

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет»
Академия профессионального образования
Уральское отделение Российской академии образования

**Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин
В.И. Уткин, А.П. Зарубин**

МЕТРОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

*Допущено Учебно-методическим объединением
по профессионально-педагогическому образованию в качестве
учебного пособия для студентов, обучающихся по специальности
030500.19 Профессиональное обучение
(электроэнергетика, электротехника и электротехнологии)*

Екатеринбург
2006

УДК 006.91 : 621.3.08(075.8)
ББК Ж 10я73-1+3221 я73-1
М 54

Метрология и электрические измерения: Учеб. пособие / *Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин, А.П. Зарубин*; Под ред. Е.Д. Шабалдина. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2006. 282 с.

ISBN 5-8050-0203-5

В учебном пособии изложены сведения о теории измерений, основных принципах обработки данных, устройстве и принципе действия аналоговых и цифровых приборов, способах измерения электрических и неэлектрических величин, современных информационно-измерительных системах.

Пособие может быть использовано при подготовке студентов всех форм обучения по специальности 030500.19 Профессиональное обучение (электроэнергетика, электротехника и электротехнологии), в переподготовке специалистов, а также в процессе самостоятельной работы студентов по дисциплине «Метрология и электрические измерения».

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Ф.Н. Сарпулов (ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»); канд. техн. наук, доц. А.А. Карпов (ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»)

Учебное пособие подготовлено при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 04-06-464а).

ISBN 5-8050-0203-5

© Российский государственный
профессионально-педагогический
университет, 2006

© Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин,
В.И. Уткин, А.П. Зарубин, 2006

Оглавление

Введение.....	7
Глава 1. ЭТАЛОНЫ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ	9
1.1. От ярда к метру	9
1.2. Метр.....	15
1.3. Килограмм	19
1.4. Секунда	21
Глава 2. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ИЗМЕРЕНИЙ.....	25
2.1. Основные характеристики процесса измерений	25
2.1.1. Общие определения.....	25
2.1.2. Временные характеристики измерений	33
2.1.3. Способы получения результатов.....	34
2.1.4. Точностные характеристики измерений	36
2.1.5. Способ выражения результата измерения	37
2.2. Погрешности измерений	37
2.2.1. Типы погрешностей.....	38
2.2.2. Правила округления и записи результатов измерений.....	40
2.2.3. Абсолютная и относительная погрешности	43
2.3. Погрешности косвенных измерений	44
Глава 3. АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ.....	48
3.1. Распределение наблюдаемых значений величины	48
3.1.1. Гистограммы	48
3.1.2. Предельное распределение.....	50
3.1.3. Числовые характеристики распределений.....	52
3.2. Оценка результата измерения.....	53
3.2.1. Центр распределения. Медиана. Математическое ожидание.....	53
3.2.2. Нормальное распределение (распределение Гаусса).....	55
3.2.3. Равномерное распределение.....	57
3.2.4. Оценки случайных погрешностей	58
3.3. Прямые измерения с многократными наблюдениями.....	62
3.3.1. Среднее квадратическое отклонение.....	62
3.3.2. Обработка результатов измерения с многократными наблюдениями.....	64
3.4. Прямые однократные измерения с точным оцениванием погрешности	67

3.5. Однократные измерения с приближенным оцениванием погрешности	69
Глава 4. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ..	73
4.1. Погрешности и характеристики средств измерений	73
4.1.1. Погрешности средств измерений.....	73
4.1.2. Характеристики средств измерений	80
4.2. Электромеханические измерительные механизмы.....	83
4.2.1. Магнитоэлектрические механизмы	83
4.2.2. Магнитоэлектрические логометры	86
4.2.3. Электромагнитные механизмы	87
4.2.4. Электромагнитные логометры	90
4.2.5. Электродинамические механизмы.....	92
4.2.6. Электродинамические логометры	94
4.2.7. Ферродинамические механизмы.....	96
4.2.8. Электростатические механизмы	98
4.2.9. Индукционные механизмы. Электромеханические счетчики электрической энергии	100
4.2.10. Электронные счетчики электрической энергии.....	110
4.3. Электронно-графические приборы	117
4.3.1. Универсальные осциллографы.....	117
4.3.2. Цифровые осциллографы.....	130
4.4. Измерение переменных токов и напряжений с помощью преобразователей тока.....	133
4.4.1. Выпрямительная система.....	134
4.4.2. Термоэлектрическая система преобразования тока.....	136
Глава 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ	141
5.1. Измерение тока.....	141
5.1.1. Расширение пределов измерений (применение шунтов)	141
5.1.2. Компенсация изменения температуры при измерении тока	144
5.1.3. Особенности применения приборов электродинамической системы	145
5.2. Измерение напряжения	146
5.2.1. Расширение пределов измерений напряжения.....	146
5.3. Измерение сопротивлений.....	149
5.3.1. Токовый метод (последовательный).....	149
5.3.2. Метод напряжения (параллельный)	149

5.3.3. Омметр с линейной шкалой.....	150
5.4. Специальные измерения	152
5.4.1. Измерение фазы	152
5.4.2. Измерение частоты.....	157
5.5. Измерение мощности.....	161
5.5.1. Измерение мощности однофазной цепи	165
5.5.2. Измерение мощности в трехфазных цепях.....	167
5.5.3. Цифровые ваттметры	170
5.6. Измерения методом сравнения с мерой	172
5.6.1. Разновременный метод сравнения.....	174
5.6.2. Теория мостовых схем	174
5.6.3. Компенсаторы (потенциометры) постоянного тока	179
Глава 6. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ	184
6.1. Вольтметры постоянного тока	185
6.2. Вольтметры переменного тока	186
Глава 7. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....	188
7.1. Общие сведения	188
7.2. Цифровое кодирование	191
7.2.1. Позиционные коды	192
7.2.2. Комбинированные коды	193
7.3. Основные методы преобразования непрерывных измеряемых величин в коды	194
7.3.1. Метод линейно возрастающего напряжения.....	195
7.3.2. Метод последовательного счета	196
7.3.3. Метод последовательного приближения	197
7.3.4. Метод считывания	198
7.3.5. Классификация цифровых измерительных устройств	199
7.4. Основные характеристики и погрешности цифровых изме- рительных устройств	200
7.4.1. Статическая характеристика преобразования и стати- ческие погрешности	200
7.4.2. Погрешности квантования временного интервала	203
7.4.3. Характеристики цифровых измерительных устройств	205
Глава 8. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.....	211
8.1. Общие сведения	211
8.1.1. Автономные многофункциональные цифровые прибо- ры.....	212

8.1.2. Измерительные системы	215
8.1.3. Компьютерно-измерительные системы	223
8.1.4. Виртуальные приборы.....	226
8.1.5. Интеллектуальные измерительные системы	228
8.1.6. Сетевые информационно-измерительные системы.....	230
Глава 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	235
9.1. Общие сведения	235
9.2. Генераторные измерительные преобразователи	237
9.2.1. Термоэлектрические преобразователи.....	237
9.2.2. Пьезоэлектрические преобразователи.....	238
9.2.3. Магнитоэлектрические датчики Холла.....	241
9.2.4. Датчики Виганда.....	242
9.2.5. Фотоэлектрические преобразователи (солнечные эле- менты)	243
9.3. Параметрические измерительные преобразователи	244
9.3.1. Реостатные преобразователи	245
9.3.2. Тензочувствительные преобразователи	246
9.3.3. Индуктивные преобразователи	248
9.3.4. Емкостные преобразователи.....	253
9.3.5. Оптические преобразователи	256
9.3.6. Термопреобразователи	258
Глава 10. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ	262
10.1. Косвенные измерения.....	262
10.2. Расширение пределов измерений.....	264
10.3. Классы точности и погрешности	265
Заключение	270
Библиографический список	271
Основные обозначения.....	275
Приложение 1. Погрешности косвенных измерений.....	276
Приложение 2. Построение фигуры Лиссажу графоаналитическим способом.....	277
Приложение 3. Правила снятия показаний стрелочных приборов с равномерной шкалой.....	279
Приложение 4. Электромеханические приборы.....	280
Приложение 5. Условные обозначения на шкалах электроизмери- тельных приборов	281

Введение

На любом производстве, при любых технологических процессах, контроле состояния окружающей среды, учете и расходовании материальных ресурсов и многих других видах деятельности измерения были, есть и будут одними из важнейших условий достижения поставленных целей. Измерения являются связующим звеном, обеспечивающим все многообразие человеческой деятельности. Каждую секунду в стране выполняются сотни миллионов измерительных операций, результаты которых используются для обеспечения безопасной и безаварийной работы промышленных и энергетических агрегатов, оптимизации протекающих в них процессов. Затраты на обеспечение операций измерений, испытаний и контроля составляют до 20% от общих затрат на производство продукции. Только высокая и гарантированная точность результатов измерений обеспечивает правильность принимаемых решений на всех уровнях управления производством. Теоретическая метрология является научной основой измерений и конструирования измерительной техники. Она занимается изучением проблем измерения в целом и образующих измерение элементов: приборов и средств измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений и др.

Каждые 10–15 лет происходит смена поколений измерительной техники, что связано с повышением требований к точности, достоверности, быстродействию процессов измерения. С каждым годом при измерениях все шире применяются разнообразные электронные компоненты, измерительные преобразователи (датчики), техника измерений становится все более «электронизированной». Тем не менее неизменными, как правило, остаются основные принципы измерений и обработки данных, к которым, к сожалению, отношение иногда достаточно легкомысленное ввиду возможности применения для обработки данных вычислительной техники. Кроме того, многие принципы, положенные в основу метрологической аттестации, могут быть использованы для анализа самых разнообразных процессов и структур. Поэтому в данном учебном пособии главный акцент сделан на изложении общей теории измерений, основных принципов обработки данных, общих принципов построения измерительных систем.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся специальности 050501 Профессиональное обучение или направлению 050500 Технологическое образование, а также для студентов следующих специализаций: 030503.19 Электротехника, электротехнологии и технологический менеджмент; 030504.19 Электроэнергетика, энергоаудит, энергосбережение; 030502.06 Вычислительная техника.

Материалы пособия могут быть использованы в работе студентов, обучающихся по направлению 654500 Электротехника, электромеханика и электротехнологии (специальности 180400 Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов; 181300 Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, учреждений и организаций и родственные им).

В пособии приведены справочные материалы для самостоятельного контроля знаний и выполнения практических заданий: упрощенные способы расчета погрешностей косвенных измерений (прил. 1); порядок построения интерференционных фигур Лиссажу графоаналитическим способом (прил. 2); правила снятия показаний стрелочных приборов (прил. 3); основные системы электромеханических приборов (прил. 4); условные обозначения на шкалах приборов (прил. 5).

Глава 1. ЭТАЛОНЫ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

1.1. От ярда к метру

Единицы физических величин появились с того момента, когда у человечества возникла необходимость в количественных измерениях. Первые меры были связаны с объектами природы: меры длины – с частями человеческого тела, единицы времени – со сменой дня и ночи. Естественные единицы удобны, понятны, но их взаимоотношения исключительно сложны, что приводит к невозможности сравнения однотипных результатов измерений, представленных в различных «природных» единицах. Например, один ярд (узаконен в 1101 г.) равен расстоянию от кончика носа короля Англии Генриха I до конца среднего пальца его вытянутой руки, один законный дюйм равен длине трех ячменных зерен, вынутых из средней части колоса (установлен английским королем Эдвардом II в 1324 г.). В XVIII в. Европе имелось более ста футов и миль различной длины, около сотни фунтов различного веса. Основные единицы длины, площади, массы, применявшиеся в России до 1918 г., представлены ниже:

1 аршин = 16 вершков = 28 дюймов

1 дюйм = 25,4 мм

1 сажень = 3 аршина = 7 футов

1 фут = 12 дюймов = 304,8 мм

1 верста = 500 саженей = 1,0668 км

1 миля «морская» = 1852 м

1 миля «уставная» = 1609 м

1 миля «русская» = 7467 м

1 десятина = 2400 кв. саженей = 1,0925 га

1 пуд = 40 фунтов = 16,38 кг

1 фунт = 96 золотников = 409,5 г

1 золотник = 96 долей = 4,266 г

1 гран = 62,2 мг

1 карат = 200 мг

1 унция = 16 драхм = 437,8 грана = 28,35 г

1 четверть = 8 четвериков = 209,9 л

1 баррель «сухой» = 115,628 л

1 баррель «нефтяной» = 158,988 л

Отзвуки этой системы мер имеются и в технике, например всем известный калибр 7,62 мм знаменитой трехлинейной винтовки Мосина образца 1898 г. Этот странный для вооружения с современной точки зрения калибр совершенно обычный, если вспомнить, что линия – это 1/10 доля дюйма. Калибр 7,62 мм – это просто 3 линии, или 3/10 дюйма.

Интересные задачи могут возникнуть при сертификации ювелирных изделий, изготовленных до 1918 г. Например, имеются два совершенно одинаковых по форме обручальных кольца, на которых стоит одна и та же проба – 58, но известно, что одно кольцо изготовлено до 1918 г., а другое современное. Идентичны ли эти кольца? Одинаковое ли количество золота в них? Современная маркировка проста – в данном сплаве 58% золота. Маркировка кольца, изготовленного до 1918 г., свидетельствует о том, что на один золотник сплава приходится 58 долей золота, а это означает, что содержание золота в современном исчислении составляет $58/96 = 0,6042$, или 60,42%, т.е. в сплаве старинного кольца золота содержится на 2,42% больше.

Приведение измерений и мер к современному состоянию претерпело богатую событиями историю. Рассмотрим, как это происходило в России и в других странах мира.

Одной из основных мер длины в России долгое время была сажень (упоминается в летописях начала X в.). Размер ее также не был постоянен. Применялись простая сажень, косая сажень, казенная сажень и др. По указу Петра I русские меры длины были согласованы с английскими.

В 1835 г. Николай I в Указе правительствующему Сенату утвердил сажень в качестве основной меры длины в России, а за основную единицу массы был принят образцовый фунт – кубический дюйм воды при температуре $13,3^\circ$ по Реомюру в безвоздушном пространстве (фунт равнялся 409,51241 г). В России использовались также аршин (0,7112 м) и верста (в разные времена ее размер был различным). Для поддержания единства установленных мер существовали эталонные (образцовые) меры, которые находились в храмах и церквях.

В 1841 г. в соответствии с указом «О системе российских мер и весов», узаконившим ряд мер длины, объема и веса, при Петербургском монетном дворе было организовано Депо образцовых мер и весов – первое государственное поверочное учреждение. Основными

его задачами являлись хранение эталонов, составление таблиц русских и иностранных мер, изготовление образцовых мер и рассылка последних в регионы страны. Поверка мер и весов на местах была вменена в обязанность городских дум, управ и казенных палат.

В 1849 г. была издана первая научно-учебная книга Ф.И. Петрушевского «Общая метрология» (в двух частях), по которой учились первые поколения русских метрологов.

Важным этапом в развитии русской метрологии явилось подписание Россией Метрической конвенции 20 мая 1875 г. В этом же году была создана Международная организация мер и весов (МОМВ). Место пребывания этой организации – Франция, г. Севр близ Парижа. Ученые России принимали активное участие в работе МОМВ.

В 1893 г. в Петербурге на базе Депо образцовых мер и весов была создана Главная палата мер и весов, которую организовал и до 1907 г. возглавлял великий русский ученый Д.И. Менделеев. В это время проводились глубокие метрологические исследования. В 1900 г. при Московском окружном пробирном управлении состоялось открытие Поверочной палатки торговых мер и весов.

Вернемся к истории становления международной метрологической системы. К концу XVIII в. несовместимость систем мер и весов становилась все очевиднее. Развитие науки и техники, с одной стороны, и расширение межгосударственных связей и мировой торговли – с другой, требовали совершенствования и унификации мер и весов. Изменение создавшейся ситуации возможно было только революционным путем.

Великая французская революция (1789–1794) привлекла лучших ученых того времени, которые приняли совместное решение о создании системы новых мер, основанных на «неизменном прототипе, взятом из природы», чтобы их могли признать все нации. Интересно рассмотреть развитие мер, «взятых из природы», на примере трех основных единиц: метра, килограмма и секунды (длина, масса, время) – от их введения до современного состояния.

Очевидно, что наиболее «неизменными прототипами» являются для нас Солнечная система с планетами, сам земной шар, вещества, его составляющие (горные породы, вода и т.п.). Изобретатели метрической системы совершили громадный шаг вперед от предшествующей системы, связанной с размерами тела человека (пядь, локоть, фут стопа и т.д.), к системе, основанной на «природных прототипах», т.е.

физических постоянных величинах, физических процессах, химических свойствах вещества.

Однако со времен Великой французской революции число величин, поддающихся измерению, возросло во много раз, значительно повысилась и точность измерений. Последнее позволило сделать величайшие открытия нашего времени. Опыт Майкельсона привел А. Эйнштейна к созданию теории относительности. Повышение точности измерения плотности воды привело к открытию дейтерия – тяжелого изотопа водорода. И здесь уместно вспомнить слова Д.И. Менделеева о том, что в природе мера и вес суть главное орудие познания, точная наука немислима без меры. И действительно, любой процесс измерений – это сравнение величины с некоторой мерой, предназначенной для воспроизведения данной физической величины. Причем мера может быть как физическим телом определенной формы, так и совокупностью многих деталей с определенной взаимосвязью (например, радиотехническое устройство). Самое главное то, что мера воспроизводит единицу измерения определенной физической величины. Поэтому мера – это основа всех измерений.

Очевидно, что для измерения одной и той же физической величины необходимо иметь серию мер, обладающих различными точностными характеристиками. Например, для определения массы протона нельзя использовать ту же меру, что и для взвешивания килограмма фруктов. Поэтому сегодня для каждой из единиц основных физических величин существует *иерархическая система мер*, в основании которой находятся разнообразные меры, предназначенные для рабочих (технических) измерений, а на ее вершине – *эталон*.

