин. Пределы допускаемых отклонений от нормальных условий измерения нормированы в стандартах для различных видов измерений.

Большое значение для точности линейных и угловых измерений имеет поддержание стабильной нормальной температуры в зоне измерения. Во избежание дополнительных погрешностей рекомендуется, чтобы измеряемые изделия выдерживали при нормальной температуре от 2 до 36 ч в зависимости от их массы и допусков на линейные размеры. Средства же измерений должны находиться в условиях, соответствующих указанным в стандартах, не менее 24 ч до начала измерений.

Изготовление изделий микроэлектроники, оптоэлектроники и вычислительной техники связано с обработкой материалов по заданным размерам, форме и качеству поверхности. Диапазон задаваемых линейных размеров широкий — от долей микрометра (при измерениях микронеровностей поверхности) до десятков миллиметров. Измерение геометрических размеров, формы и показателей качества поверхности осуществляется с помощью средств линейных и угловых измерений. Эти средства подразделяются на несколько групп, основными из которых являются группы механических и оптико-механических приборов.

11.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ

Различают средства линейных и угловых измерений общего назначения и узкоспециализированные, предназначенные для решения частных измерительных задач. К механическим средствам измерения длины общего назначения относятся штангенприборы, штриховые и концевые меры длины, микрометрические приборы и измерительные головки.

Штриховыми мерами длины называются меры, у которых размер, выраженный в единицах длины, определяется расстоянием между осями двух соответствующих штрихов. Штриховыми мерами являются измерительные линейки, рулетки, брусковые штриховые меры.

Брусковые штриховые меры длины представляют собой металлические или стеклянные бруски различного сечения, с нанесенными на них штрихами или шкалами. Эти меры применяются как для непосредственного измерения линейных размеров, так и в качестве шкал приборов и станков.

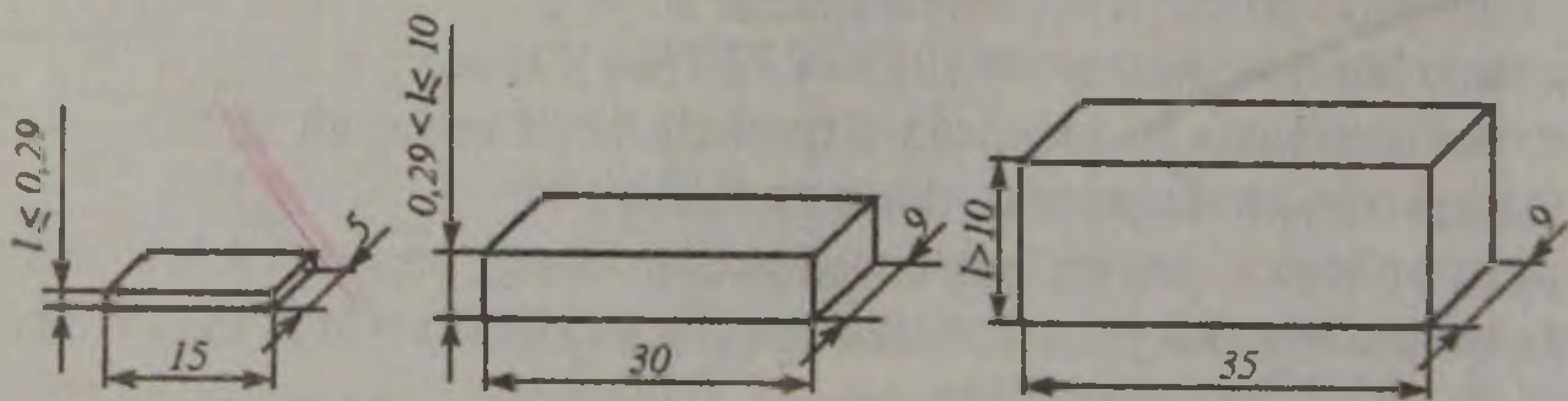


Рис. 11.1. Плоскопараллельные концевые меры длины

Основные типы, параметры и размеры брусковых штриховых мер стандартизованы. Промышленностью выпускаются брусковые меры с номинальной длиной 60...2000 мм. Допускаемые отклонения от номинальной длины нормируются шестью классами точности, обозначаемыми условно цифрами от 0 до 5. Наименьшая цена деления брусковых мер длины 0,01 мм.

Плоскопараллельные концевые меры длины (ПКМД) воспроизводят единицу длины одного фиксированного размера и выполняются в виде прямоугольного параллелепипеда из стали или твердого сплава с двумя взаимно параллельными измерительными поверхностями. Расстояние между измерительными поверхностями определено с высокой точностью и известно (рис. 11.1). Измерительные поверхности отличаются от других поверхностей меры малой шероховатостью, благодаря чему ПКМД обладают свойством притираемости, т.е. способностью измерительной поверхности одной меры плотно сцепляться с измерительной поверхностью другой меры. Притираемость обусловлена силами молекулярного взаимодействия поверхностей.

ПКМД выпускаются в наборах с числом мер разного номинала от 10 до 112. Номинальные значения мер стандартизованы, поэтому притираемость мер позволяет собрать из них блок необходимой длины (от 0,1 до 1000 мм).

В зависимости от точности изготовления ПКМД относят к классам точности 00; 01; 0; 1; 2; 3.

Перед притиркой, выбранные для составления блока меры, очищают от смазки, промывают бензином и вытирают насухо чистой салфеткой. После этого прикасаться руками к измерительной поверхности нельзя. Подготовленные таким образом меры притирают путем прикладывания или надвигания одной меры на другую. Для удобства пользования мерами, к наборам ПКМД поставляются наборы принадлежностей.

Штангенприборы — к ним относят средства линейных измерений, объединенные общим принципом построения отсчетных устройств, основанным на применении линейного нониуса. В зависимости от назначения различают штангенциркули, штангенглубиномеры, штангенрейсмасы.

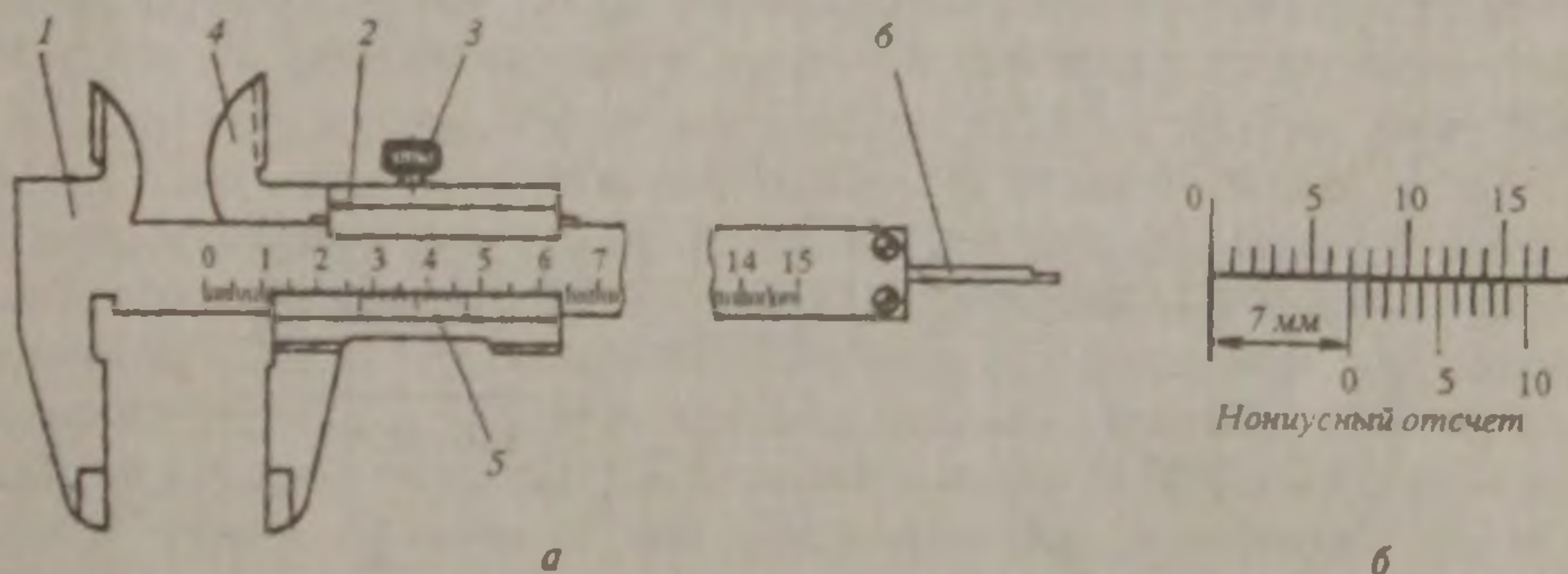


Рис. 11.2. Штангенциркуль

Штангенциркуль — универсальное средство измерения длины, диаметров валов и отверстий, глубины отверстий и расстояний между центрами отверстий.

Штангенглубиномер предназначен для измерения глубины отверстий, пазов и т.п.

Штангенрейсмасс — средство измерения высотных размеров изделий.

Принцип построения нониуса заключается в совмещении соответствующих штрихов двух линейных шкал, интервалы деления которых отличаются на определенную величину. В общем случае штангенприбор (рис. 11.2) состоит из штанги 1 с неподвижной измерительной губкой и рамки 2, перемещающейся по штанге, с другой измерительной губкой. На штанге нанесена шкала с ценой деления 1 мм. На скосе рамки нанесена вспомогательная шкала 5, называемая нониусом, с ценой деления 0,9 мм, по которой отсчитываются дробные доли миллиметра.

Для фиксирования рамки на рабочей части штанги служит винт 3. Рамка жестко связана с линейкой глубиномера 6. Верхние губки 4 предназначены для измерения внутренних размеров, а нижние — наружных.

При совмещении нулевой отметки шкалы нониуса с нулевой отметкой шкалы штанги, первая за нулевой отметка шкалы нониуса оказывается смещенной относительно первой отметки шкалы штанги на 0,1 мм; соответственно вторая отметка шкалы нониуса будет смещена на 0,2 мм, а десятая на 1 мм, т.е. последняя отметка шкалы нониуса точно совпадает с отметкой 0,9 мм на шкале штанги.

Если при измерении размера шкала нониуса располагается так, что одна из отметок нониуса (не нулевая) совпадает с какой-либо отметкой шкалы штанги (не нулевой), то результат измерения определяется как сумма отсчетов по шкале штанги и произведения разности цены деления шкал штанги и нониуса на номер деления шкалы штанги, с которой совпала отметка нониуса. Так, измеренное значение на рис. 11.2, б будет равно $l = 7 + 0,1 \cdot 1 = 7,1$ мм. Таким образом, с помощью нониуса можно произвести отсчет размера с точностью до 0,1 мм. В штангенприборах часто применяется растянутый нониус, обеспечивающий отсчет размера до 0,05 мм.

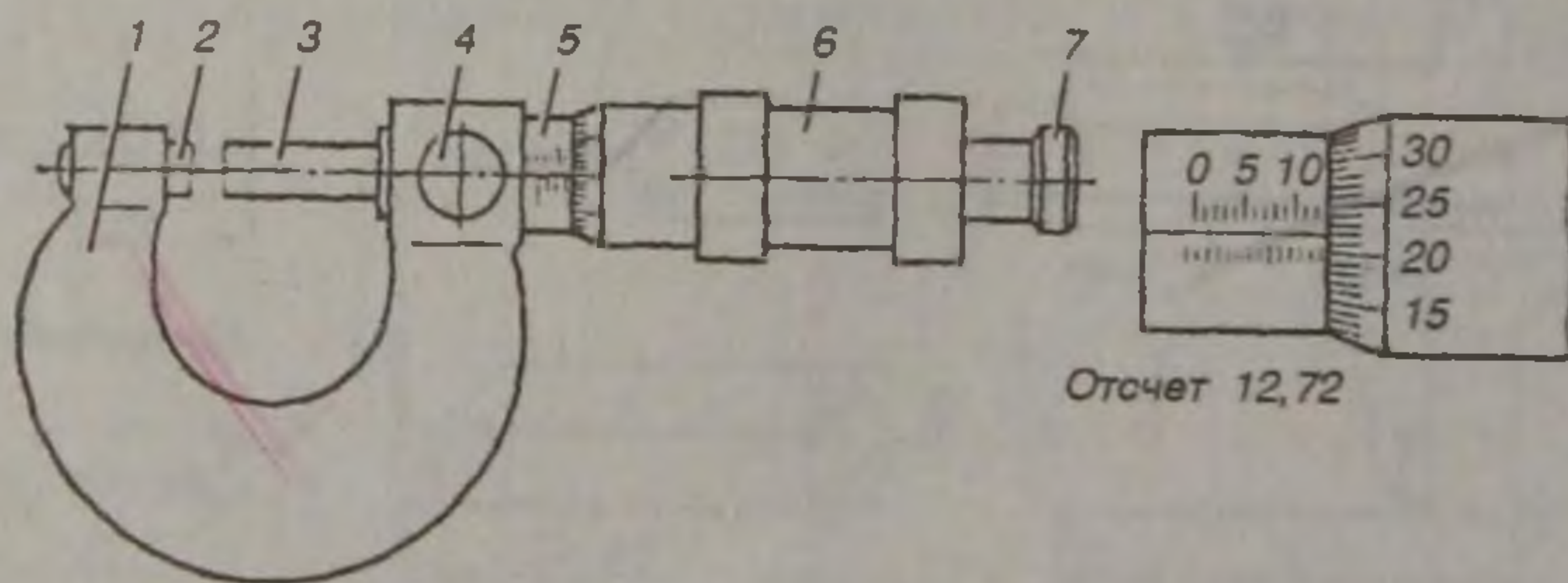


Рис. 11.3. Микрометр

В некоторых современных моделях штангенприборов вместо нониуса применяются индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Микрометрические приборы (микрометры, микрометрические глубиномеры, микрометрические нутромеры) являются более точными, чем штангенприборы. Принцип действия микрометрических приборов основан на преобразовании вращательного движения точного микрометрического винта, установленного в неподвижную гайку, в его поступательное движение вдоль оси. Большинство микрометрических приборов имеет винт с шагом 0,5 мм, поэтому поворот винта в гайке на 360° приводит к его перемещению вдоль оси на 0,5 мм.

Микрометр (рис. 11.3) состоит из скобы 1, с одной стороны которой запрессована неподвижная пятка 2, а с другой укреплена микрометрическая головка, состоящая из стебля 5, барабана 6 в сборе с микровинтом 3 и механизмом трещотки 7. При вращении барабана стебель совершает поступательное движение и приводится в контакт с измеряемым объектом. Механизм трещотки обеспечивает при этом постоянство измерительного усилия. Винт 4 фиксирует положение микровинта. Перемещение микровинта отсчитывается по двум шкалам: одной, нанесенной по длине стебля, и второй, нанесенной по окружности барабана. Деления на стебле нанесены через 0,5 мм, а на шкале барабана имеется 50 отметок. Таким образом, одно деление шкалы барабана соответствует перемещению микровинта на $0,5/50 = 0,01$ мм.

Для микрометрических приборов установлены два класса точности (1 и 2). Предельно допустимая погрешность микрометрических приборов зависит от диапазона измерения. Так, для микрометров с пределами измерения 0...25 мм, класса точности 1, погрешность прибора не превышает $\pm 0,002$ мм, а у микрометров для измерения длин в диапазоне 400—500 мм, не превосходит $\pm 0,005$ мм.

Для измерений линейных размеров прецизионных деталей микроэлектроники и точного приборостроения выпускается настольный микрометр с цифровым электронным отсчетом, обеспечивающий измерения размеров в диапазоне 0...10 мм с погрешностью не более $\pm 0,002$ мм.

Индикаторы часового типа (рис. 11.4) с ценой деления 0,01 мм являются наиболее распространенными измерительными головками. Они предназначены для работы в цеховых условиях при выполнении измерительных и контрольных операций. Принцип действия индикатора основан на преобразовании с помощью рычажно-зубчатой передачи линейных перемещений измерительного стержня в угловое перемещение стрелок. Лицевую сторону индикатора образует круговая шкала, на которой нанесено 100 делений с ценой деления 0,01 мм и малая шкала с ценой деления 1 мм. Передаточное отношение рычажно-зубчатой передачи подобрано так, что перемещение измерительного стержня на 1 мм вызывает поворот малой стрелки на одно деление. Таким образом, при измерении отсчет по малой шкале дает перемещение



Рис. 11.4. Индикатор часового типа

измерительного стержня в миллиметрах, а сотые доли миллиметра отсчитываются по большой шкале.

Пределы измерения индикаторов определяются ходом измерительного стержня. Выпускаются индикаторы часового типа с пределами измерения от 0...2 мм до 0...25 мм. Допускаемая погрешность индикаторов нормирована двумя классами точности (0 и 1). Погрешность индикатора класса точности 0 с пределами измерения 0...2 мм не превосходит ± 10 мкм, а индикатора того же класса с пределами измерения 0...25 мм — не превышает ± 22 мкм.

Для закрепления индикаторов и установки измеряемых изделий поставляются вспомогательные приспособления: стойки, штативы, кронштейны.

Для повышения точности измерения применяют многооборотные индикаторы, измерительный механизм которых обеспечивает получение цены деления 0,001 и 0,002 мм.

Наивысшую, среди механических средств измерения геометрических размеров, точность обеспечивают пружинные измерительные головки. Эти головки не содержат кинематических пар с внешним трением; в качестве же передаточного механизма от измерительного стержня к стрелке используется закрученная в разные стороны металлическая лента или пружина. К пружинным измерительным головкам относятся микрометры, микаторы, миникаторы и оптикаторы. Допускаемая погрешность этих приборов оценивается величинами порядка десятых долей микрометра. Подробные сведения о механических средствах измерения можно найти в соответствующих стандартах и справочниках.

11.3. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ

Оптико-механическими называют средства измерения геометрических размеров, действие которых основано на использовании законов геометрической оптики (измерительные микроскопы, оптиметры) или явлений интерференции когерентных пучков света (интерференционные микроскопы, компараторы).

Распространенными приборами для линейных и угловых измерений в микроэлектронике и смежных отраслях являются измерительные проекторы и измерительные микроскопы.

Измерительные проекторы предназначены для проецирования теневого изображения (контура) изделий на экран и измерения их линейных и угловых размеров путем непосредственного сравнения теневого изображения с чертежом (исполненным в соответствующем масштабе) или вычерченным контуром изделия. Выпускаются проекторы с несколькими размерами экранов (от 250×250 мм, до 600×700 мм).