Эталон единицы физической величины – средство измерения (или комплекс средств измерений), предназначенное для хранения и воспроизведения единицы данной величины. Назначение эталона – передача размера единицы физической величины нижестоящим по точности мерам. Эталон выполняется по особой технологии и официально утверждается Генеральной конференцией по мерам и весам. За двести лет, прошедших со времен Великой французской революции, эталоны основных физических величин неоднократно изменялись, и эти изменения отражают не только развитие науки и техники, но и драму человеческого познания природы, когда меры, основанные на «неизменном прототипе, взятом из природы», рушились и возникали новые меры, использовались новые физические законы и открытия;

когда при создании эталонов соперничали астрономия с физикой, физика с геодезией и др.; когда эталоны просто становились созданием человеческих рук.

Единство измерений достигается путем точного воспроизведения и хранения установленных единиц физических величин с помощью эталонов и передачи их размеров применяемым средствам измерений. *Передача размера единиц* – это приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым средством измерения, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, которое осуществляется при поверке или калибровке.

Систему передачи единиц физических величин можно представить в виде иерархической схемы (рис. 1.1).

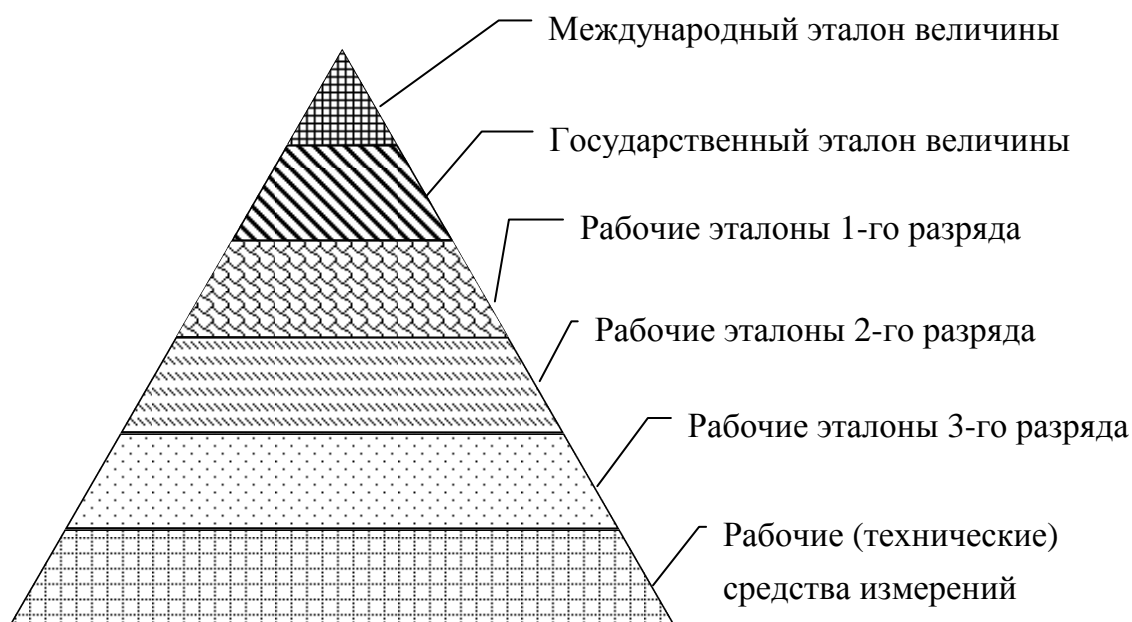


Рис. 1.1. Схема передачи единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений

По определению Генеральной конференции по мерам и весам погрешность первичного эталона определяется только *современным состоянием развития науки и техники*, т.е. первичный эталон приравнивается к фундаментальным физическим постоянным (скорость света, заряд электрона и т.п.). Поскольку эталон единицы физической величины – средство для хранения и воспроизведения этой единицы,

он предназначен для передачи размера единицы нижестоящим по точности мерам. Поэтому первичный эталон должен быть единственным! Величина первичного эталона передается эталону-копии, а далее формируется пирамида образцовых мер – рабочих эталонов различных последовательно снижающихся классов точности. В основании этой пирамиды находится огромное количество технических средств измерений, основанных на самых различных физических принципах, но их объединяет с точки зрения метрологии одно: их погрешность определяется их классом точности, установленным по образцовой мере более высокого класса точности, а не по соседней по уровню погрешности мере, даже если последняя выполнена на самом современном уровне науки и техники. Только при соблюдении такой иерархии мер возможна надежная передача значения эталона рабочему измерительному устройству с необходимой точностью.

Высшую ступень иерархической схемы занимают *международные эталоны* физических величин. Они хранятся в Международном бюро мер и весов во Франции. Вторую ступень занимают *государственные эталоны*, воспроизводящие единицы в соответствии с их определением и с наивысшей в стране точностью. Эталоны представляют собой комплекс средств измерений и вспомогательных устройств, обеспечивающих воспроизведение единицы и в необходимых случаях ее хранение, а также передачу размера единицы рабочим эталонам. Государственные эталоны проходят периодическое сличение между собой и с международными эталонами. По результатам периодического сличения российские эталоны заслужили международное признание своих измерительных возможностей, и информация о них публикуется на Интернет-сайте Международного бюро мер и весов.

В парке государственных эталонов различают *государственные первичные эталоны* и *вторичные эталоны*. Первичным является эталон физической величины, утвержденный в качестве исходного для всей Российской Федерации. Вторичные эталоны создаются для проведения различных метрологических работ. Это эталоны-свидетели, эталоны-сравнения, эталоны-копии.

Эталон-свидетель предназначен для проверки сохранности и неизменности первичного эталона и для замены его в случае порчи или утраты. *Эталон-сравнения* применяются для сличения эталонов, которые по каким-либо причинам (например, сложность транспортировки) не могут непосредственно сличаться друг с другом. *Эталон-*

копии используются для передачи размеров единиц рабочим эталонам.

Следующие ступени в иерархической схеме занимают *рабочие эталоны* 1-го, 2-го и 3-го разрядов (ранее называвшиеся образцовыми измерительными средствами), которые также относятся к парку вторичных эталонов.

Существуют эталоны для воспроизведения как основных единиц, так и ряда производных единиц (например, эталон единицы давления, эталоны э.д.с., сопротивления, емкости, индуктивности). Создание эталонов производных единиц позволяет повысить точность, с которой передаются размеры этих единиц нижестоящим образцовым средствам измерений. При создании эталонов производных единиц обеспечивается их связь с эталонами основных единиц.

Воспроизведение основных единиц Международной системы единиц СИ должно осуществляться с помощью государственных эталонов, т.е. в централизованном порядке.

Таким образом, сегодня существует семь основных единиц физических величин: длина (метр), масса (килограмм), время (секунда), сила электрического тока (ампер), термодинамическая температура (кельвин), количество вещества (моль), сила света (кандела). Наиболее «древние» из них – это метр, килограмм, секунда. Поэтому рассмотрим последовательно историю развития понятий о первых трех единицах измерений.

1.2. Метр

Единицей длины было предложено считать длину десятиmillionной части четверти меридиана Земли (квадранта), проходящего от экватора до Северного полюса через Париж. Эту единицу называли *метром* (от греч. *metron* – мера, *metreo* – измеряю), а систему единиц, в основе которой был метр, – *метрической*. Для определения длины квадранта с 1792 по 1799 г. были отправлены землемеры для проверки длины различных его участков в Испании и Франции. Результаты измерений были зафиксированы при создании механического эталона метра – платино-иридиевого стержня длиной 102 см, на расстоянии 1 см от концов которого были нанесены штрихи. Расстояние между этими штрихами и было равно одному метру, или $1/40000000$ части парижского меридиана. Погрешность штрихового метра как вторич-

ного эталона (не надо забывать, что первичным эталоном по определению была $1/40000000$ часть парижского меридиана) составила $1,1 \cdot 10^{-5}\%$. Такой эталон, несомненно, удовлетворял потребностям техники того времени и был принят многими странами.

Однако в 1837 г. измерения с более точными геодезическими приборами показали, что в природном эталоне длины, в $1/4$ парижского меридиана, содержится не 10000000 м, а 10002288 м¹. Это значит, что погрешность вторичного эталона – штрихового метра – в несколько сотен раз меньше, чем погрешность первичного «природного эталона». Выход из данной критической ситуации был такой же революционный, как и создание метрической системы.

В 1889 г. в Париже собралась I Генеральная конференция по мерам и весам, утвердившая международные эталоны. Было принято решение считать первичным эталоном расстояние между штрихами платино-иридиевого стержня, который стал в результате эталоном первичным.

Прототипы метра, выполненные из платино-иридиевого сплава с тепловым коэффициентом расширения почти в 20 раз меньшим, чем у железа, и практически не окисляющиеся, были переданы на хранение в Международное бюро мер и весов. Страны, подписавшие Метрическую конвенцию, получили образцы эталонов. Россия получила образцы метра № 11 и № 28, последний из которых был утвержден в качестве государственного эталона Российской империи.

Таким образом, эталоном стала мера, просто созданная человеком и мало имеющая отношение к природе. Тем не менее штриховая мера длины продержалась как эталон почти 100 лет.

Несмотря на то что штриховой эталон обладал достаточно высокой твердостью, не было полной уверенности в том, что длина эталона со временем не изменится. Известно, что в металлических стержнях, подвергшихся ранее термической и механической обработке, возникают внутренние упругие напряжения, которые вызывают медленные микроструктурные изменения их структуры, что может в итоге привести к изменению расстояния между штрихами на стержне.

¹ Измерения 1964–1967 гг. показали, что в четверти парижского меридиана содержится 10001954 метра, т.е. метр Палаты мер и весов короче меридионального метра почти на 0,2 мм.

Самое неприятное последствие этого эффекта состоит в том, что при периодических сравнениях эталонов метра из различных стран с международным прототипом нельзя обнаружить малых изменений их длины, так как все эталоны изготовлены из одного и того же сплава, хранятся приблизительно в одних и тех же условиях и, следовательно, претерпевают одни и те же изменения.

Многочисленные сличения штриховых платино-иридиевых эталонов метра показали, что погрешность сличения их между собой находится в пределах $\pm 1,1 \cdot 10^{-7}$ м ($\pm 0,11$ мкм).

Со временем точность этого эталона оказалась неудовлетворительной для задач оптики, биологии, атомной и ядерной физики. Возникла необходимость в создании нового эталона длины. Очевидно, что новый эталон необходимо создавать на основе последних достижений физики, т.е. попытаться вернуться к естественному, природному эталону. Однако путь этот был долгим и нелегким. В 1895 г. II Генеральная конференция по мерам и весам, основываясь на опытах А. Майкельсона по определению длины световых волн, приняла решение о том, что естественным свидетелем прототипа метра следует считать отношение метра к длине световых волн.

Как известно, квант световой энергии излучается или поглощается атомом при переходе из одного стационарного состояния в другое. При этом частота излучения (поглощения) ν пропорциональна разности энергий состояния атома, т.е. $\nu = (E_2 - E_1) / \hbar$, где E_2 и E_1 – уровни энергий, \hbar – постоянная Планка. Если $E_2 > E_1$, происходит излучение электромагнитных волн, если $E_2 < E_1$ – поглощение. При распространении излучения в вакууме со скоростью света c длина волны монохроматического излучения равна $\lambda = c \hbar / (E_2 - E_1)$.

Однако даже в идеальном случае вследствие конечной ширины уровней энергии в атоме излучаемая спектральная линия представляет собой некое симметричное распределение световой энергии – интенсивности линии по шкале частот, т.е. фактически излучается набор монохроматических линий в ограниченном диапазоне частот. Распределение интенсивности спектральной линии по частоте представляется в виде ее контура, ширина которого при спаде интенсивности на половину называется шириной спектральной линии. Длина волны такого волнового пакета принимается соответствующей максимальному значению интенсивности спектра.

Излучение света атомных монохроматических источников возбуждается под действием электрических и магнитных полей в газовом разряде, нагревании, увеличении частоты соударений излучающих атомов с другими (эффект давления), вследствие чего происходит расширение линии и смещение максимума излучения по шкале частот. Таким образом, действительный контур линии становится значительно шире естественного, невозмущенного и может быть даже несимметричным.

Кроме того, было установлено, что почти все спектральные линии обладают сверхтонкой структурой, связанной с изотопическим составом элементов. Причем четно-четные изотопы, т.е. изотопы, имеющие четный атомный вес и четный атомный номер, излучают линии с простым и четким контуром. Поэтому для работ по созданию эталонных источников излучения были применены изотопы криптон-84, криптон-86, ртуть-198, кадмий-114. В результате этих работ было установлено, что оранжевая линия, излучаемая изотопом криптон-86 и соответствующая переходу между атомными уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$, обладает наименьшей шириной и наибольшей устойчивостью по отношению к внешним условиям.

Новый эталон длины, принятый в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам, был определен следующим образом: метр – это волновой пакет из $1650763,73$ длин волн оранжевого излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома изотопа криптон-86. Для воспроизведения и передачи размера метра другим мерам длины был создан специальный аппаратный комплекс, включающий в себя газоразрядную лампу как источник электромагнитного излучения, систему оптических интерферометров и т.д. Данный первичный эталон метра позволяет воспроизводить метр с погрешностью не более $5 \cdot 10^{-9}$ м. Это размер линейно расположенных 50 атомов.

Метрология вернулась к «естественному» эталону, но... новый эталон был «природной», хотя и не очень удобной для практики мерой.

Однако на данную проблему можно взглянуть с другой стороны. Длина волны равна по определению $\lambda = c\hbar/\Delta E$, или, переходя к частоте, $\nu\hbar = \Delta E$, где $\nu = c/\lambda$ – частота светового излучения. Получается, что возможно определение длины волны через измерение частоты и заданную скорость света. Однако для точного измерения частоты не-

обходимо точное время. И развитие науки способствовало комплексному решению данной проблемы.

Создание лазеров как источников света, обладающих сверхузкой шириной линии, с одной стороны, и разработка квантовых генераторов со сверхмалой (до 10^{-11}) погрешностью частоты, с другой стороны, привели к созданию нового определения метра.

XVII Генеральная конференция по мерам и весам в 1983 г. приняла следующее определение метра, которое является действующим и в наши дни: метр – это расстояние, которое проходит свет (плоская электромагнитная волна) в вакууме за $1/299792458$ с. Погрешность нового эталона составляет всего 5 линейных размеров атома ($\pm 5 \cdot 10^{-10}$ м).

Почти за 200 лет, прошедших с начала введения метрической системы, точность определения эталона длины увеличилась почти в 100 000 раз, из них в 300 раз за последние 40–45 лет.

Введение нового определения метра создает возможность построения единого комплекса эталонов времени – длины – частоты. Новый эталон полностью соответствует главной идее метрической системы о том, что меры должны быть основаны на «неизменных прототипах, взятых из природы».

1.3. Килограмм

Эталон массы, введенный во времена Великой французской революции, был прост – масса одного кубического дециметра воды при температуре, равной 4°C (как считалось, при температуре наибольшей плотности воды). Одновременно с платино-иридиевым эталоном метра были созданы вторичные эталоны массы – цилиндры из платино-иридиевого сплава одинакового диаметра и высоты (39 мм), которые были переданы на хранение в Национальный архив Франции. Для передачи размера единицы массы вторичным эталонам были разработаны и изготовлены фирмой «Рупрехт» специальные равноплечие призменные весы.

Однако хранить и воспроизводить первичный эталон – воду – оказалось не так просто. Вода – очень активная жидкость, в ней хорошо растворяются различные твердые вещества, жидкости и газы. Соответственно свойства этих растворов уже заметно отличаются от

свойств эталонной воды. Кроме того, обнаружилась еще одна неприятность. Более точные измерения плотности воды при различных температурах показали, что максимальная плотность воды наблюдается при температуре 3,98°C. Фактически оказалось, что масса одного кубического дециметра воды при ее максимальной плотности на 28 мг ($+2,8 \cdot 10^{-3} \%$) более, чем масса искусственно созданного вторичного эталона – платино-иридиевого цилиндра. Коррекцию вторичных эталонов производить уже было поздно: эталон килограмма находился во многих странах. И было принято естественное решение – установить, что килограмм как единица массы равен массе международного прототипа килограмма, представляющего собой гирю в виде прямого цилиндра с закругленными ребрами диаметром и высотой 39 мм, выполненного из сплава платины и иридия. Таким образом, эталоном массы стал рукотворный цилиндр из специального сплава. Природа не смогла дать надежного эталона.

Однако на этом «приключения» эталона массы не окончились. При установлении Международной системы единиц возник вопрос о разграничении килограмма как единицы массы и килограмма как единицы силы или веса. Многие страны предлагали вместо килограмма для единицы массы ввести другое наименование (например, «галилео», «кило», «квант», «Эйнштейн», «молео») и таким образом отличить единицу массы от наименования килограмма-силы, имеющего широкое распространение в практической жизни в качестве единицы веса.

Генеральная конференция по мерам и весам сохранила и узаконила наименование основной единицы массы как «килограмм», но еще раз подчеркнула, что в состав эталона килограмма входят: 1) международный прототип килограмма; 2) равноплечие призматические весы. Таким образом, передача эталона массы не будет зависеть от географического местоположения точки сличения масс.

Имеющийся в России платино-иридиевый эталон килограмма № 12 был изготовлен в 1883 г. из металла той же плавки, что и международный прототип килограмма. Передача размера единицы массы вторичным эталонам осуществляется посредством равноплечих призматических весов фирмы «Рупрехт» № 1 с дистанционным управлением, которые являются неотъемлемой частью эталона. Чтобы предотвратить износ основного эталона, сличение с ним эталона-копии производят только один раз в десять лет. Погрешность воспроизведения

единицы массы эталоном килограмма составляет всего $2 \cdot 10^{-7}$ %. Таким образом, эталон килограмма позволяет записывать результат измерения массы в лучшем случае числом из девяти цифр.

Проведение работ по созданию новых эталонов единиц физических величин, основанных на атомных постоянных (метра – по длине световой волны, секунды – по частоте колебаний атомов и молекул), поставило вопрос о связи единицы массы с атомными константами. В 1960 г. была принята углеродная атомная единица массы, равная $1/12$ массы атома изотопа углерод-12 (а.е.м. = $1,66056 \cdot 10^{-27}$ кг). Эта единица рекомендована для использования как единица массы в атомной физике, и не допускается применение ее с кратными приставками. В единицах а.е.м. выражают атомные массы элементов, молекулярные массы химических элементов и массы атомных ядер, но массы элементарных частиц рекомендовано относить к массе электрона: $m_e = 9,1093897 \cdot 10^{-31}$ кг = $5,485799033 \cdot 10^{-4}$ а.е.м. Однако килограмм пока остается килограммом, и атомная единица массы выражается в килограммах, а не наоборот. Предложение об использовании в качестве константы массы нейтрона не получило развития, во-первых, в связи со сложностью процесса передачи и сличения эталонов; во-вторых, вследствие того, что масса нейтрона ($1,6749286 \cdot 10^{-27}$ кг) на сегодня определена с погрешностью $0,59 \cdot 10^{-6}$, а это существенно ниже точности определения массы эталона-гири.

В настоящее время считается перспективной разработка и создание образцов моноизотопного состава (углерод-12) с массой порядка 1 мг для исследований методом масс-спектрометрии и весовым методом. Можно предполагать, что проведение этих работ позволит в будущем сравнивать доли килограмма с теми характеристиками массы группы атомов изотопов, которые получают с помощью масс-спектрометра.

Итак, природный эталон нестабилен, а рукотворный не всегда обеспечивает необходимую точность. И тем не менее до сих пор рукотворный эталон предпочтительнее природного.

1.4. Секунда

Единица времени – секунда – оказалась единственной единицей, которая не подчиняется метрической системе. Все попытки создания

десятичного года и десятичных часов окончились неудачей. В Оружейной палате Московского Кремля хранятся карманные золотые часы, показывающие «метрическое» время (неделя – 10 суток, сутки – 10 ч, час – 100 мин, минута – 10 с). Это один из реликтов пропаганды «метрического» времени. Однако время сохранило шестидесятеричную ($12 \cdot 5$) систему счисления, которую предложили нам древние астрономы различных стран и эпох.

Интересно, что в разных частях земного шара, у различных народов многие календари, созданные в разное время, используют шестидесятеричную систему счисления. Действительно, двенадцать знаков зодиака в Европе, двенадцать «земных ветвей» и пять «стихий» ($12 \cdot 5 = 60$) в китайском календаре и т.д. Эта система связана с вращением Земли и движением ее вокруг Солнца, поэтому очевидно, что единица времени естественным образом должна вытекать из астрономических данных.

Исторически секунда – это $1/86400$ часть средних солнечных суток, за которые принимается интервал времени между двумя последовательными верхними кульминациями среднего Солнца.

Однако согласно наблюдениям за продолжительный период времени вращение Земли подвержено нерегулярным колебаниям, что не позволяет рассматривать в качестве эталона понятие средних солнечных суток. Поэтому по предложению Международного астрономического союза секунда была «привязана» к движению Земли по ее орбите вокруг Солнца, т.е. в качестве эталона времени была принята длительность тропического года, или интервал времени между двумя весенними равноденствиями, следующими одно за другим. И тогда секунда была определена как $1/31556925,9747$ часть тропического года, а продолжительность тропического года устанавливалась равной $31556925,9747$ с, или $365,2422$ средних суток. Действительно, погрешность такого определения секунды ввиду значительной продолжительности тропического года относительно невелика – 10^{-7} % (погрешность лучших механических часов составляет около 10^{-3} %, погрешность кварцевых генераторов – 10^{-6} %). Казалось, что наконец-то найден действительно природный эталон с достаточно высокой точностью, правда, не совсем удобный для воспроизведения. Согласуясь с определением понятия эталона, мы должны проводить сличение результатов измерений отрезка времени в течение нескольких лет. Например, для того чтобы относительная погрешность определения

длины тропического года не превышала 10^{-10} (или 10^{-8} %), необходимо проводить наблюдения в течение не менее 10 лет.

Прошло всего несколько лет после утверждения «астрономического» эталона времени, и развитие физики предложило новые, атомные часы, созданные на основе электромагнитного излучения. В 1967 г. было принято новое определение секунды как интервала времени, в котором размещаются 9192631770 периодов электромагнитного излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Длина волны излучения равна 32,6 мм. Колебания, получаемые при возбуждении атома цезия-133, оказались наиболее надежными хранителями единицы времени. Стабильность частоты атомных цезиевых часов составляет $(1-2) \cdot 10^{-10}$ в течение нескольких суток. Это на порядок выше точности, с которой может определяться астрономическое время за период, равный нескольким годам. Однако новое определение секунды никак не изменяет и не нарушает Международную систему единиц. Единица осталась той же, но найден способ более точного и более надежного ее воспроизведения. Это, однако, не исключает применения других менее точных способов воспроизведения секунды, когда не требуется предельной точности измерений.

Современные атомные цезиевые часы могут дать ошибку в одну секунду приблизительно за 6300 лет. Еще более точны водородные часы, основанные на использовании атомарного водорода как генератора электромагнитного излучения. Казалось, что физика завершила свой спор с древней астрономией по поводу выбора эталонной единицы времени. Но в 1967 г. были открыты нейтронные звездные пульсары, импульсное излучение которых в ряде случаев обладает высокой стабильностью во времени. Например, импульсы обнаруженного в 1987 г. пульсара PSR834+06 излучаются в пространство с временной погрешностью 10^{-11} секунды. Такой источник стабильного времени может дать ошибку в одну секунду за 3200 лет. На уровне 1990-х гг. точность измерения времени по астрономической шкале времени составила $2 \cdot 10^{-3}$ с, по шкале «пульсарного» времени – $0,2 \cdot 10^{-3}$ с, по шкале «атомного» времени – около $0,05 \cdot 10^{-3}$ с. Не следует ожидать, что пульсарная шкала времени в ближайшем будущем достигнет точности атомной шкалы. Но применение пульсарной шкалы в качестве независимых от атомных эталонов времени «реперных часов» позволит контролировать неравномерность хода атомных (це-

зиевых, водородных) эталонов. Эта роль «реперных часов» может быть особенно важна для установления единства измерений секунды в международном масштабе. Кроме того, при организации космических экспедиций к планетам Солнечной системы пульсарная шкала времени может оказаться основным источником воспроизведения точного времени. Поэтому спор между физикой и астрономией за обладание эталоном единицы времени можно снова считать открытым.

В заключение следует отметить, что две из трех основных физических величин – метр и секунда – имеют на сегодня четкую физическую основу. В эталоне длины они однозначно связаны между собой, и неудивительно, что погрешности этих эталонов минимальны, что отражает достижения современной физики. Эталон массы находится особняком как чисто механический эталон, но в настоящее время наука не может предложить ничего лучше. Разработки эталона массы на основе атомных констант продолжаются.

Контрольные вопросы

1. Какими вопросами занимается теоретическая метрология как наука?
2. Развитию каких отраслей и общественных процессов препятствовала несовместимость систем мер и весов в различных странах, существовавшая к концу XVIII в.?
3. Для чего служит эталон единицы физической величины?
4. Приведите примеры использовавшихся ранее эталонов длины, массы, времени.
5. Посредством какого физического явления связаны между собой метр и секунда в сегодняшнем эталоне длины?

Глава 2. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Основные характеристики процесса измерений

2.1.1. Общие определения

Метрология (от греч. *metron* – мера, *logos* – учение) – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. В реальной жизни метрология не только наука, но и область практической деятельности, связанной с изучением физических величин. Предметом метрологии является получение количественной информации о свойствах объектов и процессов, т.е. измерение свойств объектов и процессов с требуемой точностью и достоверностью.

Фундаментальным понятием метрологии является понятие измерения. Под *измерением* понимают совокупность операций, выполняемых с помощью специального технического средства, хранящего единицу измеряемой величины, позволяющего сопоставить измеряемую величину с ее единицей и получить значение этой величины. Результат измерений величины X записывается в виде $X=A[X]$, где A – безразмерное число, называемое числовым значением физической величины; $[X]$ – единица физической величины. Данное определение отражает цель измерения, а также исключает возможность использования этого понятия вне связи с измерительной техникой.

Удачное определение понятия «измерение» дал известный русский философ П.А. Флоренский. Он рассматривал измерение в качестве основного познавательного процесса науки и техники, посредством которого неизвестная величина количественно сравнивается с другой, однородной с нею и считаемой известной, т.е. измеряться должны только «однородные» величины (принцип единства измерений).

Единство измерений – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в физически обоснованных и узаконенных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы.

Деятельность по обеспечению единства измерений расширяется с увеличением масштабов производства, ростом темпа научно-технического прогресса, появлением на производстве, в быту и дру-

гих сферах деятельности многообразия объектов, выполняющих аналогичные функции. Цель этой деятельности – обеспечить сопоставимость результатов измерений, создав тем самым базу для правильного, а затем и наилучшего выбора. Таким образом, в условиях многообразия предложений сопоставимость результатов измерений позволяет осуществлять экономичный выбор с учетом факторов качества и стоимости.

Значение деятельности по обеспечению единства измерений все более возрастает при расширении международных обменов и торговли. Эта деятельность направлена на защиту интересов отечественных потребителей и производителей от пагубных последствий как неверных толкований результатов измерений, так и недостоверных результатов самих измерений.

Огромное значение имеет обеспечение единства измерений и, в частности, контроль за достижением требуемой точности и достоверности в ситуациях, касающихся безопасности или здоровья человека, состояния имущества граждан, окружающей среды, животных или растений. Любой гражданин цивилизованного общества вправе располагать информацией о значениях жизненно важных параметров, которой можно доверять.

Получение достоверной, сопоставимой информации о значении физических параметров путем измерений, выполняемых с соблюдением принципов единства, есть цель и предмет метрологии. Таким образом, метрология непосредственно влияет на качество нашей жизни.

Объектом измерения является физическая величина.

Физической величиной называется одно из свойств физического объекта, явления или процесса, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них (например, температура, масса, КПД, напряжение и т.п.). В последнее время кроме физических величин в прикладной метрологии начали использовать и так называемые нефизические величины. Это связано с применением термина «измерение» в экономике, управлении качеством, банковском деле, информатике и т.п.

В зависимости от степени приближения результата измерения к объективности различают истинное, действительное и измеренное значения физической величины.

Истинное значение физической величины, как правило, неизвестно и применяется только при теоретических исследованиях. Это значение, которое идеальным образом характеризует в количественном и качественном отношении соответствующую физическую величину.

Действительное значение физической величины находится экспериментальным путем и соответствует истинному значению величины с известной погрешностью и доверительной вероятностью, т.е. настолько приближается к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо истинного значения.

Измеренное значение физической величины – это значение, полученное при измерении с применением конкретных методов и средств измерений (СИ).

Соотношение между истинным, измеренным и действительным значениями физической величины определяется следующими постулатами:

1. Истинное значение физической величины существует, однако определить его путем измерения невозможно.

2. Результат измерений стремится к истинному значению измеряемой величины с увеличением числа измерений.

Для оценивания качества измерений стандартами устанавливается такое их свойство, как точность.

Точность – свойство измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Точность измерений определяется их погрешностью.

Погрешность – это разность между результатом измерения (показанием СИ) и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины:

$$\Delta = X_{изм} - X_0 ,$$

где $X_{изм}$ и X_0 – измеренное и действительное значения измеряемой величины.

Погрешность указывает границы неопределенности значения измеряемой физической величины. Она характеризует точность результатов измерений, проводимых с помощью данного средства. Погрешность не следует путать с ошибкой измерений, связанной с субъективными обстоятельствами. Погрешности измерений обычно при-

водятся в технической документации на СИ или в нормативных документах.

В отечественной метрологии точность и погрешность результатов измерений, как правило, определяются сравнением результата измерения с истинным или действительным (условно истинным) значениями измеряемой физической величины, являющимися фактически эталонными значениями измеряемых величин. В условиях отсутствия необходимых эталонов, обеспечивающих воспроизведение, хранение и передачу соответствующих значений единиц величин, необходимых для оценки погрешности результатов измерений, и в отечественной, и в международной практике за действительное значение часто принимают общее среднее значение установленной совокупности результатов измерений. Эта ситуация закреплена применением в Российской Федерации с 2002 г. нового международного метрологического термина – «принятое опорное значение» (accepted reference value).

Принятое опорное значение – это значение физической величины, которое служит в качестве согласованного для сравнения и получено как:

- 1) теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах;
- 2) приписанное значение, базирующееся на экспериментальных работах какой-либо национальной или международной организации;
- 3) согласованное значение, базирующееся на совместных экспериментальных работах под руководством научной или инженерной группы;
- 4) среднее значение заданной совокупности результатов измерений.

Последний способ используется лишь в случае, когда способы получения величины, указанные в пп. 1, 2, 3, недоступны.

Таким образом, согласно международной метрологической терминологии, *точность* – степень близости результата измерений к принятому *опорному* значению. Это международное определение точности не противоречит отечественному определению, в соответствии с которым точность является отражением близости результата измерений к *действительному* значению, так как в качестве опорного значения может быть принято действительное (фактически эталонное) значение измеряемой величины.

Специальное техническое средство, хранящее единицу величины, позволяющее сопоставить измеряемую величину с ее единицей и имеющее нормированные метрологические характеристики, т.е. характеристики, влияющие на результаты и на точность измерений, называется *средством измерения*. Особое место среди средств измерения занимают меры и эталоны. *Мера* – это средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера (гири, концевые меры длины, нормальные элементы (меры ЭДС) и др.). *Эталон единицы величины* – средство измерения, предназначенное для хранения и воспроизведения единицы величины с целью передачи ее другим средствам измерений данной величины.

Процесс измерения предполагает наличие как средства, так и метода измерения. Под *методом измерения* понимают специальный прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей.

В международной метрологической терминологии термин «метод измерения» (measurement method) обозначает совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результата измерения с заданной точностью. Таким образом, международный термин «метод измерения» адекватен отечественному термину «методика выполнения измерений» (МВИ) и соответственно значительно шире по смыслу, чем определение термина «метод измерения», данное в РМГ 29-99¹. Далее в изложении термин «метод измерения» употребляется в значении, соответствующем международной метрологической терминологии.

Точность может быть характеристикой как результата измерения, так и метода измерения и самого средства измерения. Как характеристика результата и метода измерения точность может быть представлена двумя свойствами: правильностью и прецизионностью. Эти термины отражают раздельное влияние на результат измерения систематических и случайных погрешностей.

Термины «правильность» (trueness) и «прецизионность» (precision) в отечественных нормативных документах по метрологии до настоящего времени не использовались.

¹ Рекомендации по межгосударственной стандартизации, иначе – межгосударственная система обеспечения единства измерений и терминологии в СНГ.

Правильность метода или результата измерения – степень близости результата измерения к истинному или условно истинному (действительному) значению измеряемой величины или в случае отсутствия эталона измеряемой величины – степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений, к принятому опорному значению. Показателем правильности обычно является значение систематической погрешности.

Систематической называется погрешность, остающаяся постоянной или изменяющаяся по определенному закону при повторных измерениях одной и той же величины. Такая погрешность связана с каким-либо устойчивым фактором, например с ошибкой в градуировке шкалы. После обнаружения и исследования фактора, вызывающего систематическую погрешность, она *может быть устранена или компенсирована* при записи результата измерения. Таким образом, правильность – свойство измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей. Результаты измерений правильны, когда они не искажены систематическими погрешностями.

Прецизионность – степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных установленных условиях. Эта характеристика зависит только от случайных погрешностей и не имеет отношения к истинному или установленному значению измеряемой величины.

Случайной называется погрешность, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайная погрешность связана с факторами, многие из которых не поддаются изучению, например с состоянием оператора или погодными условиями, следовательно, она *неизбежна и неустранима*. Ее влияние может быть компенсировано с помощью поправок, вычисляемых методами, основанными на положениях теории вероятности и математической статистики.

Независимые результаты измерений, используемые при определении показателей прецизионности, – это результаты, полученные способом, на который не оказывает влияния никакой предшествующий результат, полученный при испытаниях того же самого или подобного объекта. Количественные значения показателей прецизионности существенно зависят от регламентированных условий, в которых получены выборки результатов измерений. Крайними случаями

таких выборок являются условия повторяемости (repeatability) и условия воспроизводимости (reproducibility).

Несмотря на то что в отечественных нормативных документах по метрологии отсутствовал обобщающий термин «прецизионность», в них использовались термины «повторяемость» («сходимость») и «воспроизводимость» в определениях, близких к международной трактовке. Однако в определениях, приведенных в отечественных документах, не были столь детально и конкретно, как в международных, регламентированы условия проведения экспериментов по получению показателей повторяемости (сходимости) и воспроизводимости.

Условия повторяемости (сходимости) – условия, при которых независимые результаты измерений получаются одним и тем же методом на идентичных объектах испытаний, в одной и той же лаборатории, одним и тем же оператором, с использованием одного и того же оборудования в пределах короткого промежутка времени.

Условия воспроизводимости – условия, при которых результаты измерений получают одним и тем же методом на идентичных объектах испытания, в разных лабораториях, разными операторами, с использованием разного оборудования.

На практике далеко не всегда удается четко разграничить систематические и случайные погрешности. Особые трудности представляет выделение систематических погрешностей. Следует считать, что ряд систематических по своей природе погрешностей мы не знаем и даже не подозреваем об их существовании. В связи с этим неизученные систематические погрешности и даже некоторые заведомо известные, но не поддающиеся учету и компенсации, иногда причисляют к случайным. Поэтому среди характеристик точности нет понятий, строго отражающих систематическую и случайную составляющие общей погрешности. Термины «правильность» и «прецизионность» указывают скорее на способы обработки результатов с целью получения этих составляющих общей погрешности, чем на природу самой составляющей погрешности. Связь с природой составляющих общей погрешности следует из рассмотрения процедур получения характеристик правильности и прецизионности.

По отношению к изменению во времени измеряемой величины все измерения подразделяются на статические и динамические.

Статические измерения характеризуются постоянством измеряемой величины в процессе измерений.