Стол проектора, на котором устанавливается изделие, имеет возможность перемещаться в продольном, поперечном направлениях и по вертикали. Перемещение стола отсчитывается по соответствующим шкалам с ценой деления 0,01...0,002 мм. Погрешность при измерении длин с помощью проектора не превышает $\pm(0,003...0,005)$ мм.

Некоторые типы современных проекторов снабжаются устройствами цифрового отсчета перемещения измерительного стола.

Измерительные микроскопы предназначены для измерений длин и углов различных деталей сложной формы в прямоугольной и полярной системах координат. Различают несколько типов микроскопов: малый микроскоп инструментальный; большой микроскоп инструментальный, а также универсальные микроскопы. Несмотря на конструктивные различия, принципиальная схема измерения во всех микроскопах общая — визирование различных точек деталей, перемещаемых для этого по взаимно перпендикулярным направлениям и измерение этих перемещений посредством микрометрических или иных отсчетных устройств. Для обеспечения лучшего визирования микроскопы снабжают сменными объективами различной степени увеличения.

Измерительный микроскоп состоит из основания, на котором укреплены две меры длины вдоль двух взаимно перпендикулярных осей координат, стола для закрепления измеряемого изделия и визирного микроскопа.

Измеряемое изделие устанавливается на столе микроскопа. Точки отсчета определяются по показаниям визирного микроскопа. При визировании ось микроскопа совмещается со штрихами на изделии или с его краями. Для этого перемещают стол с изделием или сам микроскоп относительно изделия. Перемещение соответствует измеряемой длине или расстоянию и определяется как разность между начальным и конечным положением стола. Для удобства работы выпускают измерительные микроскопы с цифровым отсчетом и внешней установкой показания на нуль. При отсчете начального показания от нуля результат измерения фиксируется на табло сразу, без пересчета.

11.4. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

Объекты угловых измерений весьма разнообразны по размерам, величинам измеряемых углов и требуемой точности измерения. Это обуславливает большое разнообразие методов и средств измерения углов, которые, однако, могут быть объединены в три группы.

Первая группа методов и средств объединяет приемы измерения углов с помощью так называемых «жестких мер» — угольников, угловых плиток, многогранных призм.

Вторую группу образуют гониометрические методы и средства измерений, у которых измеряемый угол сравнивают с соответствующим значением подразделения встроенной в прибор круговой или секторной шкалы.

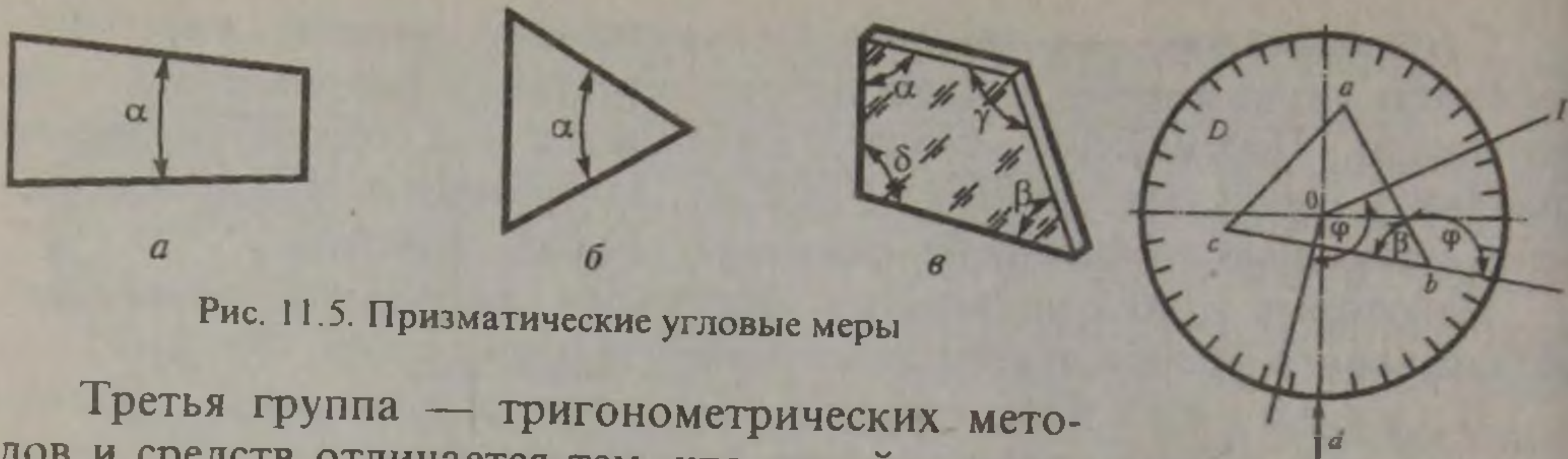


Рис. 11.5. Призматические угловые меры

Третья группа — тригонометрических методов и средств отличается тем, что мерой, с которой сравнивают измеряемый угол, является угол прямоугольного треугольника.

Рис. 11.6. Гониметрический метод измерения

Призматические угловые меры (рис. 11.5) изготавливают нескольких типов: плитки с одним рабочим углом, с четырьмя рабочими углами, шестигранные призмы с неравномерным угловым шагом. Угловые плитки выпускают в виде набора плиток, подобранных с таким расчетом, чтобы из них можно было составлять блоки с углами в пределах от 10 до 90°. По точности изготовления угловые меры относят к одному из трех классов точности (0; 1 и 2). Погрешность изготовления угловых мер первого класса $\pm 10''$, второго класса $\pm 30''$. Призматические угловые меры обладают свойством притираемости.

Принцип гониметрического метода измерения легко представить, если предположить, что измеряемое изделие abc жестко связано с угловой мерой — круговой шкалой D (рис. 11.6). В некотором положении относительно какой-либо плоскости I берут отсчет по неподвижному указателю d . Затем шкалу поворачивают до такого положения, когда сторона bc угла совпадает с плоскостью, в которой до поворота находилась сторона ab или с другой плоскостью, ей параллельной. После этого снова производят отсчет по указателю.

При этом лимб повернется на угол φ между нормальными к сторонам угла, равный разности отсчетов до и после поворота лимба. Если измеряемый угол β , то $\beta = 180^\circ - \varphi$.

К таким же результатам придем, если шкала с изделием останется неподвижной, а поворачиваться вокруг оси O будет указатель d , укрепленный на поворотном устройстве. Для повышения точности отсчета углов поворота в выпускаемых промышленностью угломерных приборах применяются угломерные нониусы и оптические устройства.

11.5. ИЗМЕРЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Шероховатостью поверхности называется совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине l (рис. 11.7).

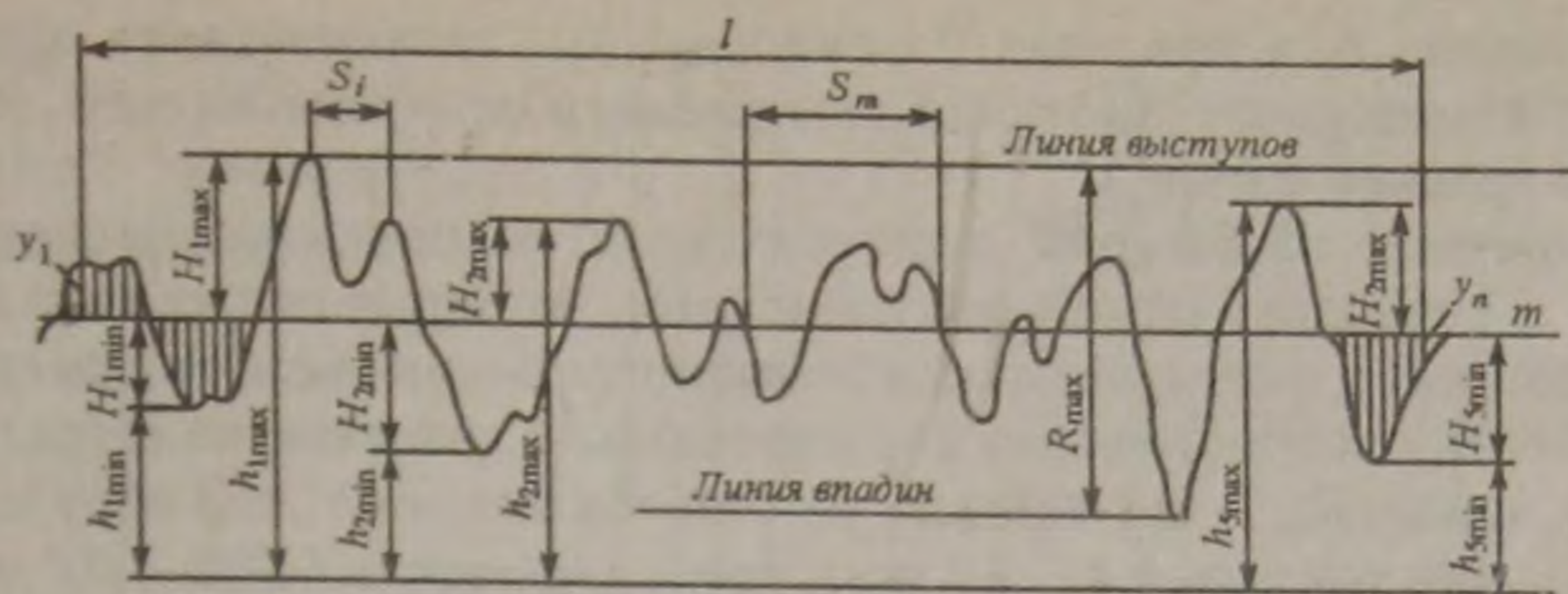


Рис. 11.7. Характеристики и параметры шероховатости

Шероховатость является одним из показателей качества поверхности и оценивается количественно стандартизованными параметрами. Базовая линия — линия заданной геометрической формы, проведенная определенным образом относительно профиля и служащая для оценки параметров шероховатости. Базовая линия, проведенная так, что в пределах ее длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально, называется средней линией m .

Стандартом установлены следующие параметры для количественного описания шероховатости.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx.$$

Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z — сумма средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов в пределах базовой длины

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| \right),$$

где $H_{i \max}$, $H_{i \min}$ — отклонения максимумов и минимумов профиля.

Наибольшая высота неровностей профиля R_{\max} — расстояние между линией выступов профиля и линией впадин в пределах базовой длины.

Средний шаг неровностей S_m — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины. Шагом неровностей профиля называется длина отрезка средней линии, пересекающего профиль в трех точках и ограниченного двумя крайними точками.

Средний шаг неровностей по вершинам S — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины.

Относительная опорная длина профиля l_p — отношение опорной длины профиля к базовой длине. Опорной длиной называется сумма

длин отрезков b_i в пределах базовой длины, отсекаемая на заданном уровне p в материале выступов измеряемого профиля линией, эквидистантной средней линии.

Конкретные параметры шероховатости, указываемые в конструкторской и технологической документации, выбираются из числа стандартизованных и определяются экспериментально на основе измерений.

Наиболее распространено нормирование и оценивание шероховатости по величине R_a . В зависимости от способа механической обработки R_a составляет при точении 0,4... 3,2 мкм, при шлифовании 0,025... 0,4 мкм.

Шероховатость поверхности оценивается визуально сравнением с образцами шероховатости, либо измеряется контактными или бесконтактными (оптическими) методами и приборами.

Образцы шероховатости поверхности (рис. 11.8) представляют собой бруски с плоской или цилиндрической поверхностью с известными значениями параметра шероховатости. Образцы шероховатости комплектуются в наборы, где на каждом образце указывается номинальное значение параметров шероховатости и способ механической обработки образца. Визуальное сравнение поверхностей изделия и образца дает удовлетворительные результаты только для относительно грубых поверхностей (0,6... 0,8 мкм и более).

Контактные методы измерения шероховатости основываются на последовательном ощупывании исследуемого профиля на заданной длине с помощью алмазной иглы (щупа). Перемещение иглы в вертикальном направлении повторяет профиль шероховатости и преобразуется в электрический сигнал, который усиливается и измеряется аналоговым или цифровым прибором. В качестве преобразователя перемещения в электрический сигнал

обычно используются индуктивные преобразователи (гл. 9).

Приборы, реализующие контактные методы измерения, называются профилометрами или профилографами (с записью профилограммы на носитель). Современные профилометры позволяют измерять параметр R_a в пределах 0,02...10 мкм с погрешностью не более 10... 15%.

Оптические методы измерения для получения информации о количественных характеристиках шероховатости используют известные оптические явления, на основе которых создаются соответ-

Направление неровностей	Схематическое изображение
Параллельное	
Перпендикулярное	
Перекрещивающееся	
Произвольное	
Кругообразное	
Радиальное	

Рис. 11.8. Образцы шероховатости поверхности

ствующие средства измерений. К оптическим средствам измерения относят: приборы светового и теневого сечения, интерферометры, муаровые микроскопы.

Все эти приборы позволяют наблюдать преобразованную и увеличенную картину сечения исследуемой поверхности и производить отсчеты величин для определения параметров R_z , R_{\max} , S и S_m . Рассмотрим принцип действия некоторых из оптических приборов.

В интерферометрах для получения информации о шероховатости используется явление интерференции света. Упрощенная оптическая схема интерферометра приведена на рис. 11.9.

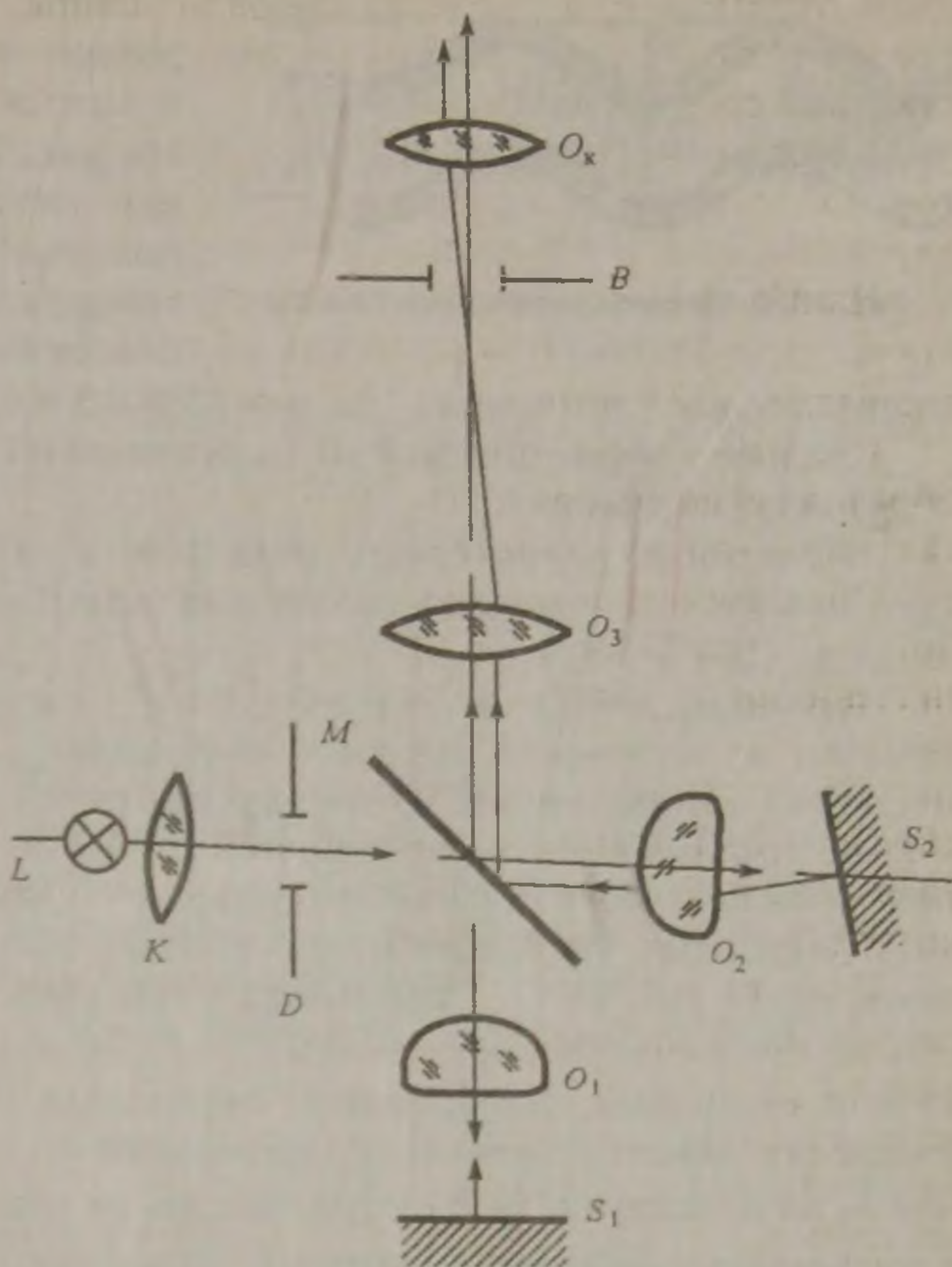


Рис. 11.9. Оптическая схема интерферометра

Свет от источника L проходит через конденсор K и диафрагму D и разделяется полупрозрачной пластиной M на два когерентных пучка. Один из пучков падает через микрообъектив O_1 на исследуемую поверхность S_1 , отразившись от которой снова попадает в объектив O_1 и фокусируется в плоскости B , являющейся фокальной плоскостью окуляра O_4 .

Второй пучок проходит разделительную пластину M и микрообъектив O_2 , падает на зеркало сравнения S_2 , наклоненное относительно оптической оси на небольшой угол. Объектив O_2 проецирует изображение зеркала сравнения S_2 также в плоскости изображения B . В результате сложения этих двух когерентных пучков света в плоскости B возникают интерференционные полосы, искривленные соответственно профилю исследуемой поверхности (рис. 11.10).

Изгибы интерференционных полос можно измерять на глаз или с помощью окулярного микрометра. Интерференционная картина может быть также сфотографирована.