Динамические измерения характеризуются изменением измеряемой величины в процессе измерений.

По числу наблюдений физической величины в процессе измерения все измерения подразделяются на однократные и многократные.

Однократным называется измерение, результат которого выводится на основании одного наблюдаемого значения измеряемой величины.

Многократным называется измерение, результат которого выводится на основании многократных независимых наблюдений значений измеряемой величины.

Наблюдаемым значением (observed value) называется значение измеряемой физической величины, полученное в результате единичного наблюдения.

Результатом измерения (test result) называется значение измеряемой величины, полученное с использованием регламентированного метода измерений.

В зависимости от метрологического назначения все измерения делятся на технические и метрологические.

Технические измерения проводятся с помощью рабочих средств измерений.

Метрологические измерения выполняются при помощи эталонов с целью воспроизведения единиц физических величин.

Приведем еще три общеметрологических понятия, необходимых для дальнейшего изложения основ метрологии. Это понятия «метрологическая служба», «поверка средств измерения» и «аттестация методик выполнения измерения».

Обеспечение единства измерений реализуется метрологическими службами. *Метрологическая служба* – совокупность субъектов деятельности и видов работ, направленных на обеспечение единства измерений, иначе говоря, организация, отдельное предприятие или отдельное структурное подразделение, на которые возложена ответственность за обеспечение единства измерений. Это может быть государственная метрологическая служба, метрологические службы государственных органов управления Российской Федерации и метрологические службы юридических лиц.

Основные виды деятельности метрологической службы – поверка и калибровка средств измерений, аттестация методик выполнения измерений. *Поверка средства измерений* – это определение спе-

циальным органом метрологической службы пригодности СИ на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждение их соответствия установленным обязательным требованиям. Иначе, поверка средства измерений заключается в определении погрешностей СИ и в установлении его пригодности к применению. Проведение поверки позволяет установить, находятся ли метрологические характеристики средства измерений в заданных пределах. *Калибровка средства измерений* – совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных метрологических характеристик и (или) пригодности к применению СИ, не подлежащего государственному метрологическому контролю и надзору. *Аттестация методик выполнения измерений (МВИ)* – процедура установления и подтверждения соответствия МВИ предъявляемым к ней метрологическим требованиям.

Поверочная схема – утвержденный в установленном порядке документ, определяющий средства, методы и точность передачи размеров единиц от государственного эталона рабочим средствам измерений. Поверочные схемы разделяют на государственные и локальные. Государственные поверочные схемы регламентируются государственными стандартами и распространяются на все средства измерений данного вида. Локальные поверочные схемы предназначены для метрологических служб государственных органов управления и юридических лиц. Все локальные схемы должны соответствовать требованиям соподчиненности, которая определена государственной поверочной схемой. Поверочная схема состоит из чертежа и текстовой части. На чертеже указывают наименование средств измерений, диапазоны значений физических величин, обозначения и значения погрешностей, наименования методов поверки. Текстовая часть состоит из вводной части и пояснений к элементам поверочной схемы.

2.1.2. Временные характеристики измерений

При *статических измерениях* измеряемая величина постоянна во времени или время измерения существенно меньше времени изменения физической величины: $\tau_{изм} \ll \tau_{вел}$ (большинство измерительных приборов).

При *динамических измерениях* измеряемая величина непостоянна в процессе измерений: $\tau_{изм} \gg \tau_{вел}$ (самопишущие регистраторы и осциллографы).

2.1.3. Способы получения результатов

Прямые измерения. Измеряемую физическую величину находят непосредственно из опытных данных ($Q = X$) путем сопоставления с мерой или шкалой, градуированной по мере (например, при измерении длины, температуры, давления, массы и т.п.).

Прямые измерения величин можно производить следующими методами.

При использовании *метода непосредственной оценки* значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора (измерение давления пружинным манометром, массы – циферблатными весами, силы электрического тока – амперметром).

При применении *метода сравнения с мерой* – измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (например, измерение массы рычажными весами с уравниванием гирями).

Дифференциальный метод – метод сравнения с мерой, при котором на измерительный прибор действует разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой (измерения, выполняемые при проверке мер длины сравнением с образцовой мерой на компараторе).

Нулевой метод – метод сравнения с мерой, при котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля (измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием).

Метод совпадений – метод сравнения с мерой, при котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов (измерение длины с помощью штангенциркуля с но-

ниусом, когда наблюдают совпадение отметок на шкалах штангенциркуля и нониуса).

Метод замещения – метод сравнения с мерой, при котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой (взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов).

Косвенные измерения. Искомую физическую величину определяют на основании известной зависимости между нею и величинами, подвергаемыми прямым измерениям (площадь прямоугольника определяют по результатам измерения и перемножения сторон, плотность твердого тела – по результатам измерения и последующего деления массы на объем и т.д.).

Примеры. $Q = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$; $V_{шар} = \pi D^3/6$; $U = R I$; $Q = I^2 R T$.

Совокупные измерения. Физическая величина определяется по ряду измерений нескольких одноименных величин, на основании которого составляется система уравнений. Решение этой системы и определяет физическую величину.

Пример. Определение содержания естественных радионуклидов урана, тория и калия-40 по гамма-спектрометрическим измерениям.

$$C_U = a_{00} I_1 + a_{01} I_2 + a_{03} I_3,$$

$$C_{Th} = a_{10} I_1 + a_{11} I_2 + a_{13} I_3,$$

$$C_K = a_{20} I_1 + a_{21} I_2 + a_{23} I_3,$$

где C_U , C_{Th} и C_K – содержание урана, тория и калия в исследуемой среде соответственно; I_1 , I_2 и I_3 – интенсивности гамма-излучения в выбранных «характерных» областях спектра гамма-излучения; $a_{m,n}$ – постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально по измерениям на эталонных средах.

Совместные измерения. Осуществляют измерения двух или нескольких величин для нахождения зависимости между ними.

Пример. Определение зависимости сопротивления медного провода от температуры: $R_{Cu} = f(T^\circ)$ (рис. 2.1).

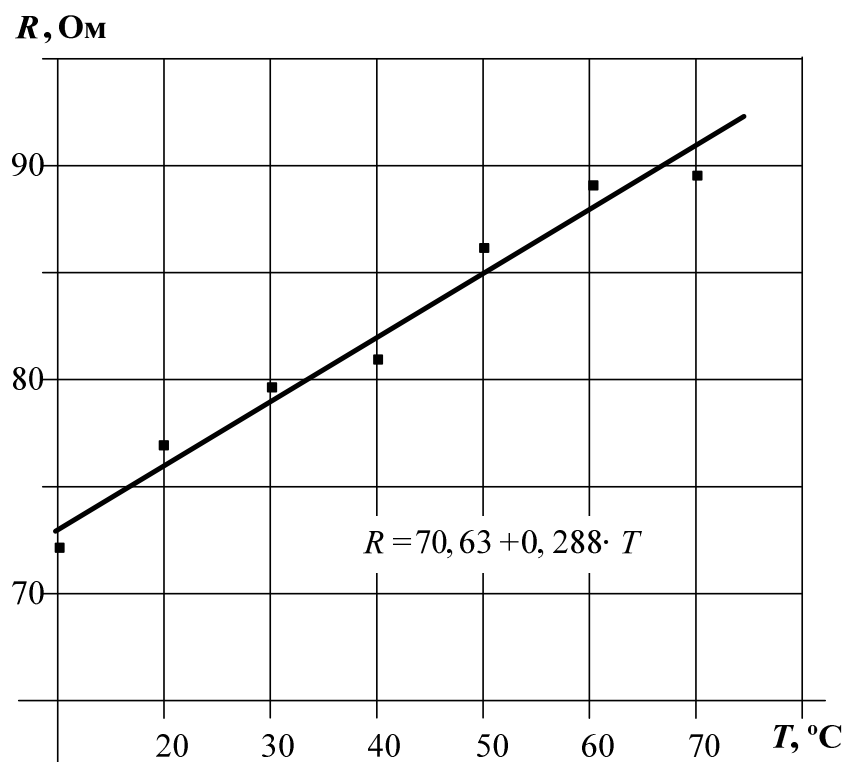


Рис. 2.1. Экспериментальное определение зависимости электрического сопротивления медного провода от температуры

2.1.4. Точностные характеристики измерений

Измерения максимально возможной точности:

- создание и эксплуатация эталонов, воспроизведение основных единиц измерений;
- измерения в научных исследованиях;
- определение абсолютных физических постоянных (e^- – заряд электрона, g – ускорение свободного падения, m_p – масса протона и т.п.).

Погрешность измерений данного типа определяется только текущим состоянием развития науки и техники.

Контрольно-поверочные и лабораторные измерения – измерения, при которых погрешность не должна превышать некоторого определенного уровня (метрологическая аттестация средств измерений, лабораторный анализ, экспертные измерения, Госнадзор, поверка и др.).

Технические измерения – измерения, при которых погрешность оценивают по метрологическим характеристикам средств измерений с учетом применяемого метода измерений.

2.1.5. Способ выражения результата измерения

Абсолютный способ выражения результата предполагает прямые измерения одной или нескольких основных величин или использование значений физических констант. Примером абсолютных измерений может служить определение длины в метрах, силы электрического тока в амперах, ускорения свободного падения в метрах на секунду в квадрате.

Пример. Определить падение напряжения на участке медного провода длиной $L = 1000$ м и диаметром $d = 4$ мм при прохождении по нему тока $I = 5$ А. При расчете используются следующие константы: π и ρ – удельное сопротивление.

$$\begin{aligned}R &= \rho L/S, \\S_{кр} &= \pi d^2/4, \\ \rho_{мед} &= 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}, \\ U &= I R = 4 \cdot I \cdot \rho L / \pi d^2 = 6,97 \text{ В}.\end{aligned}$$

При *относительном* способе выражения результата измеряется отношение измеряемой величины к одноименной величине, которая выполняет роль единицы измерения, или к одноименной величине, которая принята за исходную величину. В качестве примера относительных измерений можно привести измерение относительной влажности воздуха, определяемой как отношение количества водяных паров в 1 м^3 воздуха к количеству водяных паров, которое насыщает 1 м^3 воздуха при данной температуре.

2.2. Погрешности измерений

Погрешность измерений – разность, полученная между истинной (действительной) величиной и результатом измерения:

$$\Delta = |Q - x|.$$

Обобщенная классификация погрешностей измерений приведена на рис. 2.2.

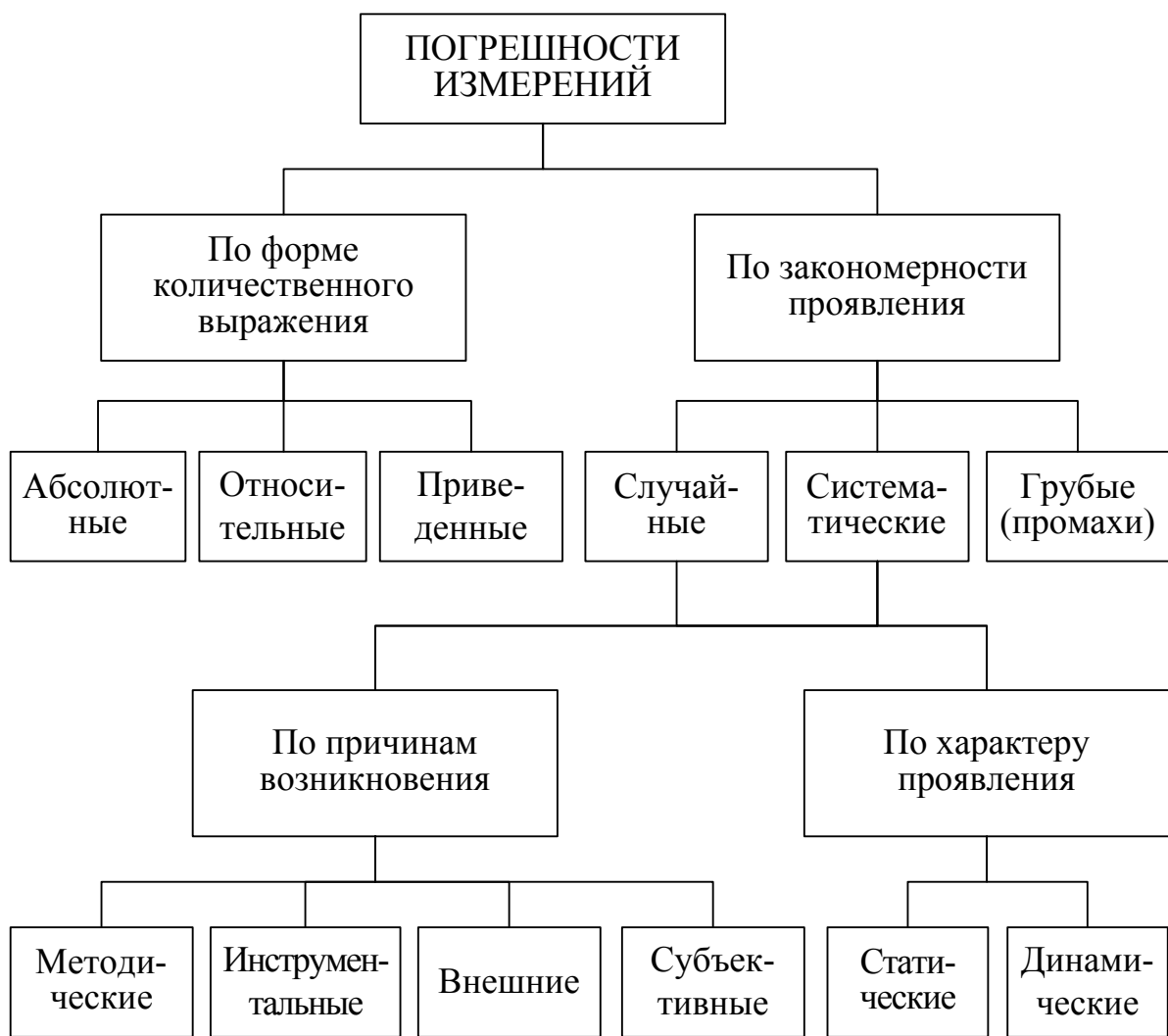


Рис. 2.2. Классификация погрешностей измерений

2.2.1. Типы погрешностей

Случайные погрешности – погрешности, вызываемые нерегулярными факторами. Они полностью подчиняются вероятностным законам и обрабатываются методами математической статистики.

Определение действительных значений физической величины и случайных погрешностей возможно только при проведении *серии измерений при неизменных условиях*.

Систематические погрешности – погрешности, вызываемые влиянием постоянных факторов на процесс измерения.

Примеры. Измерение ЭДС сухой батареи, измерение времени различными часами, параллакс при отсчете стрелочного прибора, измерение длины различными мерами, например портняжным метром.

Выявление систематических погрешностей возможно только при изменении условий измерения или проведении измерений с изменением определенного параметра.

Пример. Измерение напряжения в интервале от 0 до 50 В через 10 вольт (10, 20, 30, 40, 50) дало такую серию ошибок: 0,47; 0,53; 0,6; 0,8; 0,86.

Отложим по оси абсцисс значения напряжения U , а по оси ординат – значения погрешности Δ в вольтах (рис. 2.3).

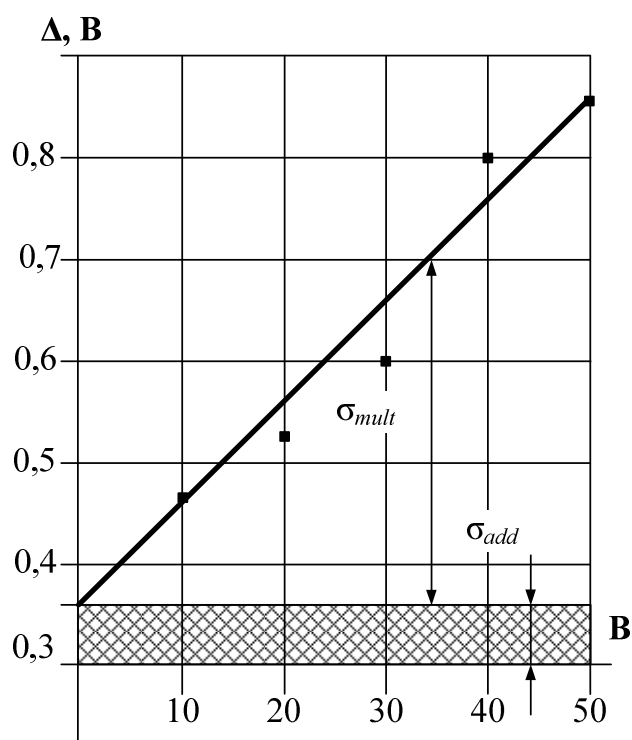


Рис. 2.3. Графическое представление случайной и систематической составляющих погрешности

Расположение полученных точек можно аппроксимировать прямой линией, уравнение которой $\Delta = 0,337 + 0,0105U$. Это значит, что при любых значениях напряжения величина погрешности не может быть менее 0,337 В. Данная погрешность, которая постоянно суммируется, называется *аддитивной* (addition) и вызывается *случайными процессами* при измерении. Другими словами, это *случайная составляющая* общей погрешности измерений. Вторая составляющая погрешности ($0,0105U$) *увеличивается* по мере возрастания напряже-

ния, поэтому называется *мультипликативной* (multiplication). Она вызывается *систематическим* увеличением параметра, т.е. является *систематической составляющей* общей погрешности измерений. На рис. 2.3 дано графическое представление случайной и систематической составляющих погрешности.

$$\Delta = 0,337 + 0,0105U,$$

$$\sigma_{add} = 0,337 \text{ (В)},$$

$$\sigma_{mult} = 0,0105U \text{ (В)}.$$

Абсолютные аддитивные погрешности не зависят от измеряемой величины X , а мультипликативные прямо пропорциональны значению X . Источники аддитивной погрешности – трение в опорах, неточность отсчета, шум, наводки и вибрации. От этой погрешности зависит наименьшее значение величины, которое может быть измерено прибором. Причины мультипликативной погрешности – влияние внешних факторов и старение элементов и узлов приборов (например, усталость металла бронзовых пружин, обеспечивающих противодействующий момент в электромеханических приборах).

Случайные и систематические погрешности в процессе измерений проявляются одновременно: общая погрешность равна сумме погрешностей:

$$\Delta = \Delta_{сл} + \Delta_{сист}.$$

2.2.2. Правила округления и записи результатов измерений

Погрешность результата измерений позволяет определить те цифры результата, которые являются достоверными. Нецелесообразно удерживать в выражении для измеренного значения физической величины большое число цифр, так как цифры младших разрядов могут оказаться недостоверными. Распространенной ошибкой при оценивании результатов и погрешностей измерений является вычисление их и запись с большим числом значащих цифр. Этому способствует использование для расчетов компьютеров, позволяющих получать результаты расчета с четырьмя и более значащими цифрами. Однако погрешности измерений не всегда требуется знать с очень высокой точностью. В частности, для технических измерений допустимой считается погрешность оценивания погрешности в 15...20%. Соответствующим стандартом установлено, что в численных показате-

лях точности измерений (в том числе и в погрешности) должно быть *не более двух значащих цифр*.

В практической метрологии выработаны следующие *правила округления результатов и погрешностей измерений*:

1. В выражении погрешности результата измерения удерживается не более двух значащих цифр, причем последняя цифра обычно *округляется до нуля или пяти*. Погрешность результата измерения указывается *двумя* значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и *одной* – если первая цифра 3 или более.

2. Числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности. Иначе говоря, результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

Примеры. $235,732 \pm 0,15$ округляется до $235,73 \pm 0,15$, но не до $235,7 \pm 0,15$. Результат 4,0800, погрешность 0,001; результат округляют до 4,080.

При промежуточных вычислениях целесообразно, чтобы используемые числа содержали на одну значащую цифру больше, чем будет в окончательном результате. Это позволяет уменьшить погрешность от округления.

3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов (первая из отбрасываемых цифр, считая слева направо) *меньше пяти*, то остающиеся цифры не меняются. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются.

Примеры. $442,749 \pm 0,4$ округляется до $442,7 \pm 0,4$; 174437 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 174400.

4. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов *больше или равна пяти*, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю сохраняемую цифру увеличивают на единицу.

Примеры. $37,268 \pm 0,5$ округляется до $37,3 \pm 0,5$; $37,253 \pm 0,5$ округляется до $37,3 \pm 0,5$; при сохранении трех значащих цифр число 12567 округляют до 12600, число 125,67 – до 126.

5. Если отбрасываемая цифра *равна пяти*, а следующие за ней цифры неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная.

Примеры. Число 232,5 при сохранении двух значащих цифр округляют до 232, а число 233,5 – до 234.

6. Округление следует выполнять сразу до желаемого числа значащих цифр, поэтапное округление может привести к ошибкам.

Пример. Поэтапное округление результата измерения $220,46 \pm 4$ дает на первом этапе $220,5 \pm 4$ и на втором этапе 221 ± 4 , в то время как правильный результат округления 220 ± 4 .

7. Округление производят лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

Особенно внимательно нужно относиться к записи результата измерения без указания погрешности (что крайне нежелательно). В этом случае в записываемом числе оставляются только те цифры, за достоверность которых можно ручаться, т. е. все значащие цифры записанного числа должны быть достоверными. Значащими цифрами числа считаются все цифры от первой слева, не равной нулю, до последней записанной справа цифры, при этом нули, записанные в виде множителя 10^n , не учитываются. Поэтому записи $2,4 \cdot 10^3$ В и 2400 В не являются тождественными. Первая запись означает, что верны цифры тысяч и сотен вольт и истинное значение может быть, например, 2,42 или 2,38 кВ. Запись 2400 В означает, что верны и единицы вольт, истинное значение может быть 2400,2 или 2390,8 В, но не 2420 или 2380 В.

Пример. В результате измерения получено напряжение 3720 В, при этом погрешность измерения составляет 1%. Результат измерения следует записать (если погрешность не указывается) $37 \cdot 10^2$ В, или $3,7 \cdot 10^3$ В, или 3,7 кВ.

В зависимости от назначения измерений и характера использования их результатов точность измерений может быть выражена:

- интервалом, в котором с установленной вероятностью находится суммарная погрешность измерения;
- интервалом, в котором с установленной вероятностью находится систематическая составляющая, и стандартной аппроксимацией

и среднеквадратическим отклонением (СКО) функции распределения случайной составляющей погрешности измерения;

- стандартными аппроксимациями и СКО функций распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения;
- функциями распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения.

Неисключенную систематическую погрешность отмечают при записи результата измерения, как правило, путем указания границ интервала, в котором с заданной вероятностью P_c находится систематическая погрешность, и, если это возможно, указывают и функцию распределения систематической погрешности. Например, запись «1,018564 В; Δ_c от 0 до $5 \cdot 10^{-6}$ В; $P_c = 0,95$ » означает, что измеренное напряжение равно 1,018564 В, причем возможна систематическая погрешность от 0 до 5 мкВ с вероятностью 0,95.

Случайную погрешность, как правило, указывают обозначением вида стандартной аппроксимации и оценки СКО в единицах измеряемой величины. Например, запись «220 В; $\sigma(\Delta) = 0,1$ В; равн.» означает, что напряжение равно 220 В, причем случайная погрешность распределена по равномерному закону со среднеквадратическим отклонением 0,1 В.

Если руководствоваться приведенными правилами округления, то количество значащих цифр в числовом значении результата измерений дает возможность ориентировочно судить о точности измерения. Это связано с тем, что предельная погрешность, обусловленная округлением, равна половине единицы последнего разряда числового значения результата измерения.

2.2.3. Абсолютная и относительная погрешности

Абсолютная погрешность (Δ) – отклонение от истинного значения в выбранных единицах измерения

$$\Delta = x_0 - x_i.$$

Величина погрешности имеет размерность.

Относительная погрешность (δ) – характеризует качество измерений:

$$\delta = \frac{\Delta}{X}.$$

Это есть отношение абсолютной погрешности к измеренной величине или к средней величине.

Возможное представление измеренной величины как с абсолютной, так и с относительной погрешностью: $L = (50 \pm 1)$ см или $L = 50$ см $\pm 2\%$.

Как использовать на практике величину погрешности?

Пример. Два студента в ходе двух опытов измеряли сопротивление и получили следующие результаты.

В первом случае $R_1 = (40 \pm 5)$ Ом, $R_2 = (42 \pm 8)$ Ом.

Различие между значениями модулей величин незначимое, поскольку оно находится в пределах погрешности. Можно заключить, что студенты измеряли одно и то же сопротивление.

Во втором случае $R_1 = (35 \pm 2)$ Ом, $R_2 = (44 \pm 1)$ Ом.

Различие значимое: погрешности по величине менее разницы модулей. Вероятно, студенты измеряли различные сопротивления.

2.3. Погрешности косвенных измерений

При косвенных измерениях значение искомой величины q находят на основании математической зависимости, связывающей эту величину с одной или несколькими величинами (x, y, \dots, w), измеряемыми *прямыми методами*:

$$q = f(x, y, \dots, w).$$

Погрешность результата q также будет функционально связана с погрешностями измеряемых величин x, y, \dots, w .

Значения x, y, \dots, w обычно находят путем прямых измерений, и их погрешности определяются чаще всего пределами допускаемых погрешностей применяемых средств измерений. Систематические погрешности полагают исключенными путем введения поправок. Иногда погрешности измерений аргументов бывают заданы не их границами, а характеристиками составляющих: СКО случайной погрешности и доверительными границами неисключенной систематической погрешности. В зависимости от применяемых методов и средств измерений, а также от условий, в которых производятся измерения величин x, y, \dots, w , значения их погрешностей могут быть независимы или коррелированы между собой. В практике поверки средств измерений электрических величин случаи, когда погрешности применяемых образцовых СИ коррелированы, встречаются достаточно часто,

например при использовании одного и того же нормального элемента для настройки нескольких образцовых СИ, колебаниях напряжения общей цепи питания и т.п. При этом коэффициент корреляции, как правило, остается неизвестным. В таких случаях приходится ориентироваться на наихудший случай, полагая коэффициент корреляции равным 1.

Для нахождения погрешности результата косвенного измерения можно воспользоваться следующими правилами.

1. Если окончательный результат измерения выражается суммой или разностью двух или более измеренных значений:

$$q = x + \dots + z - (u + \dots + w)$$

и погрешности $\Delta x, \dots, \Delta w$ независимы и случайны, то абсолютная погрешность результата может быть найдена по формуле

$$\Delta q = \sqrt{(\Delta x)^2 + \dots + (\Delta z)^2 + (\Delta u)^2 + \dots + (\Delta w)^2}.$$

Когда погрешности аргументов коррелированы, значение Δq может превышать полученное по приведенной выше формуле, но всегда удовлетворяет условию

$$\Delta q \leq \Delta x + \dots + \Delta z + \Delta u + \dots + \Delta w.$$

2. Если окончательный результат измерения выражается произведением или частным двух или более измеренных значений:

$$q = \frac{x \times \dots \times z}{u \times \dots \times w}$$

и погрешности $\delta x, \dots, \delta w$ независимы и случайны, то относительная погрешность результата может быть найдена по формуле

$$\delta q = \sqrt{(\delta x)^2 + \dots + (\delta z)^2 + (\delta u)^2 + \dots + (\delta w)^2}.$$

Когда погрешности аргументов коррелированы, значение δq может превышать полученное по приведенной формуле, но всегда удовлетворяет условию

$$\delta q \leq \delta x + \dots + \delta z + \delta u + \dots + \delta w.$$

3. Если окончательный результат измерения является функцией одной величины:

$$q = f(x),$$

то погрешность результата составляет

$$\delta q = \left| \frac{dq}{dx} \right| \delta x.$$

4. В общем случае погрешность функции нескольких величин

$$q = f(x, y, \dots, w),$$

погрешности которых независимы и случайны, находится по формуле

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial w} \delta w\right)^2}.$$

В любом случае погрешность никогда не превышает значения

$$\delta q = \left|\frac{dq}{dx}\right| \delta x + \left|\frac{dq}{dy}\right| \delta y + \dots + \left|\frac{dq}{dw}\right| \delta w.$$

Пример. При поверке ваттметра на постоянном токе действительное значение мощности измеряют косвенно при помощи потенциометра. При этом отдельно измеряют ток в последовательной цепи с помощью шунта и напряжение параллельной цепи с помощью делителя напряжения. Затем рассчитывают мощность по формуле

$$P = \frac{U_U}{K_{дел}} \cdot \frac{U_I}{R_{ш}},$$

где U_U – напряжение, измеренное на выходе делителя; $K_{дел}$ – коэффициент деления делителя; U_I – напряжение, измеренное на шунте; $R_{ш}$ – сопротивление шунта.

Погрешность измерения напряжения складывается из погрешности потенциометра и погрешности нормального элемента. Пределы допускаемых погрешностей для перечисленных элементов составляют: $\delta_{н.нм} = 0,005 \%$; $\delta_{дел} = 0,005 \%$; $\delta_{н.э} = 0,005 \%$; $\delta_{ш} = 0,01 \%$. Относительная погрешность измерения мощности будет складываться из удвоенной погрешности потенциометра постоянного тока (ППТ) и нормального элемента, погрешностей делителя и меры сопротивления (шунта)

$$\delta P = \sqrt{(2\delta_{н.нм})^2 + (2\delta_{н.э})^2 + \delta_{дел}^2 + \delta_{ш}^2} = \sqrt{(2 \cdot 0,005)^2 + (2 \cdot 0,005)^2 + 0,005^2 + 0,01^2} = 0,018\%.$$

Метод сравнения с образцовым прибором (мерой) описан в п. 5.6.3.

Наличие корреляции между погрешностями отдельных аргументов может приводить не только к увеличению, но и к уменьшению погрешности окончательного результата по сравнению с рассчитанной по приведенным формулам. Это следует учитывать при выборе метода измерения.

Упрощенные способы расчета погрешностей косвенных измерений приведены в прил. 1.

Контрольные вопросы

1. Назовите признаки, по которым классифицируют погрешности.
2. Что принято называть абсолютной, относительной и приведенной погрешностями?
3. Сформулируйте свойства случайной и систематической составляющих погрешности измерений.
4. Перечислите методы проведения прямых измерений.
5. Как определяются погрешности косвенных измерений?

Глава 3. АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

3.1. Распределение наблюдаемых значений величины

Для увеличения точности измерений при наличии случайных погрешностей производят не однократное наблюдение измеряемой величины, а многократное. Принято называть значение величины, полученное при отдельном наблюдении, *результатом наблюдения*, а среднее арифметическое группы результатов наблюдений – *результатом измерения*. Будем полагать, что систематические погрешности при наблюдениях отсутствуют либо исключены из результатов наблюдений введением поправок. В этом случае за результат измерения принимают среднее арифметическое значение отдельных наблюдаемых значений (выборочное среднее)

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

где n – число наблюдений; x_i – результат i -го наблюдения.

3.1.1. Гистограммы

Когда при проведении с одинаковой тщательностью и в одинаковых условиях повторных наблюдений одной и той же постоянной величины получают 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 следует 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. Он 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 закон распределения вероятностей случайной величины. Различают две формы 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 – указав относительную частоту попаданий n_k/n . Построив на диаграмме прямоугольники, основанием которых является ширина интервалов, а высотой n_k/n , получим гистограмму, дающую представление о плотности распределения результатов наблюдений в данном опыте. Пусть в одном из опытов получены результаты 50 наблюдений, сгруппированные следующим образом:

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

Гистограмма, построенная на основании этих результатов, показана на рис. 3.1.

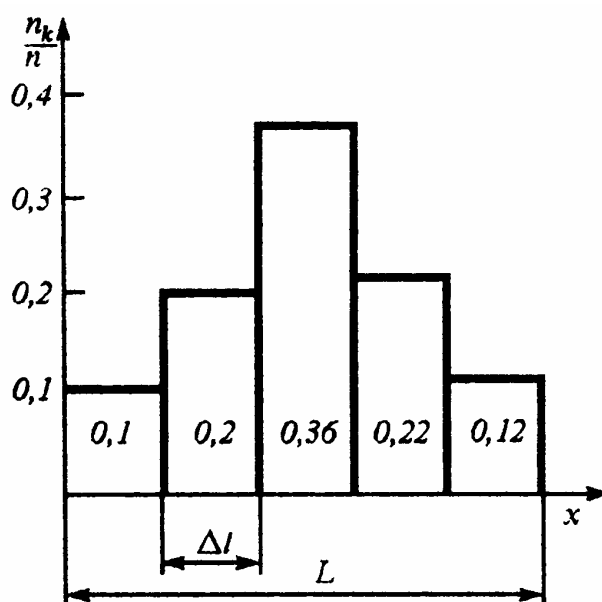


Рис. 3.1. Гистограмма

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.

3.1.2. Предельное распределение

При бесконечном увеличении числа наблюдений $n \rightarrow \infty$ и бесконечном уменьшении ширины интервалов $\Delta l \rightarrow 0$ ступенчатая кривая, огибающая гистограмму, перейдет в плавную кривую $f(x)$ (рис. 3.2). Она называется *кривой плотности распределения вероятностей слу-*

чайной величины, а уравнение, описывающее ее, – дифференциальным законом распределения.

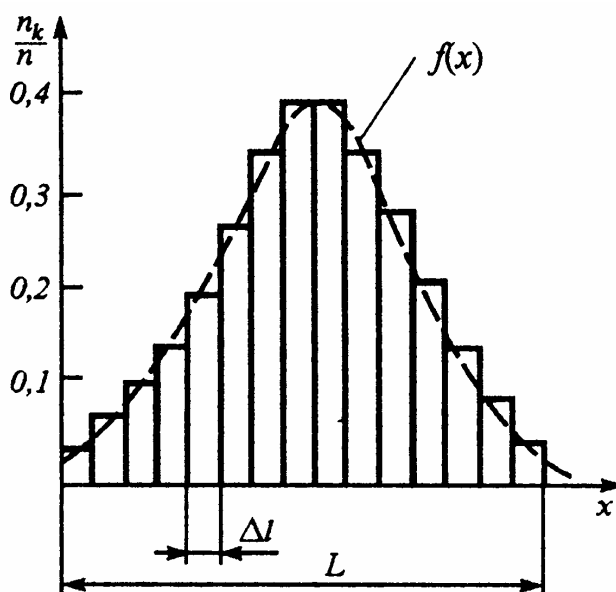


Рис. 3.2. Кривая плотности распределения вероятностей

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 равна

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

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. 3.3.

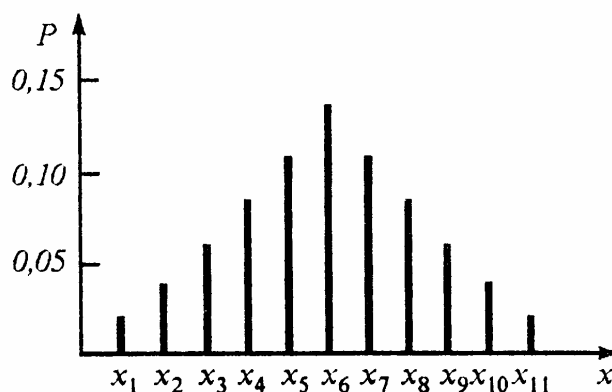


Рис. 3.3. Распределение дискретной случайной величины

3.1.3. Числовые характеристики распределений

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, то моменты называются начальными, а если от центра закона распределения – центральными.

Начальный момент k -го порядка определяется формулами

$$m_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k f(x) dx; \quad (3.1)$$

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

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* ($k=1$):

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

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

Центральные моменты k -го порядка рассчитываются по формулам

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

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

Из центральных моментов особенно важную роль играет второй момент ($k=1$), *дисперсия случайной величины* D

$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^2 f(x) dx; \quad (3.2)$$

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

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.

3.2. Оценка результата измерения

3.2.1. Центр распределения. Медиана. Математическое ожидание

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.