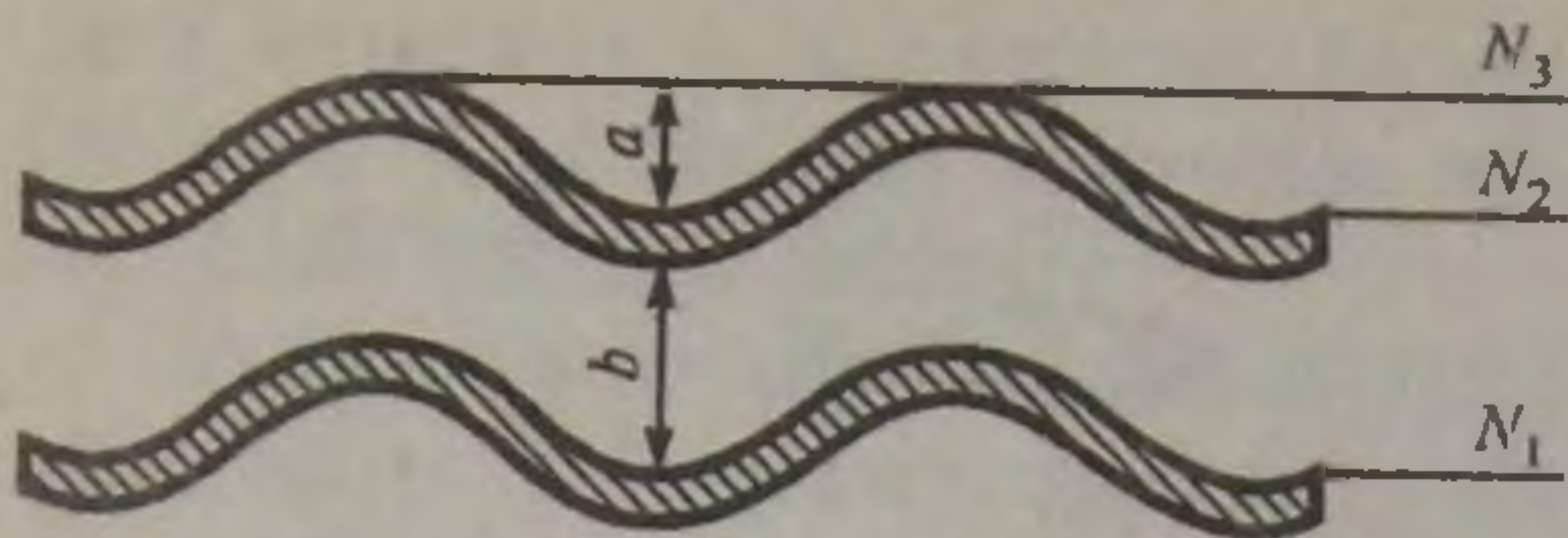


Рис. 11.10. Интерференционные полосы

(длина волны $\lambda = 0,6$ мкм), то $a = (2/3) \cdot 0,3 = 0,2$ мкм.

Среднее арифметическое из пяти значений величины искривления a определяет параметр R_z .

Измерение характерных размеров интерференционной картины производится с помощью окулярных микрометров при большом увеличении ($500\times$ и $700\times$).

Принцип действия приборов светового сечения основан на получении профиля изображения поверхности с помощью наклонно направленных к поверхности лучей. Приборы позволяют измерять средние высоты неровностей (от 80 до $0,8$ мкм). В конструкции приборов светового сечения предусмотрены два микроскопа, поэтому их часто называют двойными микроскопами. Метод светового сечения иллюстрирует рис. 11.11. Освещенная узкая щель проецируется микроскопом на ступенчатую поверхность $P_1 - P_2$. Направление падения света показано стрелками. Изображение светящейся щели на ступенчатой поверхности займет положение S_1 на верхней части ступеньки P_1 и положение S_2 на нижней части P_2 . Отразившись от поверхности, лучи попадают в микроскоп наблюдения, который расположен под углом 90° к оси про-

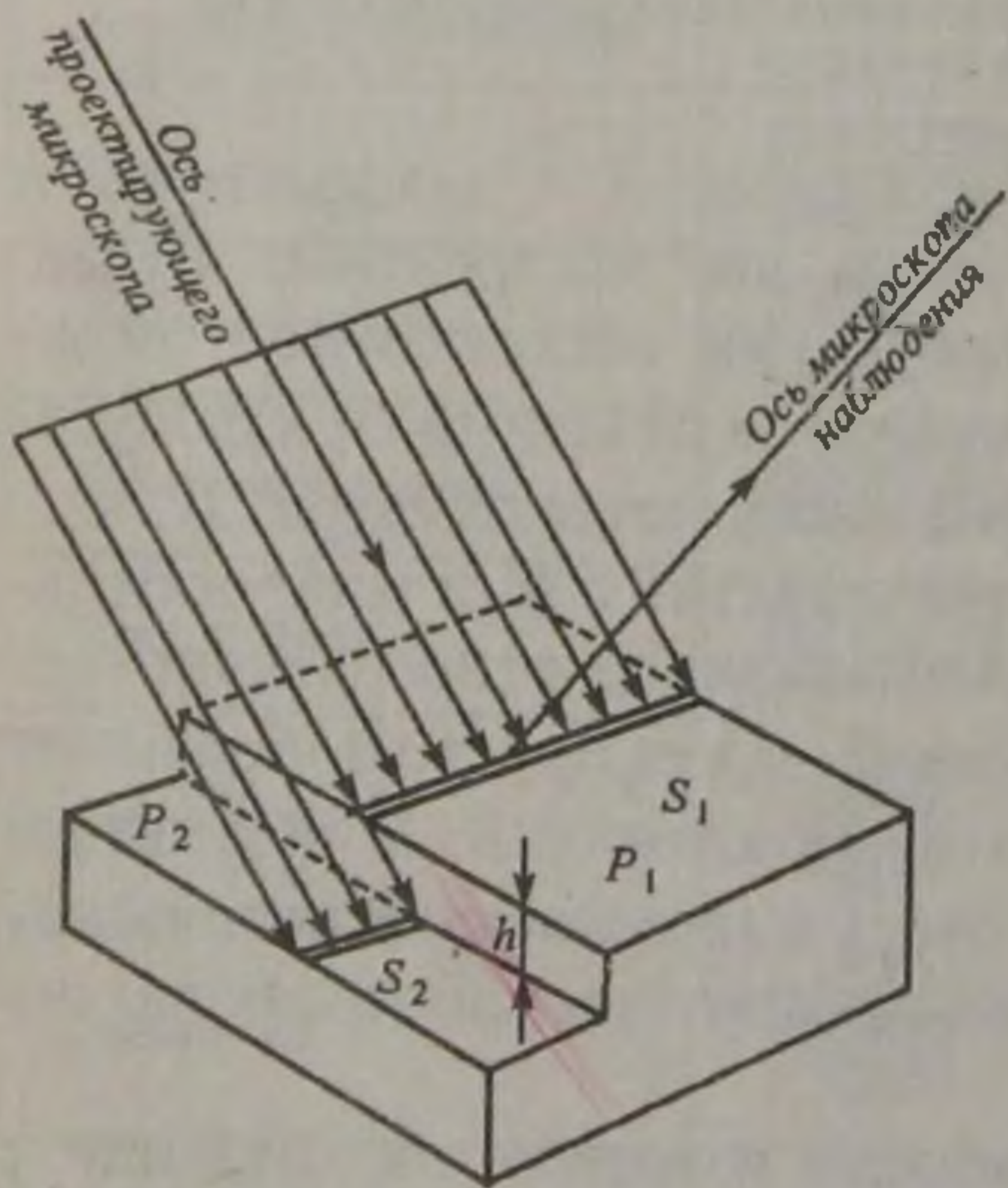


Рис. 11.11. Метод светового сечения

ецирующего микроскопа. В поле зрения микроскопа наблюдения изображение щели будет иметь вид, показанный на рис. 11.12. Смещение b изображения S_2'' относительно S_1'' определяется высотой ступеньки h . Смещение b отсчитывается оптическими окулярными микрометрами. Из рис. 11.12 следует, что

$$h = b / 2\Gamma_m \sin 45^\circ,$$

где Γ_m — общее увеличение прибора.

Действие приборов теневого сечения основано на аналогичном принципе. Только в них рассматривается тень, искривленная неровностями профиля исследуемой поверхности.

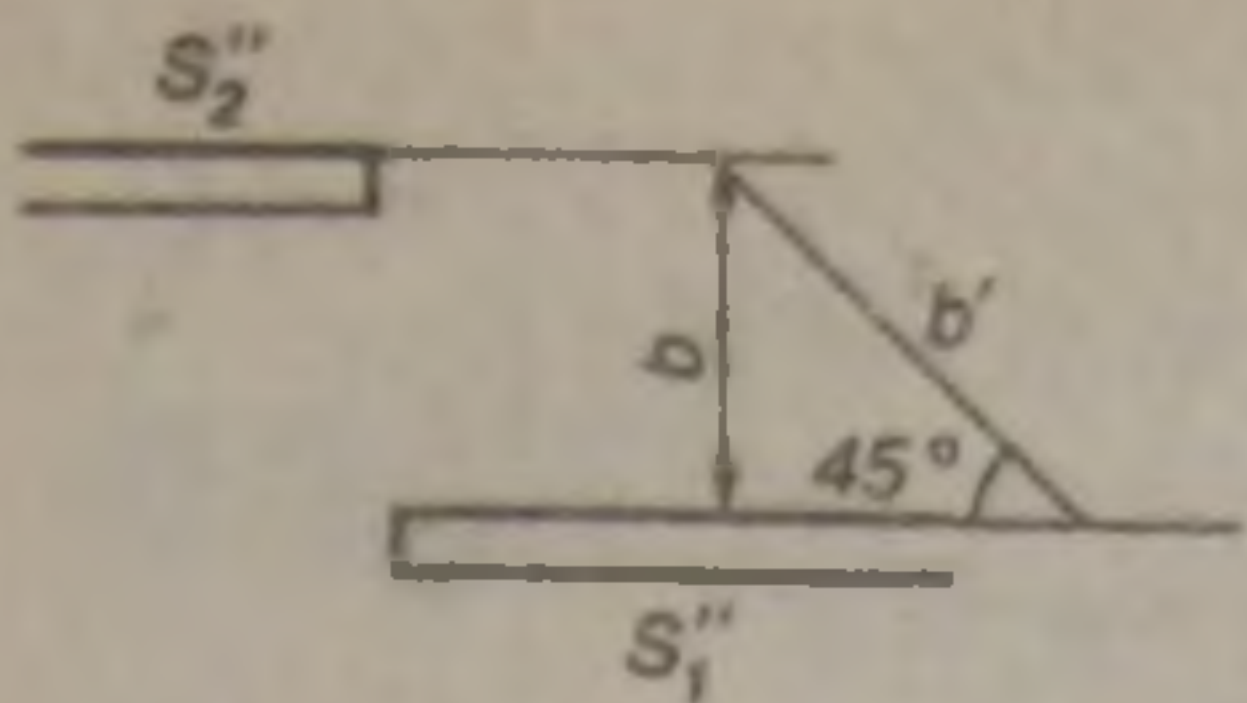


Рис. 11.12. К расчету смещения

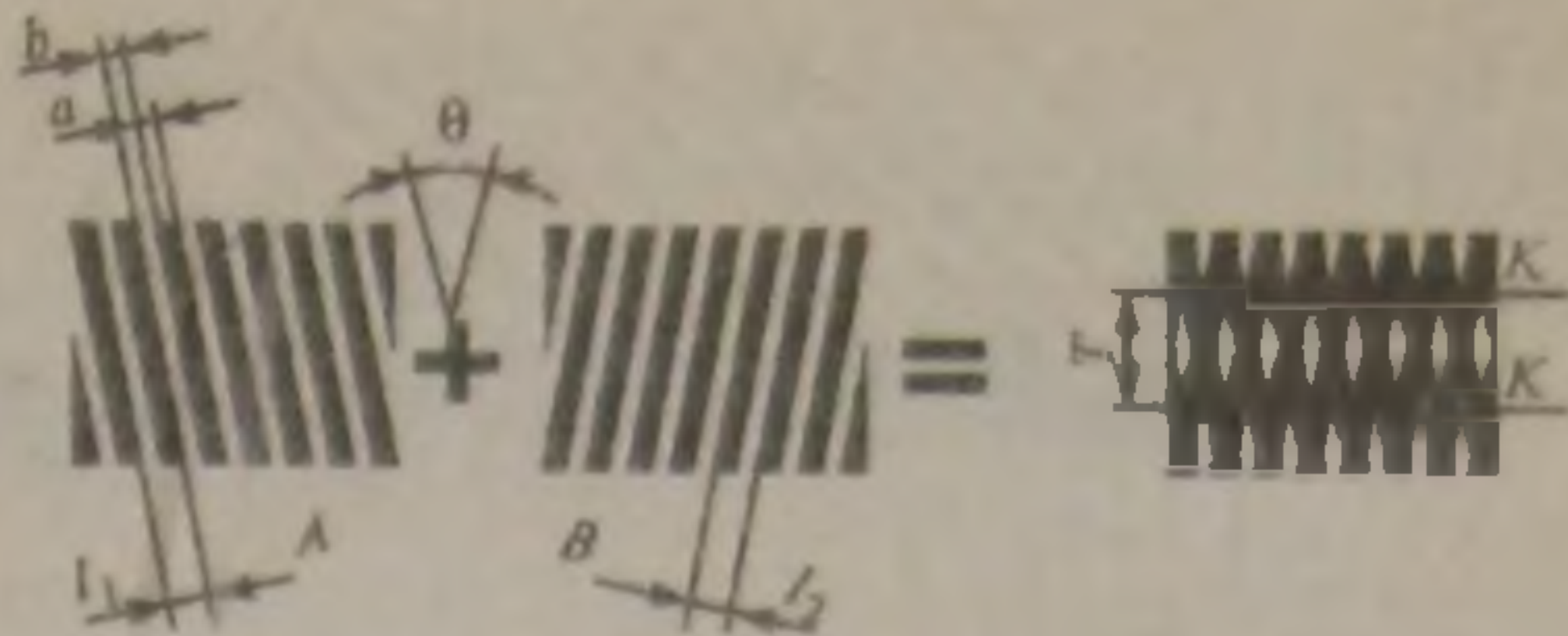


Рис. 11.13. Наложение растров A и B друг на друга

Растровый метод измерения применяется в муаровых микроскопах. Растрами называют совокупность расположенных на одинаковом расстоянии прямолинейных непрозрачных штрихов, разделенных прозрачными промежутками. Шагом раstra l называется расстояние, равное ширине a непрозрачного штриха плюс прозрачный промежуток b , т.е. $l = a + b$. Если взять два раstra A и B, имеющие одинаковые шаги l_1 и l_2 (рис. 11.13) и наложить их друг на друга так, чтобы плоскости штрихов обоих растров были разделены малым воздушным промежутком (порядка 0,1 мм), а направления штрихов составляли небольшой угол θ (порядка 2—3°), то будут видны муаровые полосы K. Эти полосы представляют собой пилообразные линии, образующиеся при смещении штрихов двух растров, которые воспринимаются глазом в виде сплошных линий. Расстояние T между полосами зависит от величины шага растров и угла θ

$$T = l/2\sin(\theta/2).$$

Или, при малости угла θ , $T \approx l/\theta$.

Смещение одного из растров в направлении, перпендикулярном к его штрихам, вызывает смещение всех муаровых полос. Если у одного из растров шаг неравномерен, то смещение (искривление) муаровых полос будет наблюдаться только в той зоне, где нарушена равномерность шагов, т.е. где шаги растров больше или меньше нормального.

Муаровые полосы и их искривления возникают не только при наложении двух растров друг на друга, но и в случае проекции одного из растров (исходного) в плоскость штрихов другого раstra (сравнения). Это явление и используют для измерения шероховатости. Для этого штрихи исходного раstra l (рис. 11.14) с помощью осветителя 6 и оптической системы 2 проецируют на исследуемую поверхность

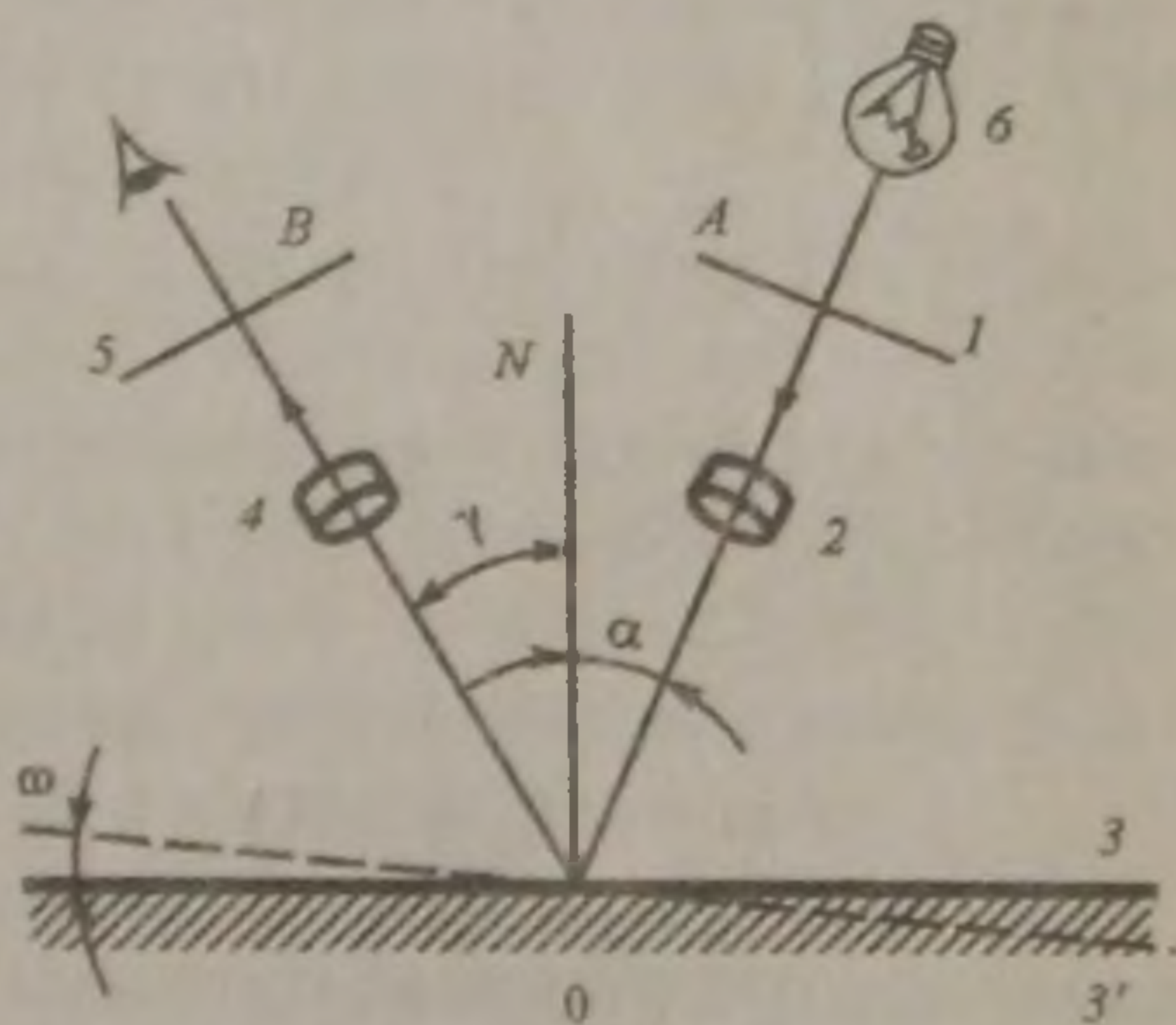


Рис. 11.14. Схема, положенная в основу растровых приборов для измерения неровностей

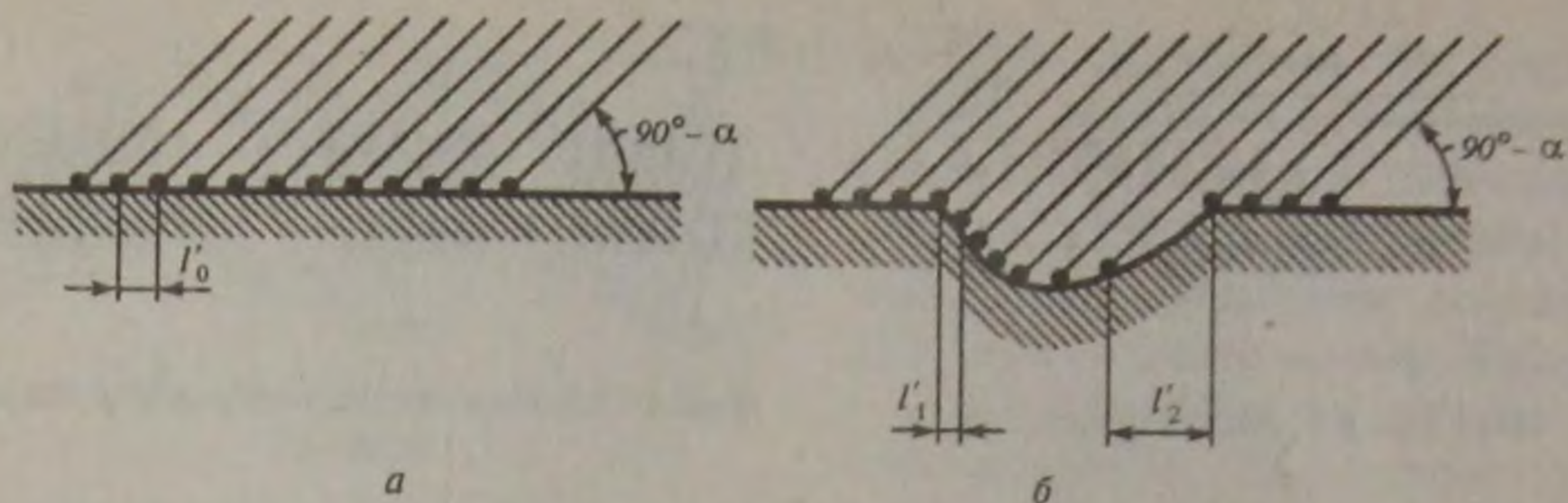


Рис. 11.15. Проецирование растров:
a — на гладкую поверхность; *б* — на поверхность, имеющую неровности

3 под углом α , а оптическая система 4 создает изображение исследуемой поверхности вместе со спроецированными на нее штрихами исходного растра в плоскости растра сравнения 5.

В местах, где штрихи растра проецируются на склоны неровностей исследуемой поверхности, обращенные к проецируемому пучку, расстояния между соседними штрихами l_1' будут меньше, чем нормальный шаг l_0' , а на противоположных склонах эти расстояния l_2' будут больше l_0' (рис. 11.15, *a*, *б*). Изменения расстояний пропорциональны высотам неровностей. Измеряя смещение муаровых полос можно рассчитать высоту неровности. Промышленностью выпускаются муаровые микроскопы, обеспечивающие измерения параметров R_z , R_{\max} в пределах 08...40 мкм с погрешностью не более 10...30%. Методика измерений и расчетные формулы приводятся в описании микроскопа.

Часть III

ОСНОВЫ КВАЛИМЕТРИИ И СТАНДАРТИЗАЦИИ

Глава 12

ИЗМЕРЕНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА

12.1. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В условиях рыночной экономики решающее значение приобретает конкурентоспособность продукции (изделия, услуги, процесса). Чтобы был спрос на то или иное изделие, оно должно обладать определенными потребительскими свойствами: исправно работать в соответствии со своим функциональным назначением, быть приемлемым по цене, удовлетворять требованиям безопасности, экологии, эстетики и пр.

Совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением, называют *качеством*.

Международный опыт показывает, что достигнуть высокого уровня качества можно лишь при условии проведения системы научных, технических и организационных мероприятий по управлению качеством продукции на всех стадиях ее жизненного цикла. Но для того чтобы управлять качеством, прежде всего необходимо уметь это качество оценить, а в идеальном случае — измерить.

К в а л и м е т р и я изучает вопросы оценивания качества. Само по себе обобщенное свойство, называемое качеством, не является физической величиной и в строгом метрологическом понимании не может быть измерено, поскольку не существует узаконенной меры этого свойства. Тем не менее на основе аналогий с измерениями физических величин в квалиметрии получены практические рекомендации по оцениванию качества, в том числе и количественному.

В разделе 1.2 отмечалось, что определить или измерить одну величину можно лишь сравнив ее с другой, известной величиной, принятой за единицу сравнения — меру. В метрологии такими мерами являются единицы физических величин. Аналогом физических величин в квалиметрии служат показатели качества. Следовательно, чтобы

оценить качество, нужно сравнить показатели качества продукции с показателями качества однородной продукции, принятой за образец. На основе сравнения можно сделать заключение о том, показатели качества какого из объектов сравнения выше, а это уже результат оценивания по шкале порядка. Если же удастся определить, на сколько выше или ниже, или во сколько раз выше или ниже, то качество будет оценено по шкале интервалов или по шкале отношений. Отсюда ясно, что в квалиметрии на первый план выступает проблема оценивания показателей качества.

Понятия «физическая величина» и «показатель качества» близки, но не тождественны. Физическая величина отражает объективные свойства природы, а показатель качества — общественную потребность в конкретных условиях. Так, масса — физическая величина, а масса изделия — показатель его транспортабельности; освещенность — физическая величина, а освещенность на рабочем месте — эргономический показатель.

Качество представляет собой сложное, многомерное свойство продукции, обобщенную характеристику множества ее потребительских свойств. Для целей же оценивания оно представляется упрощенной моделью, учитывающей лишь небольшое число определяющих качество компонент. По мере необходимости модель качества может совершенствоваться, в рассмотрение могут включаться новые свойства продукции, все более полно характеризующие качество. Не исключен и обратный путь — упрощения модели.

Так, моделью торта может быть выбрана модель, включающая четыре его свойства: вкус, структуру, цвет и форму. Но можно упростить модель до предела, оставив лишь две компоненты качества — вкус и форму. Понятно, что оценивание качества торта по четырем показателям качества более полно характеризует качество изделия. Рассмотрим свойства и правила формирования показателей качества. В зависимости от того, относятся ли показатели качества к категории физических величин, или к величинам нефизического характера (экономическим, гуманитарным, социальным и т.п.), показатели качества выражаются в единицах физических величин, либо в единицах назначаемых по соглашению (например, в баллах, по бальной шкале).

Показатели качества делятся на единичные и комплексные. *Единичные показатели* относятся к одному из свойств, определяющих качество; *комплексные* формируются из нескольких единичных показателей.

Комплексные показатели качества могут быть сформированы из единичных на основании известных функциональных зависимостей между ними, а могут представлять собой комбинацию из единичных, принятую по соглашению. Так, выбрав в качестве единичных показателей качества радиоаппаратуры напряжение питания U и потребляемый ток I ,

можно получить комплексный показатель — потребляемую мощность P , используя функциональную зависимость $P = UI$.

Примером комплексного показателя качества, принятого по соглашению, является коэффициент готовности аппаратуры, определяемый по формуле:

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b},$$

где T_o — наработка на отказ; T_b — среднее время восстановления.

В случае отсутствия объективной функциональной зависимости для формирования комплексных показателей качества, применяют субъективный способ — расчет комплексного показателя по принципу среднего взвешенного, используя одну из формул:

среднее арифметическое взвешенное

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n g_i Q_i;$$

среднее гармоническое взвешенное

$$\tilde{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{g_i}};$$

среднее геометрическое взвешенное

$$\bar{\bar{Q}} = \left(\prod_{i=1}^n Q_i^{g_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i}}.$$

Посредством весовых коэффициентов g_i учитывается важность или ценность (вес) каждого единичного показателя качества Q_i . Обычно наиболее важным считают показатели назначения, т.е. показатели, определяющие основные функции, для выполнения которых предназначена продукция. Задача определения весов показателей качества обычно решается исходя из условия:

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1.$$

Практикой выработаны следующие рекомендации:

среднее арифметическое взвешенное используется для вычисления комплексного показателя качества в том случае, когда объединяются однородные показатели, имеющие незначительный разброс;

при значительном разбросе показателей рекомендуется использовать среднее гармоническое взвешенное.

Наиболее универсальным приемом формирования комплексного показателя считают комплексирование по принципу среднего геометрического взвешенного. По этой схеме объединяют единичные показатели, когда они неоднородны (относятся к разнородной продукции или разным условиям ее применения) и имеют значительный разброс.

Если в состав комплексного показателя входят разнородные показатели качества, их необходимо выразить в относительной форме.

Пример. Проектируется стрелочный вольтметр с метрологическими характеристиками (заданными):

верхний предел измерения.....	$Q_1 = 1000 \text{ В}$	$g_1 = 0,2$
класс точности.....	$Q_2 = 1,0$	$g_2 = 0,6$
время успокоения подвижной части.....	$Q_3 = 4 \text{ с}$	$g_3 = 0,2$

Необходимо сформировать комплексный показатель качества вольтметра, характеризующий его метрологический уровень. Весовые коэффициенты g_i получены группой специалистов экспертов. В комплексный показатель объединяются разнородные единичные показатели. Их необходимо выразить в относительной форме. Для этого введем нормирующие значения показателей, приняв за нормирующие заданные значения показателей, тогда:

$$\frac{Q_1}{Q_{1н}} = \frac{1000}{1000} = 1; \quad \frac{Q_2}{Q_{2н}} = \frac{1,0}{1,0} = 1; \quad \frac{Q_3}{Q_{3н}} = \frac{4}{4} = 1.$$

Применив формулу среднего арифметического взвешенного, получим

$$Q_{отн} = 0,2 \cdot 1 + 0,6 \cdot 1 + 0,2 \cdot 1 = 1.$$

В дальнейшем, после изготовления опытных образцов вольтметра, разработчик будет иметь возможность сравнить комплексный показатель качества образца с заданным значением и, таким образом, оценить качество разработки.

При оценивании свойств продукции комплексным показателем качества не исключены попытки компенсировать низкие значения одних единичных показателей необоснованным завышением других. Для исключения такой возможности комплексный показатель качества домножают на *коэффициент вето*. Этот коэффициент обращается в нуль при выходе любого из важнейших единичных показателей за допустимые пределы и равен единице во всех остальных случаях. Благодаря этому, комплексный показатель качества падает до нуля, если хотя бы одно из важных свойств продукции недопустимо мало.

Полученные на основе единичных показателей, комплексные показатели качества можно продолжать объединять в комплексные показатели более высокого уровня. Таким образом, структура показателей качества является многоуровневой. При переходе к показателям более высокого уровня, модель качества продукции становится все более гру-

бой, пока не сведется к описанию качества одним единственным показателем — *обобщенным показателем*.

Комплексные показатели качества могут быть сформированы применительно к определенной группе свойств продукции. Такие показатели называются *групповыми*. Так, для промышленной продукции групповыми показателями качества, являются показатели назначения, надежности, безопасности и др.

Разновидностью комплексного показателя, позволяющего оценить качество с экономических позиций, является *интегральный показатель качества*. Его определяют как отношение суммарного полезного эффекта от использования продукции к величине затрат на ее создание и эксплуатацию. Примером интегрального показателя качества автомобиля могут служить удельные затраты на 1 км пробега

$$K_y = \frac{Z_c + Z_3}{L},$$

где Z_c и Z_3 — соответственно, себестоимость и затраты на эксплуатацию автомобиля до капитального ремонта; L — пробег автомобиля до капитального ремонта.

12.2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Для определения значений показателей качества могут быть использованы инструментальные и экспертные методы.

И н с т р у м е н т а л ь н ы е методы применяются в ограниченных случаях, когда показатели качества представляют собой физические величины и существуют измерительные инструменты (средства измерения), обладающие нормированными метрологическими характеристиками. Инструментальные определения показателей качества сводятся, таким образом, к решению обычных измерительных задач метрологии.

Э к с п е р т н ы е методы оценивания показателей качества применяют тогда, когда использование технических средств измерения, невозможно или экономически не оправдано. Экспертные методы используют, например, для оценивания эргономических и эстетических показателей, в спорте, в гуманитарных областях наук. Используются все виды измерительных шкал, вплоть до шкалы отношений.

Разновидностями экспертного метода являются органолептический и социологический методы.

Органолептический метод оценивания основан на определении свойств объекта с помощью органов чувств человека: зрения, слуха, осязания, обоняния и вкуса. Например, оценка качества чая дегустаторами.

Социологические методы строятся на массовых опросах населения или его групп, когда каждый индивидуум выступает в роли эксперта.

Общим для всех экспертных методов является представление о человеке-эксперте как о некотором «нетехническом» средстве измерения. При этом полагают, что меру соответствующего свойства человек создает в своем воображении. Основываясь на таком методологическом подходе, экспертные оценки показателей качества нередко называют результатом измерения, а саму процедуру оценивания — измерением качества. Верен ли этот подход и оправдано ли применение здесь термина «измерение»?

Прежде всего отметим, что человек не сохраняет свои способности к оцениванию постоянными. Он учится, набирается опыта, приспосабливается, подвергается внешним влияниям, помнит и забывает. Но возможно ли вообще «измерение» нематериальных величин «нетехническим» средством с неизвестными, изменяющимися свойствами, при отсутствии материально воспроизводимой единицы величины? С позиции определения понятия «измерения», принятого в метрологии (раздел 1.2.), ответ на этот вопрос может быть только отрицательным. Экспертные оценки это всего лишь результат грубого оценивания, но не измерения!

И, тем не менее, экспертные оценки потребительских свойств продукции, пока еще недоступных измерению, имеют важное прикладное значение, открывают возможность сравнения, классификации объектов по интенсивности оцениваемых свойств.

12.3. ФОРМИРОВАНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ ЭКСПЕРТНЫХ КОМИССИЙ

Экспертную оценку качеству продукции может дать один специалист, однако в целях повышения достоверности оценки предпочтение отдается групповому методу оценивания. Для обеспечения эффективности оценок должна тщательно подбираться и аттестовываться экспертная комиссия.

Основой для отбора кандидатов в экспертную комиссию является проверка их компетентности путем тестирования. Для этого каждому кандидату предлагается ответить на вопросы специальных анкет. Полученные ответы оцениваются по балльной шкале, и при удовлетворительных результатах кандидат включается в группу.

При формировании группы существенные затруднения связаны с проблемой обеспечения согласованности и независимости оценок экспертов. С одной стороны, группа может оказать серьезное давление на своих членов группы, вынуждая, например, одного из них соглашаться с большинством, даже если тот понимает, что точка зрения большинства ошибочна. С другой — наиболее влиятельные члены группы могут повлиять на общее мнение.

На завершающем этапе формирования комиссии целесообразно провести самооценку и взаимооценку экспертов. Самооценка заключается в том, что каждый из членов группы в строго ограниченное время отвечает на вопросы анкеты, сравнивает их с соответствующими ответами и, таким

образом, проверяет свои знания, давая себе оценку. Практика показывает, что экспертные группы с высокими самооценками реже ошибаются в оценке качества объектов. Взаимооценка производится по той же методике с той лишь разницей, что эксперты оценивают друг друга.

Все эти меры должны обеспечить необходимую согласованность мнений при оценивании свойств реальных объектов. Для проверки согласованности мнений m экспертов каждому из них предлагается дать оценку Q_i определенному свойству объекта. Если мнение аттестуемого эксперта не оказывается крайним (наибольшим или наименьшим) в полученном ряду оценок, то квалификационный уровень его можно считать соответствующим уровню комиссии. В противном же случае данную им оценку считают «противоречивой» групповому мнению при доверительной вероятности 0,95 (или $\alpha = 0,05$), если $Q_i - \bar{Q} > \beta S$, где \bar{Q} — среднее арифметическое значение оценки; S — среднее квадратическое отклонение индивидуальных оценок в группе.

Значение коэффициента β для $\alpha = 0,05$ принимают из табл. 12.1 в зависимости от количества членов группы.

Пример. В результате опроса десяти специалистов ($m = 10$) получены следующие индивидуальные оценки некоторого свойства:

$$Q_1 = 10, Q_2 = 8, Q_3 = 15, Q_4 = 11, Q_5 = 13, Q_6 = 12, Q_7 = 9, Q_8 = 10, Q_9 = 8, Q_{10} = 11.$$

$$\text{Групповая оценка } \bar{Q} = (10+8+15+11+13+12+9+10+8+11):10 = 10,7.$$

Оценим на противоречивость мнение третьего эксперта, оценка которого максимальна.

Расчет СКО дает $S = 4,9$. По табл. 12.1 при $\alpha = 0,05$ и $m = 10$ находим, что $\beta = 2,18$. Поскольку $15 - 10,7 < 4,9 \cdot 2,18$, то оценку третьего эксперта следует считать противоречивой с вероятностью 0,95.

Более глубокой является оценка согласованности мнений группы по коэффициенту конкордации W , представляющего собой общий коэффициент ранговой корреляции для группы.