С учетом многовариантности 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.

3.2.2. Нормальное распределение (распределение Гаусса)

Нормальное распределение плотности вероятности характеризуется тем, что, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, такое распределение имеет сумма бесконечно большого числа бесконечно малых случайных возмущений с любыми распределениями (рис. 3.4). 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.

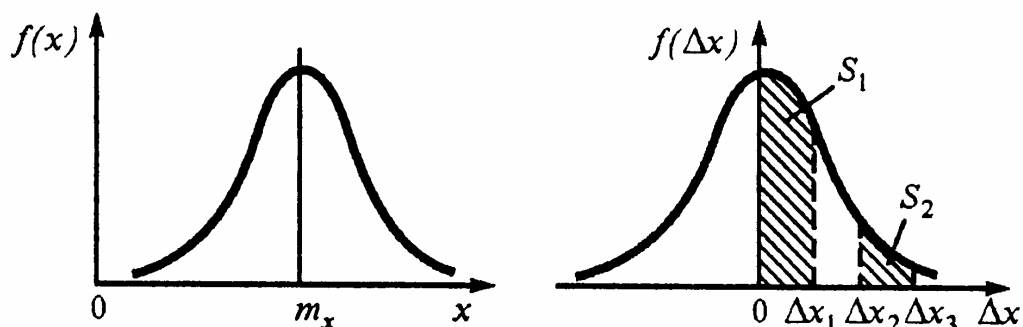


Рис. 3.4. Кривые нормального распределения

В аналитической форме нормальный закон распределения выражается формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3.3)$$

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

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (3.4)$$

Для группы из n наблюдений, распределенных по нормальному закону

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}}. \quad (3.6)$$

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 (при большом числе наблюдений встречаются одинаково часто), т.е. кривая должна быть симметрична относительно оси ординат (аксиома случайности). Математическое ожидание случайной погрешности равно нулю.

Из характера кривой следует, что при нормальном законе распределения малые погрешности будут встречаться чаще, чем большие (аксиома распределения). Так, вероятность появления погрешностей, укладывающихся в интервал от 0 до Δx_1 , которая характеризуется площадью S_1 , будет значительно больше, чем вероятность появления погрешностей в интервале от Δx_2 до Δx_3 (площадь S_2) (см. рис. 3.4).

На рис. 3.5 изображены кривые нормального распределения с различными средними квадратическими отклонениями, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

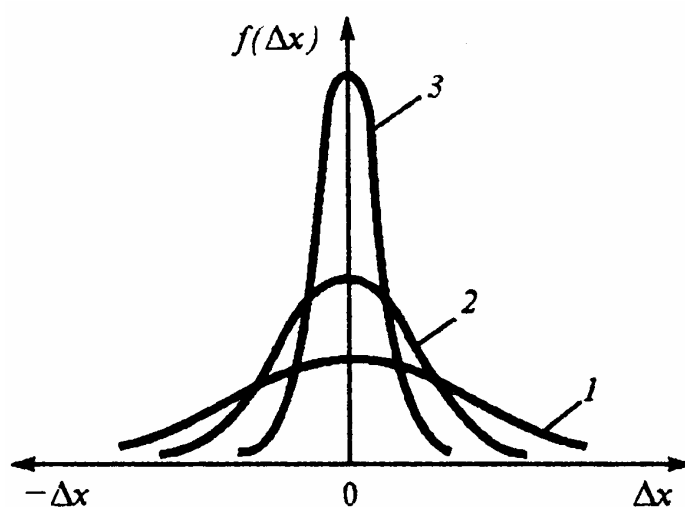


Рис. 3.5. Рассеяние результатов наблюдений

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

3.2.3. Равномерное распределение

Если случайная величина x принимает значения лишь в пределах некоторого конечного интервала от x_1 до x_2 с постоянной плотностью вероятностей (рис. 3.6), то такое распределение называется равномерным и описывается соотношениями

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

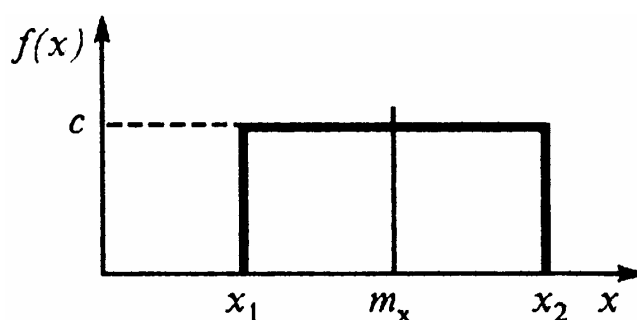


Рис. 3.6. Равномерное распределение случайной величины

Так как площадь, ограниченная кривой распределения, равна единице, то

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

и

$$c = \frac{1}{x_2 - x_1}. \quad (3.7)$$

С учетом приведенного выражения плотность распределения составляет

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

Математическое ожидание величины x равно

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

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 составляет

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

3.2.4. 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 в том случае, если границы для распределения 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 эта 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. 3.7 Δx_1 есть 25 %-я квантиль, так как площадь под кривой $f(\Delta x)$ слева от нее составляет 25% всей площади. Абсцисса Δx_2 соответствует 75%-й квантили. Между Δx_1 и Δx_2 заключено 50% всех возможных значений погрешности, а остальные лежат вне этого интервала.

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

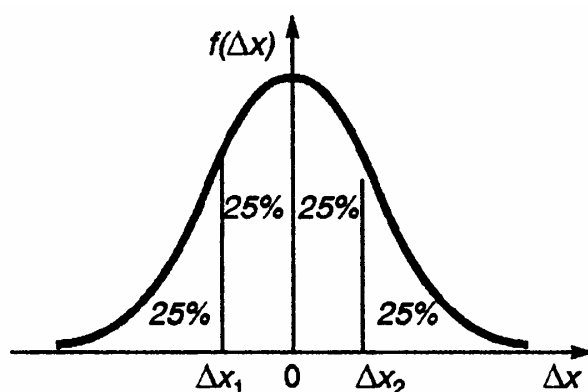


Рис. 3.7. Квантильные оценки случайной величины

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, $\pm 0,3\sigma$ при $P = 0,95$).

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

$$\Delta x(P) = t\sigma, \quad (3.8)$$

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

На графике нормального распределения погрешностей по оси абсцисс отложены интервалы с границами $\pm\sigma$, $\pm2\sigma$, $\pm3\sigma$, $\pm4\sigma$ (рис. 3.8).

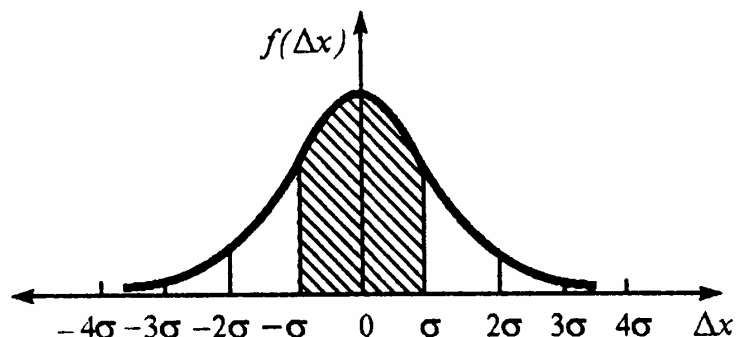


Рис. 3.8. К понятию доверительных интервалов

Доверительные вероятности для этих интервалов приведены ниже:

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

Как видно, 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*.

Грубой погрешностью называется погрешность, существенно превышающая ожидаемую в данных условиях. Причиной грубой погрешности может быть кратковременное изменение условий эксперимента, неправильный отсчет по шкале прибора, неправильная запись результата наблюдений и т.п. Для обнаружения наблюдений, содержащих грубые погрешности, пользуются специальными критериями, позволяющими решить, рассматривать ли данное наблюдение содержащим грубую погрешность и, следовательно, отбросить его или считать его содержащим большую случайную погрешность.

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 соответствии с теорией вероятностей суммирование статистически независимых случайных величин осуществляется путем суммирования их дисперсией:

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

или

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} . \quad (3.9)$$

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 (3.9) 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.

3.3. Прямые измерения с многократными наблюдениями

3.3.1. Среднее квадратическое отклонение

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 (3.6).

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. Повторяя 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 $S_{\bar{x}}$.

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.10)$$

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 (3.8) для оценки доверительных границ случайной погрешности это отражается введением коэффициента t_q вместо t . Коэффициент t_q распределения Стьюдента¹ зависит от числа наблюдений и выбранной доверительной вероятности и находится по таблицам, пример которых приведен ниже.

¹ Английский математик В. Госсет публиковал свои труды под псевдонимом Стьюдент (student – студент)

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			

Так, при числе наблюдений $n = 14$ и доверительной вероятности $P = 0,95$ $t_q = 2,16$.

3.3.2. Обработка результатов измерения с многократными наблюдениями

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.

Последовательность обработки результатов наблюдений:

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 результатов 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 (3.10).

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

Приближенно 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 рас-

пределения принимают за равномерные. При равномерном распределении неисключенных систематических погрешностей границы неисключенной систематической погрешности результата измерения θ вычисляют по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=0}^m \theta_i^2}, \quad (3.11)$$

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 такую же, как 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 равными $\pm \varepsilon$. 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:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3} + S_{\bar{x}}^2}. \quad (3.12)$$

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 результатов или при необходимости дальнейшей их обработки результат измерения представляют в форме X, S_x, n, θ .

3.4. 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 случайным, однократный отсчет x включает в себя инструментальную, методическую и субъективную 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 погрешности 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 отчета всех известных систематических погрешностей можно полагать, что погрешность исправленного результата $x_{испр}$ 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 они 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_i , то доверительные границы суммарной неисключенной систематической погрешности определяют по формуле (3.11).

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 – 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 необходимо учитывать обе составляющие, суммирование их выполняется по формуле (3.12).

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 $x_{испр} \pm \Delta$.

3.5. 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, однако 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 вследствие воздействия влияющих величин.

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

- пределе допускаемой основной погрешности прибора Δ_{np} ;

- дополнительных погрешностях.

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

Таким образом, задача сводится к суммированию составляющих погрешности Δ_{np} , Ψ_1, \dots, Ψ_m .

Верхняя оценка погрешности результата измерения Δ_Σ (без учета знака) может быть найдена суммированием составляющих по абсолютной величине:

$$\Delta_\Sigma = |\Delta_{np}| + \sum_{i=1}^m |\Psi_i|. \quad (3.13)$$

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 (3.11).

Пример. Вольтметром с пределом допускаемой погрешности 0,5% от верхнего предела измерения ($U_V = 1,5$ В) выполнено однократное измерение напряжения U_x на участке электрической цепи сопротивлением $R = 4$ Ом (рис. 3.9). Условия измерения: температура 20°C; магнитное поле до 400 А/м. Показание вольтметра 0,90 В. Сопротивление вольтметра $R_V = 1000$ Ом. Найдём результат и погрешность измерения.

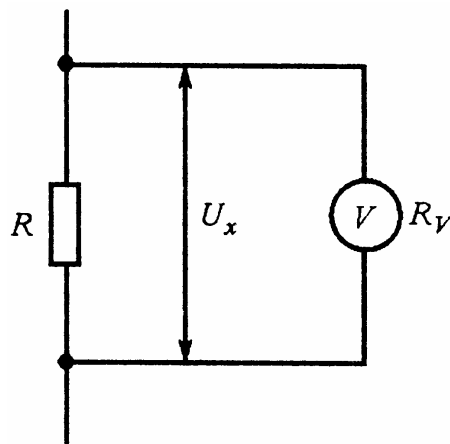


Рис. 3.9. Измерение напряжения на участке цепи

Инструментальная составляющая погрешности измерения определяется основной и дополнительной погрешностями. При показании

вольтметра 0,90 В предел допускаемой относительной погрешности вольтметра на этой отметке равен

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

Дополнительная погрешность, вызванная влиянием 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 можно вычислить по следующей формуле:

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

Отсюда относительная методическая погрешность составляет

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

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 равен

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

Найдем границы погрешности результата измерения суммированием:

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

Переходя к абсолютной погрешности, получим $\Delta = \pm 0,014 \text{ В}$.

Применим статистическое суммирование по формуле (3.11):

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

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

Округляя, результат измерения можно представить в виде

$$U_x = (0,90 \pm 0,01) \text{ В}^1.$$

¹ См.: *Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С.* Метрология, стандартизация и технические средства измерений. – М.: Высш. шк., 2001. С. 33–50.

Контрольные вопросы

1. Какой математический аппарат используется для оценки случайных погрешностей?
2. Назовите основные законы распределений случайных погрешностей.
3. Назовите числовые характеристики распределений.
4. Что характеризует среднее квадратическое отклонение? Для чего оно используется?
5. Что называется доверительной вероятностью и доверительным интервалом?
6. Объясните суть распределения Стьюдента. Как оно описывается?
7. Что такое грубые погрешности (промахи)?

Глава 4. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Погрешности и характеристики средств измерений

Измерительные приборы – средства измерений, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. По способу сравнения измеряемой величины со значением величины, принятым за единицу, различают приборы непосредственной оценки и приборы сравнения. По виду выдаваемой информации приборы делятся на аналоговые и цифровые.

4.1.1. Погрешности средств измерений

С точки зрения методики измерений все многообразие погрешностей возможно классифицировать следующим образом:

- *инструментальные погрешности* – собственные погрешности СИ;
- *методические погрешности* – погрешности методики измерений, связанные, как правило, с неправильным использованием измерительной техники.

Рассмотрим подробнее инструментальные погрешности.

Абсолютная погрешность (вариация показаний) – разность между действительным (истинным) значением измеряемой величины и измеренным значением (показанием прибора).

$$\Delta = (x_0 - x_i).$$

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности к действительному (истинному) значению или к текущему измерению.

$$\delta = \frac{\Delta}{x_i} \text{ (доли или \%)}.$$

Если измерение выполнено однократно, то значение относительной погрешности уменьшается с ростом x_i (предполагается независимость Δ от x_i). Поэтому для измерений целесообразно выбирать тот прибор, показания которого были бы в последней части его шка-

лы (диапазона измерений), а для сравнения различных приборов использовать понятие приведенной погрешности.

Ни абсолютная, ни относительная погрешности не могут полностью охарактеризовать возможности СИ, поэтому введена специфическая погрешность – приведенная. По своей формуле она напоминает относительную погрешность, но имеет несколько другое смысловое значение, выражает потенциальную точность измерений.

Приведенная погрешность – отношение абсолютной погрешности в пределах измерительной шкалы СИ к некоторому нормирующему значению СИ (или измеряемой величины).

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \text{ (доли или \%),}$$

где Δ – абсолютная погрешность (вариация показаний) в пределах полной шкалы измерений; X_N – нормирующее значение измеряемой величины или параметра (разность между верхним и нижним значениями шкалы прибора или конечное значение шкалы прибора). X_N выражается в тех же единицах, что и абсолютная погрешность Δ .

Для приборов с равномерной шкалой X_N равно верхнему пределу измерения (рис. 4.1).

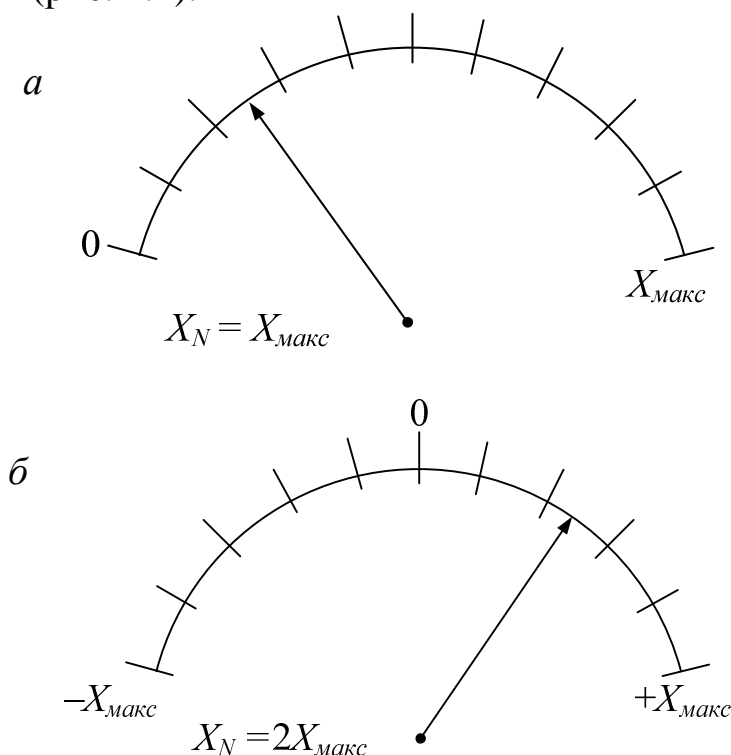


Рис. 4.1. Выбор нормирующего значения для равномерных шкал:

- a* – шкала равномерная, нуль на краю шкалы ($X_N = X_{\max}$);
- б* – шкала равномерная, нуль посередине шкалы ($X_N = 2 \cdot X_{\max}$)

При использовании приборов с неравномерной шкалой следует учитывать одну особенность, отмеченную на рис. 4.2. За нормирующее значение параметра принимается измерительная часть шкалы, которая подвергается обязательной процедуре поверки. Начальная часть шкалы, в пределах которой поверка не производится, называется *индикаторной*, т.е. прибор показывает наличие измеряемого параметра, но определить его величину невозможно.

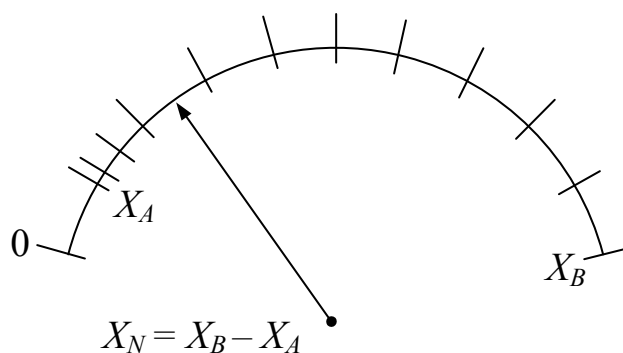


Рис. 4.2. Выбор нормирующего значения для приборов с неравномерной шкалой и нулем в начале шкалы

Для СИ с установленным номинальным значением параметра это значение и принимается за нормирующую величину. Например, измеритель отклонения промышленной частоты от 50 Гц имеет $X_N = 50$ Гц.

Общая погрешность СИ является суммой двух составляющих:

- *случайной погрешности* (a), изменяющейся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины (аддитивная составляющая погрешности);
- *систематической погрешности* (bX), закономерно изменяющейся при повторном измерении одной и той же величины (мультипликативная составляющая погрешности).

В общем виде (см. п. 2.2.1) $\Delta = a + bX$, и тогда для относительной погрешности можно записать

$$\delta = b + a / X.$$

Для нормирования погрешностей СИ с аддитивной и мультипликативной составляющими наибольшее распространение получила формула нормирования предела относительной погрешности вида

$$\delta_{don} = \pm [c + d (\frac{X_N}{x_i} - 1)],$$

где $\delta_{\text{дон}}$ – предел допускаемой относительной погрешности, %; X_N – конечное значение диапазона измерений или диапазона значений величины на выходе меры; c и d – постоянные числа. Эту формулу применяют тогда, когда абсолютная погрешность монотонно увеличивается от начала к концу диапазона.

Класс точности СИ в этом случае представлен двумя цифрами: c/d (в процентах), разделенными косой чертой, которые выбирают из нормированного ряда (ГОСТ 8.401–80): 6,0; 4,0; 2,5; 1,5; 1,0; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01 и т.д. В настоящее время такое обозначение класса точности широко применяется при нормировании погрешности цифровых приборов, многозначных мер сопротивлений и др.

Пример. Прибор класса 0,1/0,05 имеет погрешность $\delta_{\text{дон}} = 0,1 + 0,05 (X_N / x_i - 1)$ (%). Каков же физический смысл коэффициентов c и d ? Легко подсчитать, что минимальная погрешность измерения (0,1%) будет при максимальном значении параметра $x_i = X_N$. В этом случае выражение в круглых скобках обращается в нуль и $\delta_{\text{дон}} = \pm c$. Таким образом, c – предел допускаемой *относительной погрешности* при максимальном значении прибора (меры). Видно, что при $x_i = X_N / 2$ погрешность увеличится уже до 0,15%. Для уяснения смысла коэффициента d преобразуем приведенное выше выражение для $\delta_{\text{дон}}$ так, чтобы получить выражение для определения предела допускаемой абсолютной погрешности

$$\Delta_{\text{дон}} = \pm \frac{1}{100} [d \cdot X_N + (c - d) X_i]$$

Пусть прибор показывает нуль. Тогда второе слагаемое в квадратных скобках равно нулю. Отсюда видно, что d – предел допускаемой погрешности при нулевом показании прибора (меры), выраженный в процентах от верхнего предела измерений.

Аддитивная и мультипликативная составляющие СИ связаны с числами c и d следующими соотношениями: $b = c - d$, характеризует возрастание абсолютной погрешности при увеличении показаний прибора; $a = d \cdot X_N$;

Класс точности – обобщенная характеристика СИ, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей.

Основная приведенная погрешность не должна превышать значения класса точности СИ. Чем меньше число, обозначающее класс

точности средств измерений, тем меньше предел допускаемой основной погрешности.

Основная погрешность средств измерений определяется использованием их в нормальных условиях (табл. 4.1). Она может выражаться допускаемой абсолютной, относительной или приведенной основной погрешностью.

Таблица 4.1

Нормирование основной погрешности и обозначения класса точности

Формула выражения основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Обозначение класса точности	
		в документации	на приборе
Абсолютная погрешность $\Delta = \pm a$; $\Delta = \pm (a + bx)$	$\pm a$; $\pm (a + bx)$	L M	L M
Приведенная погрешность $\gamma = \frac{\Delta}{X_N} 100\%$	$\gamma = \pm 1,5$	1,5	1,5
Относительная погрешность $\delta = \frac{\Delta}{x_i} 100\%$	$\delta = \pm 0,5$	0,5	0,5
Относительная погрешность $\delta = \pm \left[c + d \left(\left \frac{X_N}{x_i} \right - 1 \right) \right]$	$\delta = \pm 0,02/0,01$	$c/d = 0,02/0,01$	0,02/0,01

Дополнительная погрешность обусловлена выходом значений влияющих величин (температура, давление и др.) за пределы нормальных значений. *Пределы допускаемой дополнительной погрешности* устанавливаются в виде дольного значения от основной погрешности, т.е. связаны с классом точности прибора. Дополнительные погрешности при фиксированных влияющих величинах представляют собой систематические погрешности. Например, изменение показа-

ний прибора класса точности 0,5, вызванное изменением температуры окружающей среды, не должно выходить за пределы 0,5% на каждые 10 градусов измерения температуры в пределах рабочего интервала температур.

На основе изложенного выше приведем расширенную классификацию погрешностей измерительных приборов и измерительных преобразователей (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Расширенная классификация погрешностей измерительных приборов и преобразователей

Учет всех нормируемых метрологических характеристик измерительных средств оправдан при измерениях с повышенной точностью. При измерениях на производстве, в учебных лабораториях достаточно оценить *инструментальную* составляющую погрешности измерений, которая рассчитывается по информации о *нормированных значениях погрешности средства измерения*.

Отметим еще раз, что погрешность средств измерений, согласно ГОСТ 8.009–84, нормируется с разбивкой на систематическую и случайную погрешности. Характеристику погрешности без разбивки на случайную и систематическую разрешается нормировать для средств измерений, случайная составляющая погрешности которых пренебрежимо мала. При отсутствии разбивки на систематическую и случайную погрешность именуется просто «погрешность», а ее нормированное значение – «допускаемый предел погрешности». *Допускаемый предел основной погрешности* представляет собой границы интервала, в котором значение характеристики любого экземпляра средств измерения данного типа должно находиться с вероятностью, близкой к $P=1$, при использовании средств в нормальных условиях.

Точность большинства типов технических средств измерений характеризуется допускаемым пределом основной погрешности, формой выражения которого является класс точности.

Пример 1. На шкале амперметра с пределами измерения 0...10 А нанесено обозначение класса точности 2,5. Это означает, что для данного прибора нормирована приведенная погрешность. $X_N = 10$ А; $\gamma = \pm 2,5\%$. Абсолютная погрешность составит

$$\Delta = \frac{X_N \cdot 2,5\%}{100\%} = \pm 0,25 \text{ А}.$$

Пример 2. Обозначение на шкале прибора заключено в окружность (2,5). Это значит, что допускаемая основная погрешность выражена в виде относительной погрешности от измеренного значения и погрешность следует вычислять в процентах от измеренного значения тока. Так, при $x_i = 2$ А абсолютная погрешность прибора не должна превышать $\Delta = \frac{2 \text{ А} \cdot 2,5\%}{100\%} = \pm 0,05 \text{ А}$.

Выбор класса точности прибора должен соответствовать задачам измерения. Необходимо заранее оценить ожидаемую (допустимую) погрешность измерения.

Пример 3. Электронный потенциометр типа КСП с классом точности 0,5 и шкалой 0...1100 °С включен в цепь измерения температуры лабораторной печи. Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta = \pm \frac{0,5(1100)}{100} = \pm 5,5^\circ \text{С}.$$

Очевидно, что не имеет смысла измерять температуру по шкале потенциометра с требуемой точностью менее 6 °С.

Пример 4. Класс точности вольтметра указан как $c/d = 0,06/0,04$. Определить относительную погрешность измерения.

В этом случае удобнее вычислить относительную погрешность результата измерения по формуле $\delta_{\text{дон}} = \pm[c + d (X_N / x_i - 1)]$, а уже затем найти абсолютную погрешность как $\Delta = \delta u / 100$. Проводилось измерение напряжения в точке $u_i = 25$ В на пределе измерения $X_N = 100$ В. Тогда относительная погрешность результата измерения

$$\delta = \pm \left[0,06 + 0,04 \left(\left| \frac{100}{25} \right| - 1 \right) \right] = \pm 0,18\%,$$

а абсолютная погрешность измерения напряжения:

$$\Delta = \pm \delta u / 100 = \pm 0,18 \cdot 25 / 100 \approx \pm 0,05 \text{ В.}$$

4.1.2. Характеристики средств измерений

Все средства измерений классифицируются по двум наиболее важным основаниям: по роли в процессе измерений и выполняемым функциям (рис. 4.4).

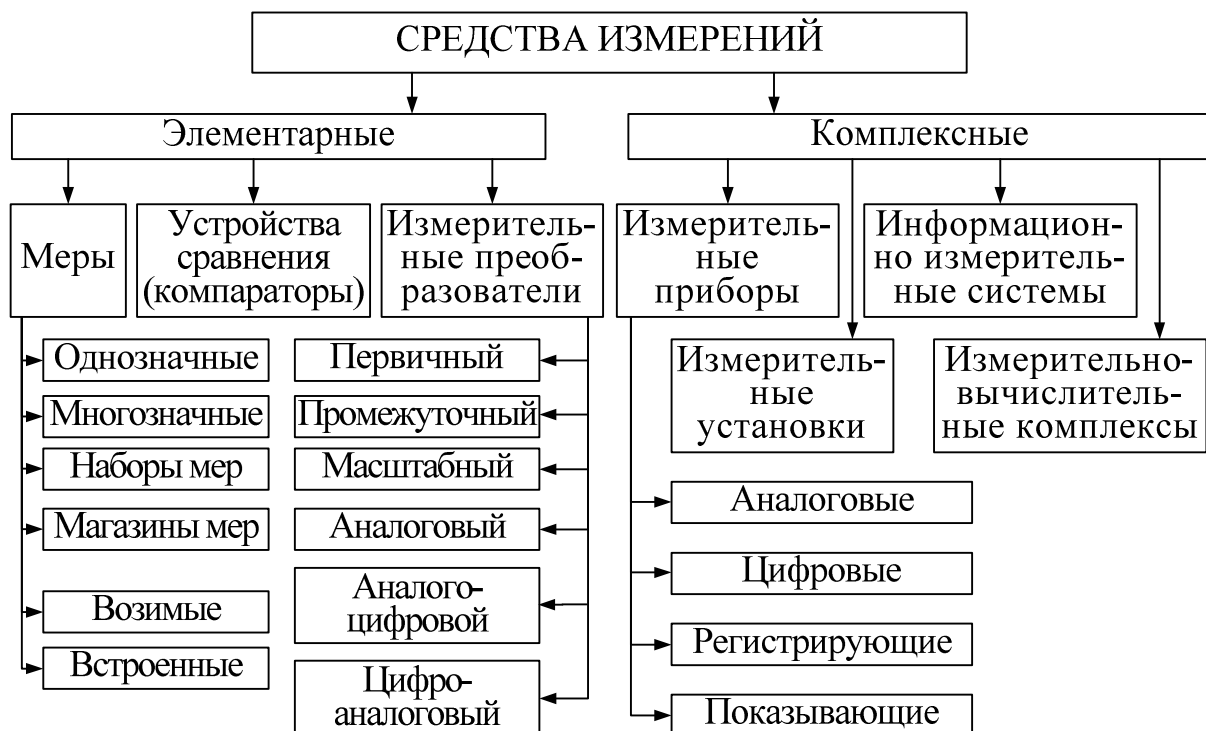


Рис. 4.4. Классификация средств измерений

Приведем некоторые основные характеристики измерительных приборов и преобразователей, используемых в электротехнике, вычислительной технике и радиотехнике.

Диапазон измерений – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности измерительного прибора (средства измерений).

Диапазон показаний – размеченная область шкалы, ограниченная ее начальным и конечным значениями, т.е. указанными на ней наименьшим и наибольшим возможными значениями измеряемой величины (диапазон показаний может быть шире диапазона измерений).

Предел измерений – наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений.

Область рабочих частот (диапазон частот) – полоса частот, в пределах которой погрешность прибора, полученная при изменении частоты сигнала, не превышает допустимого значения.

Чувствительность по измеряемому параметру (S) – отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызвавшему его изменению измеряемой величины.

$$S = \lim \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx},$$

где x – измеряемая величина; y – сигнал на выходе; Δx – изменение измеряемой величины; Δy – изменение сигнала на выходе.

Пример. Пусть для стрелочного прибора ΔX – изменение измеряемой величины, $\Delta \alpha$ – отклонение (угол поворота стрелки), вызванное этим изменением. Тогда $S = \Delta \alpha / \Delta X$, или в пределе $S = d\alpha / dX$.

Условие линейной шкалы – постоянная чувствительность в любой точке шкалы:

$$S = d\alpha / dX = \text{const.}$$

Чувствительность – величина размерная. Например, $S = [\text{рад/ампер}]$, $[\text{ампер/градус}]$ и т.п.

Для измерительных преобразователей, трансформаторов, усилителей тот же смысл имеют крутизна преобразования, коэффициенты передачи, преобразования, усиления и т.п.

Пределная чувствительность (по напряжению, току или мощности) – минимальная величина исследуемого сигнала (напряжения, тока или мощности), подаваемого на вход прибора, которая необхо-

дима для получения отсчета с погрешностью, не превосходящей допустимой.

Разрешающая способность (абсолютная) – минимальная разность двух значений измеряемых однородных величин, которая может быть различима с помощью прибора.

Порог чувствительности – минимальное изменение измеряемой (входной) величины, вызывающее наименьшее изменение показаний, обнаруживаемое наблюдателем при нормальном для данного прибора способе отсчета.

Постоянная прибора – размер измеряемой величины на единицу деления шкалы (синоним – *цена деления шкалы*).

$$C = 1 / S.$$

Величина C по размерности обратна чувствительности.

Собственная потребляемая мощность – мощность, потребляемая СИ от измеряемой цепи. Чем меньше эта величина, тем точнее измерения.

Быстродействие (скорость измерения) – максимальное число измерений в единицу времени, выполняемых с нормированной погрешностью. Быстродействие отождествляется также с максимальной скоростью изменения входного сигнала, при которой $\sigma_{\text{дин}} < \sigma_{\text{стат}}$.

Время измерения – время, которое требуется для определения значения измеряемой величины с заданной погрешностью.

Входное сопротивление (полное) $Z_{\text{вх}}$ – сопротивление измерительного прибора со стороны его входных зажимов. На сравнительно низких частотах входную цепь прибора, включаемого параллельно измеряемой цепи, можно представить эквивалентной схемой, состоящей из соединенных параллельно резистора $R_{\text{вх}}$ и конденсатора $C_{\text{вх}}$.

Чтобы не влиять на измеряемую цепь, измерительные приборы должны иметь как можно большее активное входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ и возможно меньшую входную емкость $C_{\text{вх}}$. Поэтому в области низких частот $\omega = 2\pi f$, когда емкостное сопротивление велико по сравнению с активным сопротивлением: $1/(\omega C_{\text{вх}}) \gg R_{\text{вх}}$, практически $Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}}$. В области высоких частот входное сопротивление прибора определяется преимущественно емкостью и $Z_{\text{вх}} = 1/(j\omega C_{\text{вх}})$, так как в этом случае $1/(\omega C_{\text{вх}}) \ll R_{\text{вх}}$.

Выходное сопротивление $Z_{\text{вых}}$ – сопротивление измерительного прибора со стороны его выходных зажимов. Это сопротивление опре-

деляет допустимую нагрузку прибора при подключении его, например, к компьютеру.

Показание – значение измеряемой величины, определяемое по отсчетному устройству прибора и выраженное в единицах этой величины.

Вариация показаний – разность между показаниями прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к ней со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

Надежность СИ – способность сохранять заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени.

Также существуют следующие показатели надежности:

- 1) вероятность безотказной работы;
- 2) среднее время безотказной работы.

Следует помнить, что термин «погрешности измерительного прибора» подразумевает *инструментальные погрешности*.

4.2. Электромеханические измерительные механизмы

4.2.1. Магнитоэлектрические механизмы

В основе всех механизмов лежит взаимодействие магнитных полей. В магнитоэлектрическом механизме это взаимодействие поля постоянного магнита и поля, индуцируемого измеряемым током. Магнитоэлектрический механизм имеет два основных элемента: постоянный магнит и катушку (рамка, соленоид), через которую протекает измеряемый ток (рис. 4.5).

Идея выполнения магнитоэлектрических механизмов возникла еще в начале XIX в. В настоящее время используются самые различные конструкции магнитоэлектрических механизмов, что связано с применением новых материалов и технологий (рис. 4.6).

В данных приборах измеряемый ток I пропускается через рамку. Возникающий при этом электромагнитный момент, поворачивающий рамку, равен

$$M_{эм} = I B S w,$$

где B – индукция в магнитном зазоре; S – активная площадь рамки; w – число витков рамки.