Такая оценка производится по количественным оценкам некоторых свойств (факторов), оказывающих влияние на один конечный результат (качество).

Коэффициент конкордации рассчитывается по формуле

$$W = \frac{12S}{[m^2(n^3 - n)]},$$

где m — число экспертов в группе; n — число оцениваемых факторов.

Т а б л и ц а 12.1

Число экспертов в группе	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент β	1,15	1,46	1,67	1,82	1,94	2,03	2,11	2,18

В зависимости от степени согласованности мнений экспертов коэффициент конкордации может принимать значения от нуля (при отсутствии согласованности) до единицы (при полном единодушии). Для оценки значимости коэффициента конкордации необходимо и достаточно, чтобы

$$(n-1)mW > \chi^2.$$

Значение χ^2 принимают по таблице в зависимости от числа степеней свободы, $\gamma = n - 1$ и принятой доверительной вероятности [12].

Пример. Пяти экспертам было предложено проранжировать семь факторов, влияющих на технологический процесс. Результат ранжирования представлен в табл. 12.2.

Т а б л и ц а 12.2

Эксперт	Оцениваемый фактор						
	1	2	3	4	5	6	7
Первый	1	2	6	4	7	3	5
Второй	1	2	7	6	3	5	4
Третий	7	1	6	4	2	5	3
Четвертый	3	1	5	6	4	7	2
Пятый	1	2	6	4	5	7	3
Сумма рангов	13	8	30	24	21	27	17
Отклонение от средней суммы рангов	-7	-12	10	4	1	7	-3
Квадраты отклонений	49	144	100	16	1	49	9

В результате расчета получим: $СКО - S = 7,83$; коэффициент конкордации $W = 0,526$. Такой коэффициент конкордации оказывается значимым для $\alpha = 0,05$. Это дает основание утверждать, что существует не случайная согласованность в оценках экспертов.

Какова должна быть численность экспертной группы?

Теоретически, эффективность групповой оценки с увеличением количества экспертов возрастает. На практике же число экспертов в группе рекомендуется не менее 7 и не более 20 человек. Слишком малое число экспертов резко увеличивает недостоверность групповой оценки, слишком большое — не повышая, практически, эффективность этой оценки, приводит к ненужным дебатам.

12.4. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Мнения экспертов выясняются путем их индивидуального или группового опроса. При решении задачи оценивания перед ними могут быть поставлены следующие задачи.

1. Произвести ранжирование однородных объектов по степени выраженности заданного показателя качества.

2. Дать количественную оценку показателей качества продукции в условных единицах (долях единиц, баллах) или оценить веса этих показателей.

Рассмотрим обе задачи.

Для построения ранжированного ряда (т.е. шкалы порядка) обычно применяют способ попарного сопоставления объектов. Сначала объекты сопоставляются между собой попарно и для каждой пары результат сопоставления выражается в форме «больше – меньше», «лучше – хуже». Затем, на основании результатов попарного сопоставления, производится ранжирование.

Пример. Результат попарного сопоставления экспертом шести научно-исследовательских работ студентов, представленных на конкурс, приведен в табл. 12.3, где предпочтению i -й работы над j -й соответствует 1, а противоположному отношению 0. Необходимо расставить работы по качеству.

Т а б л и ц а 12.3

i	j						Итого
	1	2	3	4	5	6	
1		1	0	1	1	1	4
2	0		0	1	1	1	3
3	1	1		1	1	1	5
4	0	0	0		0	0	0
5	0	0	0	1		0	1
6	0	0	0	1	1		2

Решение. Ранжированный ряд (шкала порядка) имеет вид

$$Q_3 > Q_1 > Q_2 > Q_6 > Q_5 > Q_4,$$

где Q — оценка качества работы по шкале порядка.

Для количественной экспертной оценки показателей качества используют безразмерные шкалы — в долях единиц или баллах. Балльная шкала позволяет приписать объектам количественные характеристики, отражающие интенсивность того или иного свойства продукции, определяющего его качество. Основной характеристикой балльной шкалы является диапазон (балльность) шкалы — количество градаций, которое включает шкала, т.е. количество оценочных точек. Число градаций определяется характером решаемой задачи, квалификацией экспертов, требуемой достоверностью результата. В нашей стране приняты десяти-, двадцатипяти- и стобалльные шкалы. Исключение составляет пятибалльная шкала оценивания качества знаний в учебных заведениях.

Принцип построения балльной шкалы проиллюстрируем примером построения шкалы балльных оценок для отнесения продукции к определенной сортности. Для этого:

1. Устанавливают максимальную общую оценку продукции в баллах.
2. Каждому отдельному показателю качества, входящему в принятую модель качества продукции, эксперты присваивают определенный вес, устанавливая, таким образом, его роль в формировании качества.
3. Исходя из общей максимальной оценки, с учетом весов отдельных показателей, устанавливают балльную оценку каждого показателя качества.
4. Устанавливают скидки от показателей качества идеальной продукции, при различной степени снижения уровня качества. Например, если идеальное качество поверхности изделия оценивается в 7 баллов, то при наличии незначительных царапин оно снижается на 2 балла.
5. Определяют число степеней качества исходя из возможных балльных оценок соответствующего свойства. Например, могут быть приняты четыре степени качества: отличное, хорошее, удовлетворительное и плохое.

12.5. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Оценки, получаемые членами экспертной комиссии, обрабатывают с целью нахождения обобщенной оценки качества продукции. При ранжировании вначале необходимо проверить массив данных, полученных экспертами, на однородность.

Для проверки однородности массива данных рассчитывают суммарную оценку рангов:

$$R = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m R_{ij} \right)^2, \quad (12.1.)$$

где j — номер ранга; $j = 1, 2, 3, \dots, n$; n — число рангов; i — номер эксперта; $i = 1, 2, 3, \dots, m$; m — число экспертов; R_{ij} — ранги, присвоенные каждым экспертом.

Массив данных считается однородным, если $R \geq R_{кр}$.

Значение критической оценки суммы рангов $R_{кр}$ находят по табл. 12.4, рассчитанной для уровня значимости 0,05.

Если согласованность данных достаточная, то по оценкам отдельных экспертов находят обобщенную оценку в виде обобщенной ранжировки:

$$R_j = \sum_{i=1}^m R_{i1}; \dots \sum_{i=1}^m R_{im}.$$

Если согласованность данных недостаточная, то эксперты должны быть ознакомлены с полученными результатами, приняты меры к повышению их квалификации и экспертиза проведена повторно.

Значение критической оценки находят умножением числа, найденного в поле таблицы при заданных n и m , на множитель, помещенный в нижней строке таблицы.

Таблица 12.4

Число экспертов	Количество рангов						
	3	4	5	6	7	8	9
2	6,6	1,2	2,2	3,6	5,0	7,1	9,7
3	12,6	2,6	4,7	7,6	11,1	15,8	21,6
4	21,7	4,5	8,1	13,3	19,7	28,1	38,4
5	33,1	6,9	12,4	20,8	30,8	43,8	60,0
6	47,0	9,8	17,6	30,0	44,4	63,1	86,5
7	63,0	13,1	23,8	40,7	60,5	85,0	115,0
8	81,7	17,0	29,8	48,3	73,2	105,0	145,0
9	102,6	21,4	37,5	60,9	92,8	135,0	185,0
10	126,1	26,3	46,2	75,0	113,8	160,0	225,0
Множитель	10	100	100	100	100	100	100

Пример. Мнения пяти экспертов о семи объектах экспертизы выражены следующим образом:

первый эксперт	$Q_5 < Q_3 < Q_2 < Q_1 < Q_6 < Q_4 < Q_7$
второй эксперт	$Q_5 < Q_3 < Q_2 < Q_6 < Q_4 < Q_1 < Q_7$
третий эксперт	$Q_3 < Q_2 < Q_5 < Q_1 < Q_6 < Q_4 < Q_7$
четвертый эксперт	$Q_5 < Q_3 < Q_2 < Q_1 < Q_4 < Q_6 < Q_7$
пятый эксперт	$Q_5 < Q_3 < Q_1 < Q_2 < Q_6 < Q_4 < Q_7$

Т р е б у е т с я: по сумме рангов каждого объекта экспертизы построить ранжированный ряд, являющийся результатом группового оценивания; определить веса членов ряда.

Р е ш е н и е 1. Для проверки однородности массива рассчитаем суммарную оценку рангов по (12.1); получим $R = 17956$. По табл. 12.4 определим $R_{кр} = 3080$. Условие $R > R_{кр}$ выполняется. Массив считаем однородным.

2. Найдем сумму рангов для каждого объекта.

Сумма рангов

для Q_1 $4 + 6 + 4 + 4 + 3 = 21$;

для Q_2 $3 + 3 + 2 + 3 + 4 = 15$;

для Q_3 $2 + 2 + 1 + 2 + 2 = 9$;

для Q_4 $6 + 5 + 6 + 5 + 6 = 28$;

для Q_5 $1 + 1 + 3 + 1 + 1 = 7$;

для Q_6 $5 + 4 + 5 + 6 + 5 = 25$;

для Q_7 $7 + 7 + 7 + 7 + 7 = 35$.

Отсюда следует, что результат группового оценивания $Q_5 < Q_3 < Q_2 < Q_1 < Q_6 < Q_4 < Q_7$.

3. Для нахождения весов коэффициентов найдем сумму рангов всех объектов; она равна 140. Тогда весовые коэффициенты

$$g_1 = \frac{21}{140} = 0,15; \quad g_2 = \frac{15}{140} = 0,11; \quad g_3 = \frac{9}{140} = 0,06; \quad g_4 = \frac{28}{140} = 0,2;$$

$$g_5 = \frac{7}{140} = 0,05; \quad g_6 = \frac{25}{140} = 0,18; \quad g_7 = \frac{35}{140} = 0,25; \quad \sum_{i=1}^7 g_i = 1.$$

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА СТАНДАРТИЗАЦИИ

13.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ
В ОБЛАСТИ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Понятие стандартизация охватывает широкую область общественной деятельности, включающую в себя научные, технические, хозяйственные, экономические, юридические, эстетические и политические аспекты. Во всех странах повышение эффективности производства, улучшение качества продукции, рост жизненного уровня связаны с широким применением различных форм и методов стандартизации. Правильно поставленная стандартизация способствует развитию специализации и кооперирования производства, успешной сертификации продукции.

В Российской Федерации действует Государственная система стандартизации (ГСС), объединяющая и упорядочивающая работы по стандартизации на всех уровнях производства и управления на основе комплекса государственных стандартов. ГСС включает в себя стандарты, содержащие совокупность взаимосвязанных правил и положений, определяющих основные понятия, цели и задачи стандартизации; организацию и методику планирования и проведения работ по стандартизации; порядок разработки, внедрения и обращения стандартов и других нормативно-технических документов по стандартизации; порядок внесения в них изменений; контроль за внедрением и соблюдением стандартов; объекты стандартизации; категории и виды стандартов; правила построения, изложения, оформления и содержания стандартов и др.

Основные понятия и термины в области стандартизации разработаны с учетом рекомендаций международных организаций по стандартизации и приняты многими странами.

Стандартизация — установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении условий эксплуатации (использования) и требований безопасности. Стандартизация основывается на объединенных достижениях науки, техники и передового опыта и определяет основу не только настоящего, но и будущего развития и должна осуществляться неразрывно с прогрессом.

Приведенное определение показывает многогранность деятельности по стандартизации. Из него, в частности, следует, что, будучи направленной на разработку обязательных для исполнения норм, правил и требований к продукции, стандартизация должна обеспечить возможно полное удовлетворение интересов производителя и потребителя, повышение производительности труда, экономное расходование материалов, энергии, рабочего времени и гарантировать безопасность при производстве и эксплуатации.

Объектами стандартизации являются изделия, нормы, правила, требования, методы, термины, обозначения и т.п., имеющие перспективу многократного применения в науке, технике, промышленности, сельском хозяйстве, строительстве, на транспорте и в связи, в культуре, здравоохранении, других сферах деятельности, а также в международной торговле.

В последние десятилетия имело место распространение стандартизации также на область управленческой и организационно-методической деятельности. В зависимости от формы руководства стандартизацией и сферы действия стандартов различают государственную, национальную и международную стандартизацию.

Государственная стандартизация — форма развития и проведения стандартизации, осуществляемая под руководством государственных органов по единым Государственным планам стандартизации.

Национальная стандартизация — проводится в масштабе государства без государственной формы руководства.

Международная стандартизация — проводится специальными международными организациями или группой государств с целью облегчения взаимной торговли, научных, технических и культурных связей.

Особое место в международной стандартизации занимают работы, проводимые странами-членами СНГ и в интересах их развития и экономической интеграции.

Устанавливаемые при стандартизации нормы оформляются в виде нормативно-технической документации по стандартизации — стандартов и технических условий.

Стандарт — нормативно-технический документ по стандартизации, устанавливающий комплекс норм, правил, требований к объекту стандартизации и утвержденный (принятый) компетентными органами. Стандарт разрабатывается на основе достижений науки, техники, передового опыта и должен предусматривать решения, оптимальные для общества. Стандарт может быть разработан как на материальные предметы (продукцию, сырье, образцы веществ), так и на нормы, правила, требования к объектам организационно-методического и общетехнического характера, порядок разработки документов, нормы безопасности, системы управления качеством, правила и порядок сертификации и др.

Технические условия (ТУ) — нормативно-технический документ по стандартизации, устанавливающий комплекс требований к конкретным типам, маркам, артикулам продукции. Технические условия являются неотъемлемой частью комплекта технической документации на продукцию, на которую они распространяются.

13.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Стандартизация направлена на достижение следующих основных целей: ускорение технического прогресса; повышение эффективности общественного производства и производительности труда (в том числе инже-

нерного и управленческого); улучшение качества продукции и обеспечение его надлежащего уровня; совершенствование организации управления и установление рациональной номенклатуры выпускаемой продукции; развитие специализации в области проектирования и производства продукции; рациональное использование производственных фондов; экономию материальных и трудовых ресурсов; обеспечение охраны здоровья населения и безопасности труда; развитие международного экономического, технического и культурного сотрудничества; создание условий для развития экспорта товаров, отвечающих требованиям мирового рынка.

В соответствии с поставленными целями, задачами и направлениями стандартизации являются:

– установление требований к качеству готовой продукции на основе стандартизации ее качественных характеристик, а также характеристик сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий;

– разработка и установление единой системы показателей качества продукции, методов и средств контроля, испытаний и сертификации продукции, а также необходимого уровня надежности изделий с учетом их назначения и условий эксплуатации;

– установление норм, требований и методов в области проектирования и производства с целью обеспечения оптимального качества и исключения нерационального многообразия видов, марок и типоразмеров продукции;

– развитие унификации промышленной продукции как важнейшего условия специализации производства, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, повышения уровня взаимозаменяемости, эффективности эксплуатации и ремонта изделий;

– обеспечение единства и достоверности измерений в стране, создание государственных эталонов единиц физических величин и совершенствование методов и средств измерений высшей точности;

– установление единых систем документации, в том числе унифицированных, используемых в автоматизированных системах управления, установление систем классификации и кодирования технико-экономической информации, разработка форм и систем организации производства;

– установление систем стандартов в области обеспечения безопасности труда, охраны природы и улучшения использования природных ресурсов.

13.3. ВИДЫ И МЕТОДЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Наряду со стандартизацией, осуществляемой в масштабах государства, в РФ широко используются:

о т р а с л е в а я с т а н д а р т и з а ц и я, осуществляемая в отдельных отраслях промышленности с целью обеспечения единства тех-

нических требований и норм к продукции отрасли и создания условий для кооперации и специализации в этой отрасли.

Под *отраслью* понимается совокупность предприятий и организаций независимо от их территориального расположения и ведомственной принадлежности, разрабатывающих и (или) изготавливающих определенные виды продукции, относящиеся к номенклатуре продукции, закрепленной за министерством (ведомством), являющимся ведущим в ее производстве (например, приборостроение, промышленность средств связи);

местная стандартизация, проводимая на предприятиях (объединениях) и устанавливающая требования, нормы и правила, применяемые только на данном предприятии.

В зависимости от последующего влияния на развитие производства можно выделить три вида стандартизации, принципиально отличающихся подходом к установлению в стандартах соответствующих норм:

стандартизация по достигнутому уровню, устанавливающая показатели, отражающие свойства существующей и освоенной в производстве продукции, и таким образом фиксирующая достигнутый уровень производства. Такой подход характерен при стандартизации показателей качества продукции массового производства межотраслевого применения (радиокомпоненты, реле, крепежные изделия, некоторые виды сырья и материалов и др.);

опережающая стандартизация, заключающаяся в установлении повышенных по отношению к уже достигнутому на практике уровню норм, требований к объектам стандартизации, которые согласно прогнозам будут оптимальными в последующее время. При этом в зависимости от реальных условий в стандартах могут устанавливаться ступени качества, имеющие дифференцированные показатели, нормы, характеристики и сроки их введения.

Таким образом, опережающая стандартизация ставит определенные задачи перед разработчиками и изготовителями продукции, побуждая их к совершенствованию объектов стандартизации (конструкций, сырья, материалов, технологических процессов), повышению производительности труда и улучшению качества.

При стандартизации конкретных видов промышленной продукции, состоящей из большого числа деталей, узлов, агрегатов, задачей является установление таких требований к ней и ее компонентам (норм, показателей, характеристик), которые обеспечивали бы необходимый для потребителя высокий уровень качества конечного изделия. Понятно, что стандартизация показателей и характеристик конечного изделия может быть проведена на основе существующих стандартов, отражающих достигнутый уровень производства входящих в него материалов, деталей, сборочных единиц и др. Однако при подобном подходе к стандартиза-

ции возможности целенаправленного управления качеством конечного изделия и получения оптимальных решений ограничены;

комплексная стандартизация, при которой для оптимального решения конкретной проблемы осуществляется целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимосвязанных требований как к самому объекту комплексной стандартизации в целом, так и к его основным элементам. Являясь одним из важнейших направлений в работах по стандартизации, комплексная стандартизация призвана обеспечивать разработку и внедрение комплексов взаимосвязанных и согласованных стандартов, охватывающих совокупность требований к объектам стандартизации: изделиям, их составным частям, сырью, материалам, покупным изделиям, технологии изготовления, упаковке, транспортировке и хранению, эксплуатации и ремонту. Кроме норм и требований, относящихся к материальным объектам, комплексная стандартизация охватывает также общетехнические нормы, системы документации, нормы техники безопасности и охраны труда и т.п.

Примерами объектов комплексной стандартизации являются аппаратура и оборудование для радиовещания и телевидения, аппаратура проводной связи, аппаратура записи и воспроизведения звука и т.п. Основанная на системном подходе, комплексная стандартизация создает благоприятные условия для развития соответствующих отраслей промышленности.

К современным методам осуществления комплексной стандартизации относится разработка программ комплексной стандартизации наиболее важных видов продукции в масштабах страны, отрасли, территории.

В зависимости от метода решения основной задачи различают несколько форм стандартизации.

Симплификация — форма стандартизации, заключающаяся в простом сокращении числа применяемых при разработке изделия или при его производстве марок и сортаментов материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий и т.п. до количества, технически и экономически целесообразного, достаточного для выпуска изделий с требуемыми показателями качества. Как правило, при симплификации в объекты стандартизации не вносят каких-либо существенных технических усовершенствований. Являясь простейшей формой и начальной стадией более сложных форм стандартизации, симплификация оказывается экономически выгодной, так как приводит к упрощению производства, облегчает материально-техническое снабжение, складирование, отчетность.

Унификация — рациональное уменьшение числа типов, видов и размеров объектов одинакового функционального назначения. Объектами унификации наиболее часто являются отдельные изделия, их составные части, детали, комплектующие изделия, марки материалов и т.п. Проводится унификация на основе анализа и изучения конструктивных вари-

антов изделий, их применяемости, путем сведения близких по назначению, конструкции и размерам изделий, их составных частей и деталей к единой типовой (унифицированной) конструкции. При необходимости в конструкцию унифицируемых изделий и их элементов вносят технические усовершенствования и доработки. Таким образом устанавливается минимально необходимое для практики число типов, видов и типоразмеров изделий, обладающих высокими показателями качества и полной взаимозаменяемостью.

В настоящее время унификация является наиболее распространенной и эффективной формой стандартизации. Конструирование аппаратуры, машин и механизмов с применением унифицированных элементов позволяет не только сократить сроки разработки и уменьшить стоимость изделий, но и повысить их надежность, сократить сроки технологической подготовки и освоения производства.

Типизация — это разновидность стандартизации, заключающаяся в разработке и установлении типовых решений (конструктивных, технологических, организационных и т.п.) на основе наиболее прогрессивных методов и режимов работы. Применительно к конструкциям типизация состоит в том, что некоторое конструктивное решение (существующее или специально разработанное) принимается за основное — базовое для нескольких одинаковых или близких по функциональному назначению изделий. Требуемая же номенклатура и варианты изделий строятся на основе базовой конструкции путем внесения в нее ряда второстепенных изменений и дополнений.

Типизация технологических процессов включает в себя создание типовых процессов изготовления деталей, выполнения сборочных операций, методов измерения и контроля и т.п. Типовой технологический процесс создается на основе тщательного анализа технологии производства соответствующих изделий.

Агрегатирование — метод создания новых машин, приборов и другого оборудования путем компоновки конечного изделия из ограниченного набора стандартных и унифицированных узлов и агрегатов, обладающих геометрической и функциональной взаимозаменяемостью.

Возможность многократного применения элементов набора в различных модификациях машин и приборов одного класса или близких по назначению обеспечивает конструктивную преемственность при создании новых изделий, позволяет использовать освоенные в производстве узлы и агрегаты, значительно сокращает трудоемкость проектирования, изготовления и ремонта изделий, повышает уровень взаимозаменяемости продукции, способствует специализации предприятий, механизации и автоматизации производственных процессов, улучшает качество продукции, а также облегчает перестройку производства при переходе предприятий на освоение новой продукции.

13.4. КАТЕГОРИИ И ВИДЫ СТАНДАРТОВ

Стандарты в РФ являются обязательными в пределах установленной сферы их действия и подразделяются на следующие категории:

- государственные стандарты — ГОСТ;
- отраслевые стандарты — ОСТ;
- стандарты предприятий — СТП.

Государственные стандарты обязательны к применению всеми предприятиями, организациями и учреждениями во всех отраслях хозяйства. Они распространяются преимущественно на объекты межотраслевого применения, нормы, параметры, требования, показатели качества продукции, термины, обозначения и др., необходимые для обеспечения единства и взаимосвязи различных областей науки и техники, производства, а также на продукцию массового и крупносерийного производства широкого и межотраслевого применения. В частности, объектами государственной стандартизации должны быть:

общетехнические и организационно-методические правила и нормы (ряды номинальных частот и напряжений электрического тока, предпочтительные числа, требования охраны природной среды, рационального использования природных ресурсов и др.);

общие требования к продукции, имеющей межотраслевое применение (по устойчивости к воздействиям внешней среды, радиационной стойкости и др.);

основные эксплуатационные свойства и технические характеристики групп однородной продукции, имеющей межотраслевое применение (сырья, материалов, машин, приборов) и методы их контроля;

межотраслевые требования и нормы техники безопасности и производственной санитарии;

научно-технические термины, определения и обозначения;

единицы физических величин, государственные эталоны единиц физических величин, методы и средства поверки средств измерений, нормы точности и методики выполнения измерений, правила государственных испытаний средств измерений;

системы конструкторской, технологической, управленческой документации, формы и системы организации производства;

системы классификации и кодирования технико-экономической информации.

Государственные стандарты утверждает комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт РФ).

Отраслевые стандарты обязательны для всех предприятий и организаций данной отрасли, а также для предприятий и организаций других отраслей, применяющих (потребляющих) продукцию этой отрасли. Отраслевые стандарты организационно-методического характера, обяза-

тельны только для предприятий и организаций министерства (ведомства), их утвердившего.

Отраслевые стандарты устанавливают требования к продукции, не относящейся к объектам государственной стандартизации и необходимые для обеспечения взаимосвязи в производственно-технической и организационно-управленческой деятельности предприятий и организаций отрасли. В частности, объектами отраслевой стандартизации могут быть: изделия серийного и мелкосерийного производства; конкретные виды продукции, общие технические характеристики для которой установлены государственными стандартами; детали и сборочные единицы, технологическая оснастка и инструменты, сырье, материалы, полуфабрикаты, технологические нормы и типовые технологические процессы внутриотраслевого применения; нормы точности и методики выполнения измерений.

Отраслевые стандарты могут ограничивать применение государственных стандартов для используемой в отрасли номенклатуры изделий, типоразмеров и т.п. При этом, однако, технические характеристики продукции, включенные в отраслевой стандарт, не могут быть ниже, чем в государственном стандарте.

Отраслевые стандарты утверждает министерство, являющееся ведущим в производстве данного вида продукции.

Стандарты предприятия обязательны только для предприятия, утвердившего данный стандарт. Стандарты предприятия могут распространяться на составные части разрабатываемых или изготавливаемых на предприятии изделий; внутренние нормы и правила в области управления и организации производства, управления качеством продукции; оснастку и инструмент, типовые технологические процессы, методики измерений и контроля.

Стандарты предприятия могут также ограничивать, с учетом особенностей данного предприятия, применение номенклатуры деталей, узлов, материалов, установленной стандартами других категорий. На поставляемую предприятием продукцию стандарты предприятия не разрабатываются.

В зависимости от назначения и содержания Государственная система стандартизации устанавливает на продукцию стандарты всех категорий следующих видов:

- общих технических условий;
- общих технических требований (технических требований);
- параметров и (или) размеров;
- типов, основных параметров и (или) размеров;
- конструкции и размеров;
- марок;
- сортамента;
- правил приемки;

методов контроля (испытаний, анализа, измерений);
правил маркировки, упаковки, транспортирования и хранения;
правил эксплуатации и ремонта;
типовых технологических процессов.

Общетехнические и организационно-методические стандарты (на общие нормы, показатели качества, методы расчета и проектирования, термины и определения, единицы физических величин, системы классификации и кодирования, требования к поставке, требования к изготовлению и др.) на виды не подразделяются.

13.5. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Результаты стандартизации оцениваются теми изменениями, которые она внесла в хозяйственную деятельность, в развитие научно-технического прогресса. Для того чтобы эти изменения были положительными, т.е. чтобы стандартизация была эффективной, при ее проведении необходимо соблюдение определенных принципов. Рассмотрим основные из этих принципов и их краткие характеристики.

Целенаправленность и технико-экономическая целесообразность: проведение работ по стандартизации, разработка любого стандарта должны быть обоснованы (потребностями изготовителя, потребителя, ожидаемым технико-экономическим эффектом и др.) и направлены на решение конкретных задач на соответствующих уровнях производства и управления (государство, отрасль, предприятие).

Научный подход и использование передового опыта: показатели, нормы, характеристики и требования, включаемые в стандарт, должны соответствовать передовому уровню науки и техники и основываться на результатах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Поэтому разработка всех видов и категорий стандартов должна вестись с учетом и использованием научных достижений в соответствующих областях, а в необходимых случаях разработке стандартов должно предшествовать проведение научно-исследовательских работ.

Прогрессивность и оптимальность стандарта следует из самой сущности стандартизации, отраженной в ее определении. Новые стандарты на продукцию должны не только отвечать современным запросам, но и учитывать тенденции развития соответствующих отраслей.

В стандартах наряду с типами и видами продукции, серийное и массовое производство которых освоено, должны быть предусмотрены новые, более прогрессивные нормы и требования к продукции, опережающие достигнутый уровень производства, устанавливаемые на основе обязательного использования проверенных на практике отечественных и зарубежных открытий и изобретений.

При разработке стандартов необходимо стремиться получить оптимальное сочетание устанавливаемых показателей, норм и требований к

продукции с затратами на их достижение, обеспечить *максимальный экономический эффект при минимальных затратах*.

Необходимость взаимной увязки стандартов вытекает из основных целей и задач стандартизации. Показатели, нормы, характеристики, требования, устанавливаемые в стандартах, разрабатываемых в РФ, должны также соответствовать международным стандартам и учитывать рекомендации международных организаций.

Комплексность стандартизации является одним из основных принципов. Практика стандартизации привела к двум направлениям ее осуществления: от частного к целому; от целого к частному.

Первому направлению соответствует развитие стандартизации снизу вверх: от стандартизованного сырья к готовой продукции, от стандартизованных общих конструктивных деталей и элементов к машинам, приборам, аппаратам. Оно характерно для тех изделий общего применения, которые изготавливают на специализированных заводах массового производства (электронные приборы, провода, крепежные и установочные изделия, шестерни и др.).

Второе направление характеризует развитие стандартизации сверху вниз, т.е. от стандартизации основных параметров сложных объектов производства (приборов, систем, машин) к стандартизации составляющих их элементов (агрегатов, узлов, деталей). Понятно, что гарантией стабильного высокого качества конечного изделия здесь может быть только комплексная стандартизация, проводимая в соответствии с приведенным ранее определением.

Функциональная взаимозаменяемость стандартизованных изделий — это свойство независимо изготовляемых деталей и сборочных единиц занимать свое место в изделии без дополнительной обработки. Функциональная взаимозаменяемость предполагает не только возможность нормальной сборки, но и нормальную работу изделия после установки в нем новой детали или другой составной части взамен вышедшей из строя. Стандарты на продукцию в необходимых случаях должны устанавливать нормы и требования, обеспечивающие функциональную взаимозаменяемость изделий.

Принцип предпочтительности используется при проведении унификации, типизации и разработке стандартов на изделия широкого применения, решении задач рационального выбора и установления градаций количественных значений параметров изделий (размеров, номиналов, масс и др.) и должен основываться на использовании рядов предпочтительных чисел.

Установление на их основе рядов параметров (параметрических рядов), с одной стороны, препятствует неоправданному расширению номенклатуры и типоразмеров вновь создаваемых изделий, а с другой, позволяет установить такие технико-экономические характеристики изделий, которые соответствуют современным требованиям, и учесть перспективы развития соответствующих видов продукции.

В РФ действует система предпочтительных чисел ИСО, устанавливающая предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел (ряды R). Применяются также предпочтительные числа, построенные по рядам, принятым Международной электротехнической комиссией (ряды E).

Требования научно-технического прогресса и обеспечения конкурентоспособности продукции вынуждают производителей продукции разрабатывать и выпускать все более совершенные изделия одного и того же функционального назначения. Избежать неоправданно большой номенклатуры этих изделий и обеспечить согласование между собой их параметров и размеров возможно лишь на основе стандартов параметров и размеров. Сущность «параметрической» стандартизации и состоит в том, что параметры и размеры изделий массового производства устанавливаются по определенным правилам, применяя ряды предпочтительных чисел.

В общем случае, при построении рядов предпочтительных чисел руководствуются следующими принципами:

ряды должны представлять рациональную систему градаций, отвечающую потребностям производства и эксплуатации;

быть бесконечными как в сторону малых, так и в сторону больших значений, т.е. допускать неограниченное развитие параметров или размеров в направлении их уменьшения или увеличения;

включать все десятичные значения любого числа и единицу;

быть простыми и легко запоминающимися.

Специальные исследования показали, что этим требованиям наилучшим образом удовлетворяют ряды, построенные по геометрической прогрессии. Менее удобны, но применяются также ряды на основе арифметической прогрессии.

В арифметической прогрессии разность между ее соседними членами постоянна. Любой член арифметической прогрессии можно вычислить по формуле

$$a_n = a_1 + d(n - 1),$$

где a_1 — первый член прогрессии; d — разность прогрессии; n — номер члена.

Так, последовательность чисел 1, 2, 3, 4, ... представляет собой арифметическую прогрессию, возрастающую с разностью 1. Последовательность чисел 1; 0,9; 0,8; ... — арифметическая прогрессия, убывающая с разностью 0,1.

Обладая простотой, ряды предпочтительных чисел, построенные по арифметической прогрессии, имеют существенный недостаток — неравномерность ряда, что и ограничивает их применение. Так, в возрастающей последовательности, приведенной выше, второй член ряда превышает первый на 100%, десятый больше девятого на 11%, а сотый больше девяносто девятого всего на 1%. В результате большие числа следуют

друг за другом с очень малыми интервалами (слишком часто), что не всегда рационально и экономически оправдано.

Чтобы преодолеть этот недостаток, используют ступенчатые ряды, составленные из отрезков арифметических рядов с различными разностями.

Если в ряде, построенном по арифметической прогрессии, постоянной является разность прогрессии, то в ряде, построенном на основе геометрической прогрессии, постоянен знаменатель прогрессии, т.е. отношение последующего члена ряда к предыдущему

$$\varphi = a_{n+1} / a_n.$$

Таким образом, каждый последующий член ряда является произведением предыдущего члена на знаменатель ряда φ .

Любой i -й член геометрической прогрессии можно вычислить по формуле

$$a_i = a_1 \varphi^{i-1}.$$

Так, например, при $a_1 = 1$ и $\varphi = 2$ получим ряд 1, 2, 4, 8, 16, ..., а при $\varphi = 1,6$ ряд 1; 1,6; 2,5; 6,3; ...

Ряды, построенные на основе геометрической прогрессии, обладают следующими свойствами:

произведение или частное любых из двух его членов является членом ряда;

любой член ряда, возведенный в целую положительную степень, также является членом этого ряда.

Отсюда следует, что зависимости, определяемые из произведений членов ряда или их степеней, всегда подчиняются закономерностям этого ряда. Так, например, если длина сторон прямоугольника выбрана из ряда предпочтительных чисел, то его площадь будет членом данного ряда.

Международной организацией по стандартизации (ИСО) рекомендовано для построения рядов предпочтительных чисел на основе геометрической прогрессии использовать ряды, в которых происходит десятикратное увеличение каждого m -го члена. Наиболее удобными для практики признаны ряды, у которых $a_1 = 1$ и $\varphi = \sqrt[m]{10}$ (ряды ИСО). Стандартом установлено четыре основных ряда предпочтительных чисел, обозначаемых $R_5, R_{10}, R_{20}, R_{40}$, значения φ для которых соответственно равны:

$$R_5 \dots \varphi = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$$

$$R_{10} \dots \varphi = \sqrt[10]{10} \approx 1,25$$

$$R_{20} \dots \varphi = \sqrt[20]{10} \approx 1,12$$

$$R_{40} \dots \varphi = \sqrt[40]{10} \approx 1,06.$$

Таблицы рядов предпочтительных чисел, приведенные в стандарте, содержат числа в диапазоне от 0 до ∞ , полученные для значений a_1 , лежащих в интервале $1 < a_1 \leq 10$. Для перехода от чисел, приведенных в таблицах в любой другой десятичный интервал, необходимо умножить соответствующее число на 10^k , где k — целое положительное или отрицательное число.

Так, при $k = 1$ все числа ряда перейдут в интервал $10 < a \leq 100$, а при $k = -1$, в интервал $0,1 < a \leq 1$.

В стандартизации используются также производные ряды, которые образуются из основных путем отбора каждого второго, третьего, или, в общем случае, каждого n -го члена ряда. Так, например, ряд, обозначенный как $R40/5$, включает в себя каждый пятый член ряда $R40$.

При стандартизации параметров и размеров допускается применение ступенчатых рядов, т.е. рядов, составленных из отрезков рядов с разными знаменателями.

В электро- и радиотехнике кроме рядов R применяют ряды E , построенные в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии. Для этих рядов $\varphi = \sqrt[m]{10}$, $m = 3, 6, 12, 24$. Примером применения рядов E могут служить ряды номинальных значений емкости конденсаторов и сопротивлений резисторов.

13.6. ОРГАНЫ И СЛУЖБЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ

В РФ функционирует система органов и служб стандартизации, проводящих работы по стандартизации (в том числе и в области метрологии и метрологического обеспечения) на всех уровнях управления хозяйством. Система построена по территориально-отраслевому принципу и включает в себя:

- государственные органы стандартизации и их службы;
- органы и службы стандартизации в отраслях народного хозяйства;
- территориальные органы и службы стандартизации.

Основные положения, регламентирующие номенклатуру и структуру органов и служб стандартизации в стране, их компетенцию устанавливает ГОСТ «Государственная система стандартизации. Органы и службы стандартизации».

Органом государственного управления, осуществляющим руководство стандартизацией и метрологией в стране, является Госстандарт РФ. Он несет ответственность за состояние и дальнейшее развитие стандартизации и за проведение единой технической политики в области стандартизации, сертификации и метрологии в стране.

Главными задачами Госстандарта РФ являются:

- определение основных направлений развития и разработка научно-методических и технико-экономических основ стандартизации, сертификации, метрологии;

стандартизация основных показателей качества продукции, общих требований к ее разработке, производству, приемке и методам испытаний, организация работы по аттестации и сертификации качества промышленной продукции в стране;

развитие унификации промышленных изделий как важнейшего условия специализации, комплексной механизации и автоматизации производства;

обеспечение единства и достоверности измерений в стране, укрепление и развитие государственной метрологической службы и эталонной базы, создание новых и совершенствование существующих методов и средств измерений высшей точности;

стандартизация методов и средств измерений, контроля и испытаний, а также значений физических констант, аттестация стандартных образцов веществ и материалов;

организация и проведение государственных испытаний средств измерений;

государственный надзор за соблюдением стандартов и технических условий, за состоянием и применением измерительной техники в отраслях хозяйства.

В соответствии с этими задачами Госстандарт РФ выполняет следующие функции:

разрабатывает проекты перспективных и годовых планов государственной стандартизации (и представляет их на утверждение или утверждает), рассматривает и согласовывает проекты планов отраслевой и территориальной стандартизации;

осуществляет методическое руководство и координирует деятельность министерств и ведомств в области стандартизации и сертификации;

разрабатывает и утверждает важнейшие стандарты и другие нормативно-технические документы по стандартизации межотраслевого значения, утверждает государственные стандарты;

устанавливает единицы физических величин, допускаемые к применению в стране, разрабатывает, утверждает и хранит государственные эталоны физических величин;

представляет в установленном порядке Российскую Федерацию в международных организациях по вопросам стандартизации и метрологии.

Руководство работами по стандартизации, сертификации и их координацию Госстандарт РФ осуществляет непосредственно или через свои научно-исследовательские институты, территориальные органы, а также через отраслевые головные и базовые организации по стандартизации.

Институты Госстандарта разрабатывают научно-технические, методические, экономические и правовые основы стандартизации и метрологического обеспечения, подготавливают предложения по ком-

плексной и межотраслевой стандартизации, разрабатывают проекты стандартов и др.

Территориальные органы охватывают всю территорию страны и реализуют функции и права Госстандарта РФ на закрепленной за ними территории.

Структура территориальных органов включает в себя:

территориальные управления Госстандарта РФ;

центры метрологии и стандартизации Госстандарта РФ (ЦМС);

областные (территориальные) лаборатории государственного надзора за соблюдением стандартов и измерительной техникой Госстандарта РФ.

Центры метрологии и стандартизации несут ответственность за научно-методическое обеспечение развития стандартизации и метрологии на закрепленных территориях, проводят научные исследования и осуществляют функции и права лабораторий государственного надзора Госстандарта РФ на этих территориях.

Областные лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой отвечают за состояние и развитие стандартизации и метрологического обеспечения на предприятиях и в организациях, расположенных на территории области.

Территориальным органам Госстандарта РФ предоставлено право контроля за внедрением и соблюдением стандартов и состоянием измерительной техники на предприятиях и в организациях, расположенных на закрепленной территории независимо от их ведомственной подчиненности.

Обязанности информационного обеспечения в области стандартизации и метрологии возложены на органы и службы стандартизации Госстандарта РФ, министерств и ведомств.

Госстандарт РФ ежегодно издает указатели «Государственные стандарты РФ», содержащие перечни зарегистрированных в его органах государственных стандартов и технических условий, информацию об их изменениях, а также перечни иностранных и международных стандартов.

Непосредственное научно-методическое руководство работами по развитию системы научно-технической информации в области стандартизации осуществляет Научно-исследовательский институт технической информации, классификации и кодирования Госстандарта РФ.

В существующем Государственном информационном фонде стандартов и технических условий проводится учет и государственная регистрация стандартов и технических условий: фонд учитывает и хранит отечественную и зарубежную нормативно-техническую документацию; обеспечивает предприятия, организации и учреждения зарегистрированными стандартами и техническими условиями по их разовым запросам. Комплектование фондов стандартов и технических условий в органах

научно-технической информации по стандартизации предприятий и организаций производится централизованно, через магазины-коллекторы Госстандарта РФ.

Информацию об отраслевых стандартах и обеспечение ими заинтересованных предприятий и организаций всех отраслей народного хозяйства осуществляют министерства (ведомства), утвердившие эти стандарты.

Службы стандартизации предприятий организуют информацию заинтересованных подразделений о действующих стандартах и технических условиях, их изменениях, осуществляют регистрацию стандартов предприятия, обеспечивают подразделения необходимой нормативно-технической документацией по стандартизации.

13.7. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ И ОТРАСЛЕВЫЕ СИСТЕМЫ СТАНДАРТОВ НА ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ НОРМЫ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

На основе комплексной стандартизации в РФ разработаны и успешно функционируют системы стандартов, каждая из которых охватывает определенную сферу деятельности.

Нормативно-техническую и организационно-методическую основу производства конкретных видов, типов, групп продукции составляют отраслевые системы стандартов, регламентирующие технические характеристики, требования к качеству и надежности изделий, способы и методы достижения и контроля этих требований и др. Отраслевые системы включают также комплексы стандартов на термины, определения и обозначения, применяемые в отрасли.

К отраслевым системам относится, например, система стандартизации изделий электронной техники. За основу разработанной системы стандартов (государственных и отраслевых) приняты сферы их действия: проектирование, производство, применение и эксплуатация. В соответствии с этим принципом в систему стандартизации электронных приборов входят комплексы стандартов: на конструкции и размеры приборов; на классы приборов; на сферу проектирования приборов; на сферу производства приборов; на сферу применения приборов; на поставку приборов; на организационно-методическую документацию.

Стандарты на конструкции приборов включают габаритные и присоединительные размеры, соответствующие международным рекомендациям на корпуса, на технические требования, конструкцию и размеры упаковки.

В комплекс стандартов на классы электронных приборов входят стандарты на термины и определения, системы обозначений, системы параметров, ряды параметров, методы измерений и руководство по применению.

Определяющим стандартом, относящимся к сфере проектирования, является «Положение о порядке проведения НИР и ОКР».

В сфере производства в отраслях, как правило, используются единые государственные системы стандартов. Единые государственные системы стандартов обеспечивают единообразие и эффективность проведения важнейших видов работ, общих для различных отраслей хозяйства. К подобным системам относятся Государственная система стандартизации (ГСС), Единая система конструкторской документации (ЕСКД), Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП), Единая система технологической документации (ЕСТД), Единая система классификации и кодирования технико-экономической информации, Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ), Государственная система стандартов безопасности труда (ГССБТ) и др. Рассмотрим некоторые из них.

Единая десятичная система классификации и кодирования технико-экономической информации. Огромные масштабы производства в стране, технический прогресс промышленности и связанное с этим увеличение потоков информации требуют оперативной ее обработки для планирования, учета и эффективной координации деятельности предприятий и отраслей. Этой цели служит общегосударственная автоматизированная система сбора и обработки информации на базе государственной системы вычислительных центров и единой автоматической сети связи страны.

Работа АСУ требует применения машинного языка, т.е. перевода технико-экономической информации на язык цифровых кодов. Для этого создана Государственная система классификации и кодирования, включающая комплекс взаимосвязанных общесоюзных классификаторов промышленной и сельскохозяйственной продукции, конструкторской документации и технологический классификатор.

Под системой классификации объектов технико-экономической информации понимают совокупность правил, определяющих распределение объектов по классам (классификационным группам) на основании общих признаков, присущих объектам данного рода и отличающих их от других. В основу классификации закладывается логическая последовательность признаков, при этом процесс кодирования предмета существенно упрощается, так как осуществляется в однозначном соответствии с принятой системой классификации.

Кодирование технико-экономической информации на основе системы классификации позволяет непосредственно по коду объекта судить о его характеристиках (конструктивных, технологических, эксплуатационных). Система классификации и кодирования обеспечивает четкую систематизацию всех объектов по их техническим и экономическим характеристикам с присвоением каждому объекту единого кода.

Государственная система классификации и кодирования объектов технико-экономической информации и ее стандартизация создают необходимые предпосылки для унификации и агрегатирования, способству-

ют развитию специализации производства, значительно сокращают номенклатуру выпускаемых промышленностью изделий, упрощают систему материально-технического снабжения благодаря сокращению номенклатуры заказов оборудования, запасных частей и инструмента.

Комплексы стандартов, составляющие системы классификации и кодирования, обеспечивают единообразие методов классификации и кодирования экономической информации, устанавливают единство кодовых обозначений и создают условия для стандартизации технической документации.

В стране действует Общесоюзный классификатор промышленной и сельскохозяйственной продукции (ОКП). Он представляет собой систематизированный свод кодов и наименований выпускаемой продукции, иначе говоря, ОКП — это своеобразный словарь, предназначенный для кодирования продукции (изделий) цифровыми кодами для последующей машинной обработки.

Основой ОКП является Единая десятичная система классификации промышленной и сельскохозяйственной продукции (ЕДСКП). В классификации принят принцип последовательной конкретизации классификационных группировок. Все множество продукции подразделяется на 10 классов в соответствии с отраслями производства (однородностью производственного процесса) и конкретизируется по свойствам и назначению продукции. Затем каждый класс подразделяется на 10 подклассов, каждый подкласс — на 10 групп, каждая группа — на 10 подгрупп и каждая подгруппа — на 10 видов. Каждый вид может включать до 9999 конкретных наименований продукции (путем простого перечисления или использования дополнительных признаков классификации). Перечисленные пять ступеней деления продукции, образующие высшие классификационные группы, используют для кодирования групповой номенклатуры продукции.

Класс объединяет высшие классификационные группы и конкретные виды продукции, характеризуемые комплексом однородных признаков независимо от принадлежности этой продукции к той или иной отрасли. Например, в самостоятельные классы выделена продукция тяжелого машиностроения (класс 41), продукция станкостроения (класс 47) и т. д., поэтому, какая бы отрасль народного хозяйства не производила эти изделия, их будут классифицировать по соответствующему классу.

Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эта система устанавливает для всех предприятий и организаций страны порядок проектирования, единые правила выполнения и оформления чертежей и ведения чертежного хозяйства, что упрощает проектно-конструкторские работы, способствует повышению качества и уровня взаимозаменяемости изделий и облегчает чтение и понимание чертежей. Используя ЕСКД, можно применять ЭВМ для проектирования и обработки технической документации. ЕСКД способствует развитию кооперирования

промышленности и использованию при проектировании новых изделий, отдельных частей и деталей ранее созданных конструкций.

Весь комплекс утвержденных стандартов «Единая система конструкторской документации» включает свыше 200 стандартов, из которых основополагающими являются:

ГОСТ 2.001, 2.101...2.121. Основные положения (виды изделий, виды конструкторской документации, стадии разработки, требования к чертежам и т. д.);

ГОСТ 2.201. Классификация и обозначение изделий в конструкторских документах;

ГОСТ 2.301...2.317. Общие правила выполнения чертежей;

ГОСТ 2.401...2.427. Правила выполнения чертежей различных изделий;

ГОСТ 2.501...2.503. Правила обращения конструкторских документов (учет, хранение, дублирование, внесение изменений);

ГОСТ 2.601...2.603. Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации;

ГОСТ 2.701...2.792. Правила выполнения схем;

ГОСТ 2.801...2.857. Правила выполнения строительных документов и документов для судостроения;

прочие стандарты.

Большое значение имеет ГОСТ 2.116 ЕСКД — Карта технического уровня и качества продукции, в которой зафиксированы достигнутый и перспективный уровни качества изделий, а также показатели лучших отечественных и зарубежных аналогов. Эту карту используют для оценки изделий при их аттестации, сертификации или определении целесообразности их дальнейшей модернизации или снятия с производства.

Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП). Важнейшим этапом обеспечения качества продукции является технологическая подготовка производства (ТПП). В процессе изготовления изделий производится доводка их качества. Современному объекту производства свойственно значительное количество изменений и модификаций конструкции и технологии изготовления, т.е. практически работы по технологической подготовке не прекращаются до смены объекта производства. Подготовка производства является непрерывным процессом.

В технологической подготовке производства есть круг общих вопросов, не зависящих от отраслевой принадлежности предприятий, например методы технологической классификации и кодирования деталей, сборочных единиц, технологических процессов, оборудования, оснастки, инструмента, формы конструкторской и технологической документации (с учетом возможности применения вычислительной техники) и др.

Единая система подготовки производства включает комплекс стандартов, устанавливающих современные методы и средства организации

управления и решения задач технологической подготовки производства, и решает следующие задачи:

- технологический анализ изделия;
- организационно-технологический анализ производства;
- планирование, учет и управление ТПП;
- разработка комплекса технологических процессов;
- построение системы контроля качества;
- проектирование и изготовление средств производства;
- разработка нормативной базы производства;
- отладка технологических процессов, оборудования и оснастки.

Как единая система, ЕСТПП выдвигает ряд требований к другим общетехническим и отраслевым системам, таким, как классификация и кодирование элементов ТПП; построение системы информации; типизация и стандартизация средств и технологических процессов основного и вспомогательного производства; стандартизация правил оформления технологической и организационно-технической документации. Последнее регламентируется стандартами Единой системы технологической документации (ЕСТД).

Единая система технологической документации представляет собой комплекс государственных стандартов, устанавливающих:

- формы документации общего назначения (маршрутная карта технологического процесса, сводная поддетально-технологическая спецификация, карта эскизов, схем и наладок и др.);
- правила оформления технологических процессов и формы документации для процессов литья, раскроя и нарезания заготовок, механической и термической обработки, сварочных работ, процессов, специфичных для отраслей радиотехники, электроники и др.

Существует тесная связь между ЕСТД и ЕСКД. Эти системы играют большую роль в улучшении управления производством, повышении его эффективности, во внедрении автоматизированных систем управления и т. д.

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). На современном этапе научно-технического прогресса измерительная информация нужна практически во всех областях человеческой деятельности: научной; производственной; экономической; международного сотрудничества. Правильные, точные и достоверные измерения обеспечивают соответствие выпускаемой продукции требованиям стандартов, техническим условиям и другой нормативно-технической документации. Таким образом, измерения лежат в самой основе производства и в огромной мере определяют возможность получения качественной продукции.

Массовость измерений, огромное разнообразие измеряемых физических величин, методов и средств измерений, применяемых в народном хозяйстве, потребовали разработки в рамках ГСС единой системы

метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции, научных исследований и других видов деятельности во всех отраслях хозяйства.

Напомним, что понятие «метрологическое обеспечение» определяется как «установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений». При этом единство измерений означает такое их состояние, при котором результаты измерений выражены в узаконенных единицах, и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Основными целями и конечным результатом метрологического обеспечения являются:

- повышение качества продукции, эффективности управления производством и уровнем автоматизации производственных процессов;

- обеспечение взаимозаменяемости деталей, узлов и агрегатов, создание необходимых условий для кооперирования производства и развития специализации;

- повышение эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, экспериментов и испытаний;

- обеспечение достоверного учета и повышение эффективности использования материальных ценностей и энергетических ресурсов;

- повышение эффективности мероприятий по профилактике, диагностике и лечению болезней, нормированию и контролю условий труда и быта людей, охране окружающей среды, оценке и рациональному использованию природных ресурсов;

- повышение уровня автоматизации управления транспортом и безопасности его движения;

- обеспечение высокого качества и надежности связи.

Научной основой метрологического обеспечения является метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

В единую Государственную систему метрологического обеспечения входят:

- система государственных эталонов единиц физических величин, обеспечивающая воспроизведение единиц с наивысшей точностью;

- система передачи размеров единиц физических величин от эталонов ко всем средствам измерений с помощью образцовых средств измерений;

- система разработки, постановки на производство и выпуска в обращение рабочих средств измерений, обеспечивающих требуемую точность измерения характеристик продукции, технологических процессов и других объектов в сфере материального производства, при научных исследованиях и других видах деятельности;

- система обязательных государственных испытаний средств измерений, предназначенных для серийного или массового производства и вво-

за их из-за границы партиями, обеспечивающая единообразие средств измерений при разработке и выпуске в обращение;

система государственной и ведомственной поверки или метрологической аттестации средств измерений, обеспечивающая единообразие средств измерений при их изготовлении, эксплуатации и ремонте;

система стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, обеспечивающая воспроизведение единиц величин, характеризующих состав и свойства веществ и материалов;

система стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов, обеспечивающая достоверными данными научные исследования, разработку технологических процессов и конструкций изделий, процессов получения и использования материалов.

Общие единые правила и нормы метрологического обеспечения устанавливаются в стандартах Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ). Основными объектами стандартизации ГСИ являются:

единицы физических величин;

государственные эталоны и общесоюзные поверочные схемы;

методы и средства поверки средств измерений;

номенклатура нормируемых метрологических характеристик средств измерений;

нормы точности измерений;

способы выражения и формы представления результатов измерений и показателей точности измерений;

методики выполнения измерений;

методики оценки достоверности и формы представления данных о свойствах веществ и материалов;

требования к стандартным образцам состава и свойств веществ и материалов;

организация и порядок проведения государственных испытаний, поверки и метрологической аттестации средств измерений, метрологической экспертизы нормативно-технической, проектной, конструкторской и технологической документации, экспертизы и аттестации данных о свойствах веществ и материалов;

термины и определения в области метрологии.

ГОСТ 1.25 регламентирует конкретное содержание метрологического обеспечения на различных уровнях управления и производства, осуществляемого как сотрудниками метрологических служб, так и производственным инженерно-техническим персоналом. К основным процедурам, проводимым в рамках метрологического обеспечения предприятия (организации) при разработке, производстве, испытаниях и эксплуатации продукции, следует отнести:

анализ состояния измерений, разработку и осуществление на его основе мероприятий по совершенствованию и упорядочению измерительного дела на предприятии;

установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений;

создание и внедрение современных методик выполнения измерений и средств измерений, испытаний и контроля; выбор рациональной номенклатуры средств измерений для проведения измерительного эксперимента, контроля и управления;

проведение метрологической экспертизы, конструкторской, технологической и нормативно-технической документации для обеспечения выполнения требований соответствующих стандартов ГСИ и отраслевых стандартов, норм и требований, вытекающих из задач метрологического обеспечения;

контроль за соблюдением метрологических правил и требований при проведении научных исследований и на всех стадиях разработки, производства и испытаний изделий.

Сеть государственных и ведомственных метрологических органов, осуществляющих деятельность, направленную на обеспечение единства и точности измерений в стране (т.е. метрологическое обеспечение), образует метрологическую службу.

13.8. МЕЖДУНАРОДНАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Международное разделение труда и связанная с этим международная торговля, научно-техническое сотрудничество, потребовали достижения международных соглашений и разработки международных технических документов, нормативные требования которых имели бы однозначное значение и для изготовителя, и для потребителя. В этих документах должны содержаться размерные характеристики, технические требования, методы и условия испытаний, точные определения величин, которые следует измерять, сведения о приборах, с помощью которых производятся измерения, данные о точности этих приборов и методах их проверки. Кроме того, в этих документах должны быть указаны требования к качеству продукции и исходного сырья, методы определения качества, а также достоверные сведения о всех материалах и веществах, которые используются в процессе производства.

В соответствии с этими сложными и многосторонними требованиями в настоящее время в сферу международной стандартизации входят по крайней мере четыре самостоятельных, но взаимосвязанных аспекта: стандартизация типоразмеров, методик испытаний и технических требований; метрология и измерительная техника; контроль качества; служба обеспечения исследователей, конструкторов и технологов достоверными данными о физико-химических, механических и всех прочих свойствах веществ и материалов (стандартными справочными данными).

В развитии международной стандартизации заинтересованы не только страны с развитой экономикой, но и развивающиеся страны, которые только начинают создавать свою национальную экономику.

В международной стандартизации участвует ряд организаций: Международная организация по стандартизации (ИСО), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Европейская организация по контролю качества (ЕОКК), Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), Международное бюро мер и весов (МБМВ) и др. Международные стандарты и рекомендации этих организаций, формально не являясь обязательными нормативными документами, фактически, в современных условиях широкого развития научно-технического и экономического сотрудничества между странами, соблюдаются всеми заинтересованными сторонами в той мере, в какой это определяется их потребностью.

13.9. СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ

Устанавливая требования на продукцию, стандарты и технические условия вынуждают изготовителя добиваться достижения необходимых потребительских свойств и качества продукции, чтобы обеспечить ее конкурентоспособность и сбыт. При этом, в условиях рыночной экономики, изготовитель, с одной стороны, и потребитель, с другой, особо заинтересованы в официальном подтверждении высокого уровня качества продукции.

Еще в далеком прошлом таким подтверждением являлось, например, клеймо мастера на изделии. В роли свидетельства качества могло выступать просто заявление продавца, если этот продавец обладал высокой и безупречной репутацией.

В настоящее время такого рода деятельность по подтверждению качества продукции получила название сертификация (от французского слова *certificat* — документ, удостоверяющий качество). В соответствии с рекомендациями ИСО «сертификация соответствия представляет собой действие, удостоверяющее посредством сертификата соответствия или знака соответствия, что изделие (услуга) соответствует определенным стандартам или другому нормативно-техническому документу». Установлено три варианта свидетельствования о соответствии: заявление о соответствии, аттестация соответствия и сертификация соответствия.

Заявление о соответствии — заявление поставщика под его полную ответственность, вне рамок сертификационной системы, что продукция, технологический процесс, услуга соответствует определенному стандарту или другому нормативно-техническому документу.

Аттестация соответствия — заявление испытательной лаборатории третьей стороны (независимой стороны), что определенный образец находится в соответствии с определенными стандартами или другими документами, устанавливающими требования к продукции. Из этого определения следует, что аттестация соответствия не подтверждает соответствия всей серийно выпускаемой продукции требованиям норматив-

но-технической документации, а относится лишь к конкретному образцу, представленному для испытаний. Аттестация соответствия также выполняется вне рамок сертификационной системы.

Сертификация соответствия — гарантия третьей стороны того, что с определенной достоверностью продукция, технологический процесс, услуга соответствуют стандартам или другим требованиям. Сертификация соответствия предусматривает проведение объективных испытаний продукции, не подверженных влиянию ни изготовителя, ни потребителя. Сертификация соответствия проводится в рамках систем сертификации, которые могут быть созданы на трех уровнях: национальном, региональном и международном.

По статусу системы сертификации могут быть обязательными или факультативными. Обязательные системы сертификации действуют на законодательной основе (например, сертификация чистоты драгоценных металлов). Системы сертификации, имеющие характер факультативных, основываются на их авторитете. Не являясь обязательными, они, тем не менее, оказывают большое влияние на качество продукции, вызывают доверие потребителя к поставщику, повышают конкурентоспособность продукции.

В зависимости от объема и содержания сертификационных работ различают несколько вариантов систем сертификации. В каждом из вариантов предусмотрено выполнение определенных аттестационных и контрольных функций, при положительных результатах которых может быть выдан соответствующий сертификат качества. Так, например, один из вариантов системы сертификации предусматривает аттестацию предприятия-изготовителя продукции, проведение типовых испытаний образцов продукции в испытательных центрах, а в последующем — испытания образцов, взятых из торговли и образцов, взятых с производства.

Следует иметь в виду, что все системы сертификации базируются на испытаниях, т.е. практически на измерениях и измерительном контроле. Поэтому основным структурным элементом всех систем сертификации являются испытательные лаборатории. На рис. 13.1 приведена типовая структура системы сертификации, наглядно показывающая взаимодействие сертификационных органов, службы стандартизации и метрологической службы.

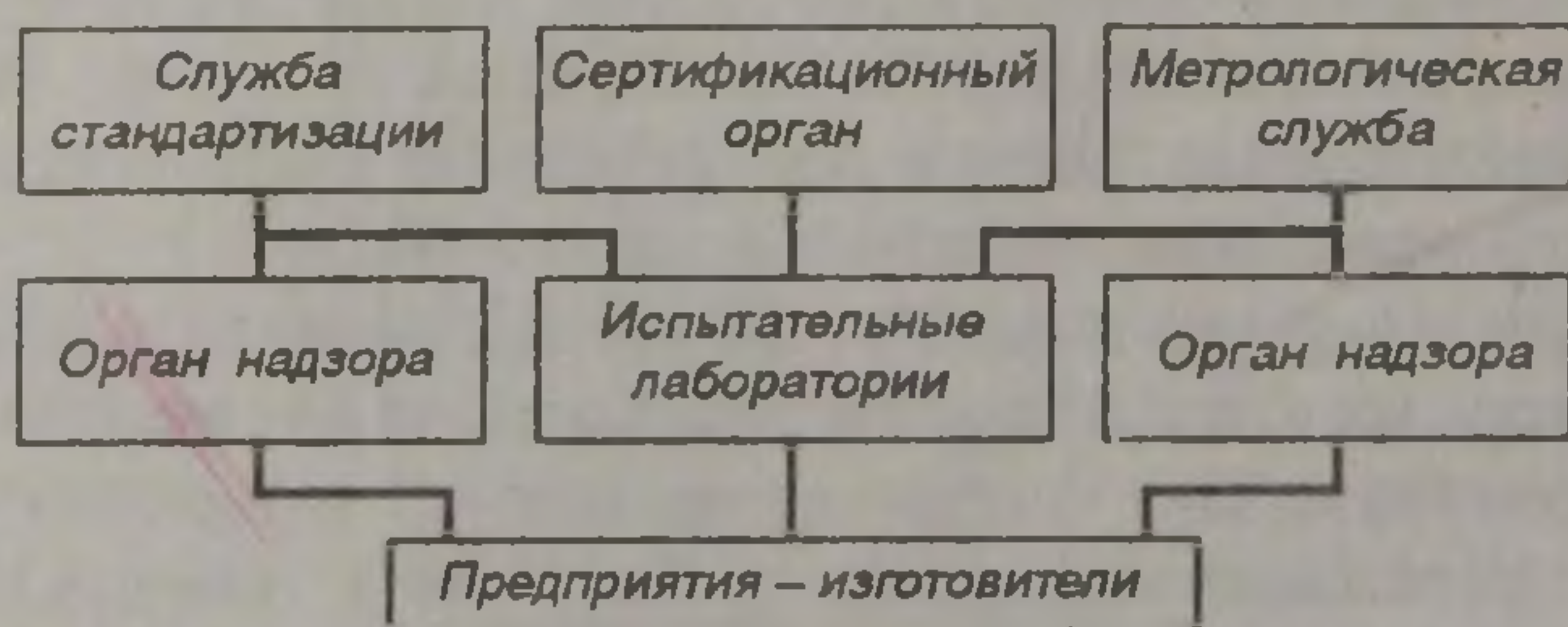


Рис 13.1. Структура системы сертификации продукции

Основными функциями органа сертификации являются: разработка порядка проведения сертификации; аттестация и аккредитование испытательных лабораторий; допуск предприятий к сертификации; выдача сертификатов соответствия или лицензий на право маркировки продукции Знаком соответствия; рассмотрение споров о качестве сертификационной продукции.

Сертификационные органы по своему статусу и структуре в разных странах различны. Многие зависят от специфики их взаимоотношений с национальными органами по стандартизации и метрологии, с государственными учреждениями и промышленностью. В Российской Федерации руководство работами по сертификации возложено на Госстандарт РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебнике рассмотрены лишь основные прикладные задачи метрологии и метрологического обеспечения, встречающиеся в практике технических измерений; методы и средства измерений общего назначения; показано место метрологии в процедурах измерительного контроля, испытаний и оценивания качества продукции.


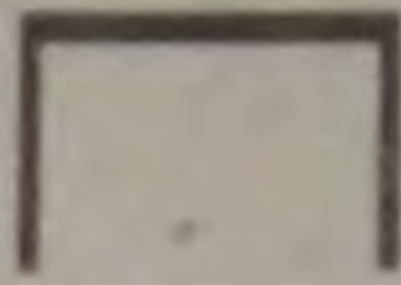
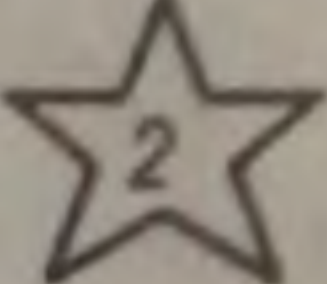
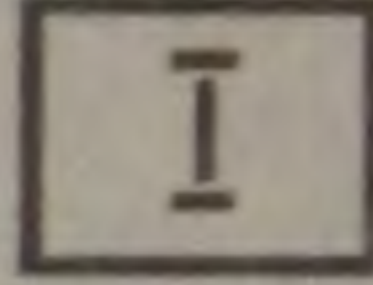
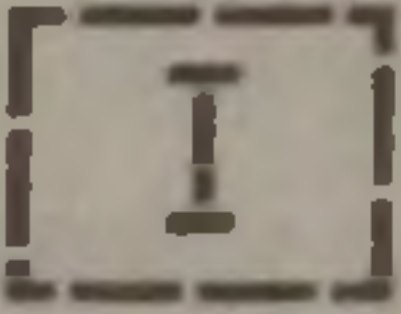
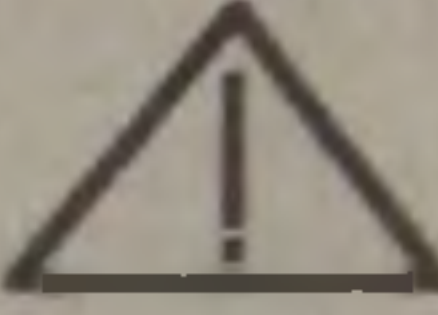
Разумеется, в рамках отдельной дисциплины невозможно охватить все многообразие физических величин, измерительных задач и приборов, с которыми может встретиться специалист в области микроэлектроники и вычислительной техники в своей производственной деятельности.

Методы и средства измерения ряда специфических для конкретных специальностей и специализаций физических величин изучаются в специальных дисциплинах на последующих этапах обучения и требуют для осознанного восприятия не только углубленной подготовки по специальности, но и соответствующей метрологической подготовки.

Авторы надеются, что материал учебника явится тем фундаментом, на основе которого студент получит и будет непрерывно совершенствовать знания в области метрологического обеспечения производства и измерительной техники.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
НА ШКАЛАХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Прибор индукционный	
Прибор электростатический	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем (выпрямительный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с электронным преобразователем в измерительной цепи (электронный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с неизолированным термопреобразователем (термоэлектрический прибор)	
Ток постоянный	
Ток переменный (однофазный)	
Ток постоянный и переменный	
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)	

Прибор применять при вертикальном положении шкалы	
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы	
Класс точности прибора, например 1,5	1,5 1,5 1,5
Напряжение испытательное, например 2 кВ	
Прибор защищен от влияния внешнего магнитного поля (I категория защищенности)	
Прибор защищен от влияния внешнего электрического поля (I категория защищенности)	
Внимание! Смотри указания в инструкции по эксплуатации прибора	

ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ВЕРОЯТНОСТИ P ДЛЯ ДОВЕРИТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА, ВЫРАЖЕННОГО В ДОЛЯХ СРЕДНЕГО КВАДРАТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ

$$\frac{\Delta x(m)}{\sigma} = z$$

$$P = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

z	P	z	P
0	0	1,6	0,89
0,1	0,08	1,8	0,93
0,2	0,16	2,0	0,95
0,3	0,24	2,2	0,972
0,4	0,31	2,4	0,984
0,5	0,38	2,6	0,990
0,6	0,45	2,8	0,995
0,7	0,51	3,0	0,997
0,8	0,57	3,2	0,9986
0,9	0,63	3,4	0,9993
1,0	0,68	3,6	0,9997
1,2	0,77	3,8	0,99986
1,4	0,84	4,0	0,99993

ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА t_q ДЛЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ,
ИМЕЮЩЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТЬЮДЕНТА
С $n - 1$ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

$n - 1$	$P = 0,95$	$P = 0,99$	$n - 1$	$P = 0,95$	$P = 0,99$
3	3,182	5,841	16	2,120	2,921
4	2,776	4,604	18	2,101	2,878
5	2,571	4,032	20	2,086	2,845
6	2,447	3,707	22	2,074	2,819
7	2,365	3,499	24	2,064	2,797
8	2,306	3,355	26	2,056	2,779
9	2,262	3,250	28	2,048	2,763
10	2,228	3,169	30	2,043	2,750
12	2,179	3,055	∞	1,960	2,576
14	2,145	2,977			

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения. – М.: Изд-во стандартов, 1981.
2. Государственная система стандартизации. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
3. Основы метрологии и электрические измерения / Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Душин Е.М. и др. / Под ред. Е.М. Душина. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи / Хромой Б.П., Кандинов А.В., Сенявский А.Л. и др. / Под ред. Б.П. Хромого. – М.: Радио и связь, 1986.
5. Евтихеев Н.Н., Купершmidt Я.А. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Левилина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
8. Измерения в электронике; Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
9. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванови А.Г. Основы температурных измерений. – М.: Машиностроение, 1987.
10. Белкин И.М. Средства линейно-угловых измерений; Справочник. – М.: Машиностроение, 1987.
11. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
12. Статистические методы обработки эмпирических данных. Рекомендации. – М.: Изд-во стандартов, 1978.

Учебное издание

**Тартаковский Дмитрий Федорович
Ястребов Анатолий Степанович**

**МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ
И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

**Редактор Н. Е. Овчеренко
Художественный редактор Ю. Э. Иванова
Технический редактор Н. В. Быкова
Корректор О. Н. Шебашова**

Лицензия ИД № 06236 от 09.11.01.

Изд. № ВТИ-91. Подп. в печать 14.06.02. Формат 60×88¹/₁₆. Бум. газетн.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Объем 12,75 усл. печ. л. 12,99 усл. кр-отт.
12,45 уч.-изд. л. Тираж 8000 экз. Заказ № 2134.

ФГУП «Издательство «Высшая школа», 127994, Москва, ГСП-4,
Неглинная ул., 29/14.

Тел.: (095) 200-04-56

E-mail: info@v-shkola.ru <http://www.v-shkola.ru>

Отдел реализации: (095) 200-07-69, 200-59-39, факс: (095) 200-03-01.
E-mail: sales@v-shkola.ru

Отдел «Книга-почтой»: (095) 200-33-36

E-mail: bookpost@v-shkola.ru

Отпечатано в ФГУП ордена «Знак Почета»
Смоленской областной типографии им. В. И. Смирнова.
214000, г. Смоленск, пр-т им. Ю. Гагарина, 2.



В издательстве "ВЫСШАЯ ШКОЛА"
работает служба

«КНИГА  ПОЧТОЙ»

*Если Вы живете далеко от столицы,
не огорчайтесь!*

Каждый желающий может заказать и получить
выпускаемую издательством литературу по почте в любой
точке России и ближнего зарубежья.

Стоимость пересылки составит 25% от суммы покупки,
независимо от месторасположения.

Рассылка книг производится только по предоплате.

Для оформления заказа нужно воспользоваться прайс-
листом издательства «Высшая школа».

Прайс-лист можно бесплатно заказать по почте,
получить по факсу, заказать по электронной почте или
найти на нашем сайте в Интернете.

При поступлении средств на расчетный счет
издательства «Высшая школа» на каждого клиента
открывается лицевой счет, на котором фиксируется
движение средств клиента.

Цена заказанного товара может отличаться от
указанной в прайс-листе. Отгрузка производится по цене,
действующей в день регистрации заказа.

✉ 127994, Москва, ул. Неглинная, д. 29/14.

☎ (095) 200-33-36

Факс: (095) 200-06-87, 200-03-01

E-mail: bookpost@v-shkola.ru

<http://www.v-shkola.ru>

Издательство "ВЫСШАЯ ШКОЛА"

Адрес издательства: 127994, г. Москва, ул. Неглинная, 29/14

Тел.: (095) 200-04-56

E-mail: info@v-shkola.ru

<http://www.v-shkola.ru>

Отдел реализации: (095) 200-07-69, 200-59-39

факс: (095) 200-03-01

E-mail: sales@v-shkola.ru

Отдел «Книга-почтой»: (095) 200-33-36

E-mail: bookpost@v-shkola.ru

Отдел рекламы:

(095) 200-33-70, факс: (095) 200-06-87

E-mail: reklama@v-shkola.ru

Телефон магазина:

(095) 200-30-14

Схема проезда



Проезд:

до станции м. "Цветной бульвар", "Пушкинская",
"Тверская", Кузнецкий мост".

Вход в издательство со стороны Петровского бульвара.

МЫ БУДЕМ РАДЫ ВИДЕТЬ ВАС!

МЕТРОЛОГИЯ,
СТАНДАРТИЗАЦИЯ
И ТЕХНИЧЕСКИЕ
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

ISBN 5-06-003796-7



9 785060 037968