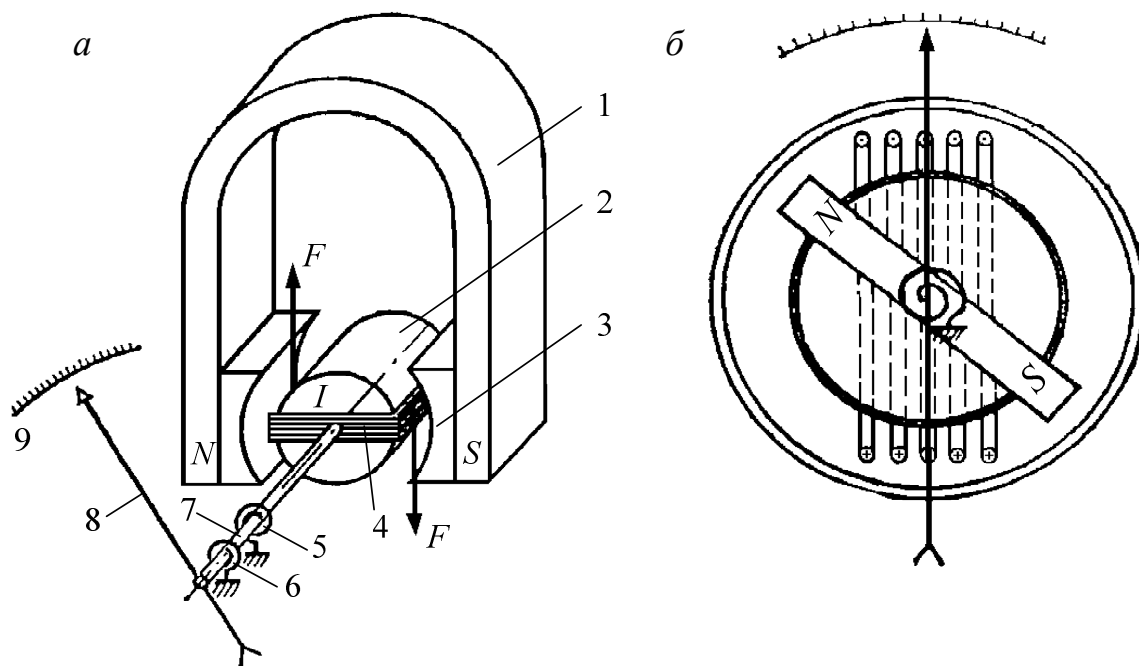


Рис. 4.5. Магнитоэлектрические механизмы:

a – механизм с подвижной рамкой; *б* – механизм с неподвижной рамкой;
1 – постоянный магнит; *2* – цилиндрический сердечник; *3* – полюс магнита;
4 – токовая рамка; *5, 6* – спиральные пружины; *7* – ось;
8 – указатель (стрелка); *9* – шкала

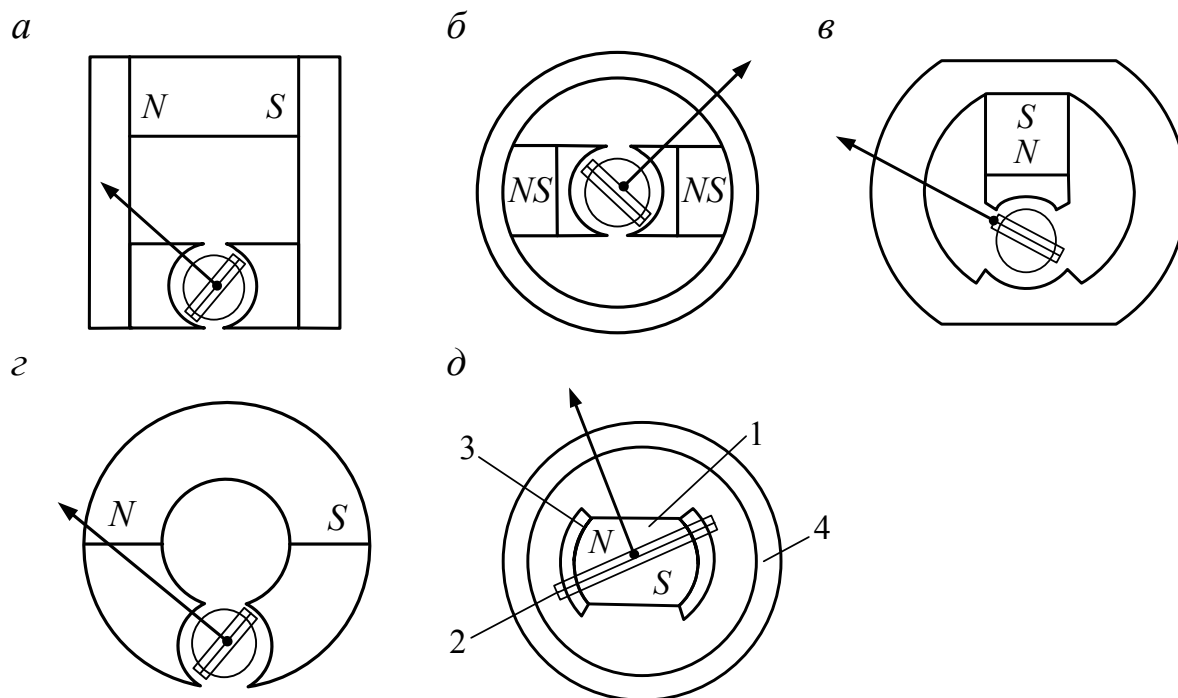


Рис. 4.6. Конструкции магнитных цепей различных магнитоэлектрических механизмов (*a-d*):

1 – неподвижный постоянный магнит; *2* – рамка; *3* – полюсные башмаки;
4 – магнитопровод

Электромагнитный момент уравнивается противодействующим механическим моментом, возникающим при закручивании спиральных пружин, которые одновременно являются токоподводящими контактами.

$$M_{\text{мех}} = -k \alpha, \quad M_{\text{мех}} + M_{\text{эм}} = 0,$$

где α – угол поворота рамки; k – удельный противодействующий момент, зависящий от свойств упругого элемента и постоянный для данного устройства.

Тогда $I B S w = k \alpha$, или $\alpha = B S w I / k$, – основное уравнение прибора магнитоэлектрической системы.

Для чувствительности справедливо выражение

$$S = \Delta \alpha / \Delta I = B S w / k.$$

Это чувствительность механизма к току. Если B – величина постоянная, значит, шкала прибора линейная и равномерная.

Подробнее рассмотрим один из магнитоэлектрических приборов – гальванометр.

Гальванометр – высокочувствительный прибор для измерения очень малых значений тока.

Гальванометры характеризуются тремя особенностями: имеют подвеску токовой рамки на металлических растяжках, в них используются сильные постоянные магниты, применяется «световой рычаг» (рис. 4.7).

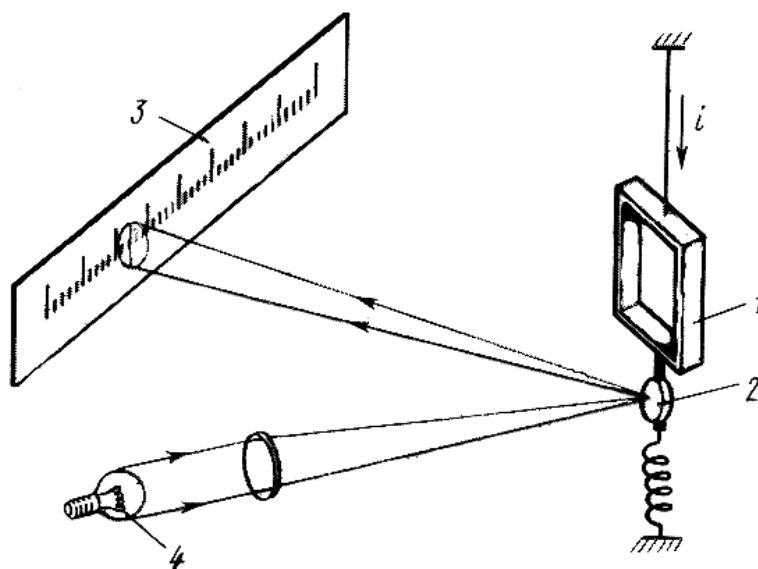


Рис. 4.7. Схема зеркального магнитоэлектрического гальванометра со световым указателем:

- 1 – катушка подвижной части с креплением на подвесе;
- 2 – зеркальце, закрепленное на подвижной части; 3 – шкала;
- 4 – источник света и линза

Световой сфокусированный луч от источника света попадает на зеркало, укрепленное на подвеске или растяжке, и после отражения фиксируется на шкале.

Даже малый угол поворота рамки (α) дает заметное отклонение светового индекса («светового зайчика») на шкале (h): $h = d\alpha L$, где L – длина «светового рычага».

Гальванометры очень часто используются как нуль-индикаторы. Баллистические гальванометры могут применяться в качестве измерителей количества электричества.

Характеристики магнитоэлектрических механизмов

Достоинства:

1. Высокая чувствительность.
2. Малое влияние внешних магнитных полей (поле в зазоре до 0,5 Тл).
3. Линейная и равномерная шкала.
4. Малое потребление мощности от измеряемой цепи.
5. Наиболее точные приборы по постоянному току (до 0,1 %).

Недостатки:

1. Вследствие большого момента инерции рамки возможность измерений только на постоянном токе.
2. Температура оказывает существенное влияние на приборную погрешность (пружины – 0,3–0,4% на 10 °С, сопротивление обмотки рамки – до 4% на 10°С, магнитный поток постоянного магнита – до 0,3% на 10°С).
3. Относительная сложность конструкции и высокая чувствительность к перегрузкам.

4.2.2. Магнитоэлектрические логометры

Логометр – прибор для измерения отношения двух величин. Две взаимно перпендикулярные подвижные рамки подключены так, чтобы при пропускании через них токов I_1 и I_2 создавались два противоположно направленных момента M_1 и M_2 . При неравенстве моментов подвижная система начинает вращаться в сторону действия большего момента (большого тока). При этом рамка с большим значением тока удаляется от сердечника и ее момент уменьшается, а рамка с меньшим значением тока, наоборот, приближается к сердеч-

нику и ее момент увеличивается. Это значит, что каждому отношению токов в рамках соответствует вполне определенный угол отклонения рамок (стрелки) прибора (рис. 4.8).

Работа устройства описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned} M_1 &= I_1 F_1(\alpha), & -M_2 &= I_2 F_2(\alpha), \\ M_1 &= M_2, & I_1 F_1(\alpha) &= I_2 F_2(\alpha), \\ \alpha &= f(I_1 / I_2). \end{aligned}$$

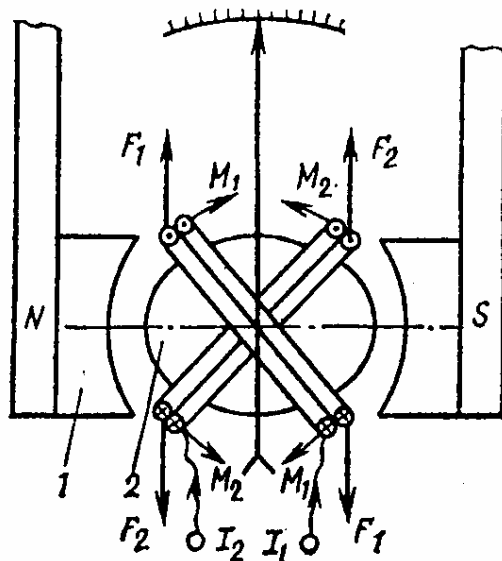
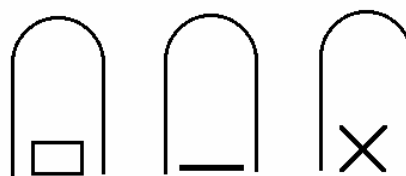


Рис. 4.8. Схема магнитоэлектрического логометра и принцип его действия

Условные обозначения магнитоэлектрических механизмов (справа – логометров):



4.2.3. Электромагнитные механизмы

Принцип работы электромагнитных механизмов основан на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки и подвижного ферромагнитного сердечника (рис. 4.9).

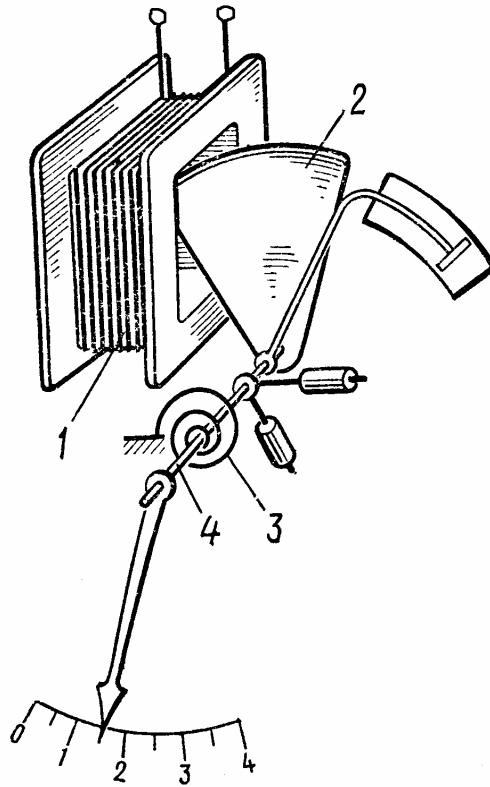


Рис. 4.9. Электромагнитный механизм с плоской катушкой:
 1 – неподвижная катушка с током; 2 – подвижный ферромагнитный сердечник (лепесток); 3 – пружина для создания противодействующего момента; 4 – ось

Сердечник изготовлен из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой. Противодействующий момент создается спиральной пружиной или растяжками. Успокоение – магнитоиндукционное или воздушное.

Механизмы с замкнутым магнитопроводом являются более совершенными (рис. 4.10).

Анализ работы механизма проводится на основе изменения накопленной энергии в индуктивности при повороте сердечника. Общая электромагнитная энергия равна

$$W_{эм} = L I^2 / 2,$$

где $W_{эм}$ – энергия электромагнитного поля катушки с сердечником; L – индуктивность катушки, зависящая от положения сердечника.

Вращающий момент равен

$$M = dW_{эм} / d\alpha = (I^2 / 2) dL / d\alpha.$$

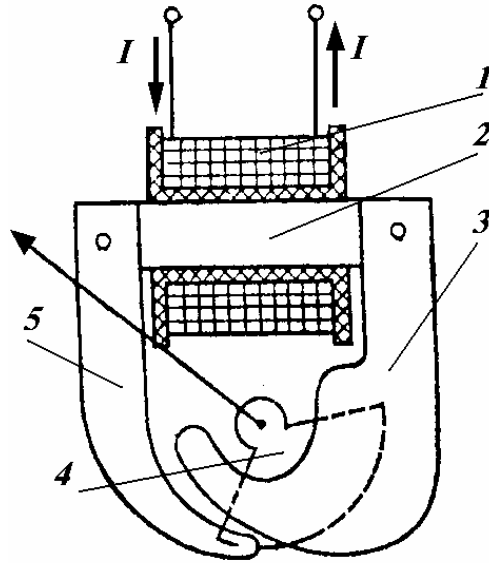


Рис. 4.10. Устройство электромагнитного измерительного механизма с замкнутым магнитопроводом:

I – катушка; 2 – неподвижный магнитопровод; 3, 5 – пара полюсных наконечников (магнитопроводов) сложной формы; 4 – подвижный сердечник из магнитомягкой стали или пермаллоя

При протекании в обмотке катушки переменного тока $I = I_m \sin \omega t$ подвижная часть вследствие своей инерционности будет реагировать на среднее значение вращающего момента, равное

$$M_{cp} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2,$$

где I – действующее значение переменного тока в обмотке.

Из условия статического равновесия $M = -M_{мех}$, или $\frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2 = k\alpha$, можно получить выражение для угла отклонения подвижной части (основное уравнение прибора)

$$\alpha = \frac{1}{2k} \frac{dL}{d\alpha} I^2,$$

поэтому шкала у электромагнитного измерительного механизма неравномерная. Если представить $\alpha = S I$, то

$$S = (1/2k) (dL/d\alpha) I,$$

т.е. чувствительность электромагнитных механизмов зависит от величины измеряемого тока.

Компенсация нелинейности шкалы осуществляется за счет конструирования сердечника и (или) магнитопроводов специальной фор-

мы (см. рис. 4.10). При этом величина ($dL/d\alpha$) изменяется также нелинейно, уменьшая нелинейность отсчета. Подбор формы сердечника позволяет сделать шкалу практически равномерной, начиная с 15–20% ее конечного значения. Тем не менее начало измерительной шкалы всегда содержит *индикаторный участок*, занимающий до 15% от полной шкалы. При работе механизма электромагнитной системы на переменном токе в окружающих металлических частях и сердечнике возникают вихревые токи, размагничивающие сердечник. Вследствие этого показания на переменном токе немного меньше, чем на постоянном. Указанное различие в показаниях увеличивается с ростом частоты, но на частоте $f = 50$ Гц оно невелико.

Характеристики электромагнитных механизмов

Достоинства:

1. Работа на переменном и постоянном токе.
2. Устойчивость к перегрузкам.
3. Простота конструкции.

Недостатки:

1. Неравномерная шкала.
2. Различия в показаниях на постоянном токе, равные 2–3% при возрастающих и убывающих значениях тока вследствие потерь на гистерезис.
3. Показания шкалы по переменному току меньше, чем шкалы по постоянному току, вследствие размагничивания сердечника за счет вихревых токов, возникающих в нем при работе на переменном токе.
4. Сильное влияние внешнего магнитного поля на механизмы без магнитопровода (обязательно применение магнитного экрана).
5. Большая потребляемая мощность от измерительной цепи.
6. Класс приборов от 0,5% и более.

4.2.4. Электромагнитные логометры

Обобщенный внешний вид двухмоментного механизма логометра электромагнитной системы приведен на рис. 4.11.

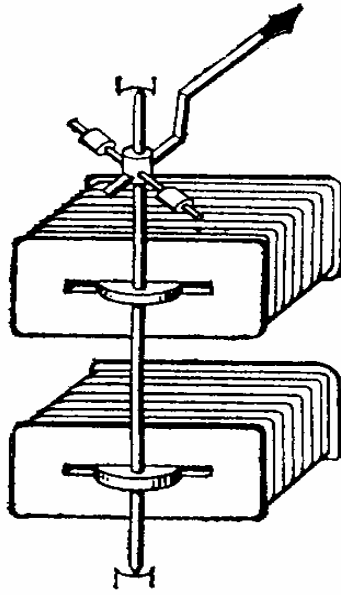


Рис. 4.11. Схематическое устройство электромагнитного логометра

Катушки с токами и сердечники укреплены так, что при увеличении угла поворота α и, следовательно, при изменении положения сердечников относительно катушек индуктивность одной катушки возрастает, а другой убывает, поэтому производные $\frac{dL_1}{d\alpha}$ и $\frac{dL_2}{d\alpha}$ имеют разные знаки, а вращающие моменты, действующие на сердечники, направлены в противоположные стороны

$$M_1 = I_1^2 \frac{1}{2} \frac{dL_1}{d\alpha}; \quad M_2 = I_2^2 \frac{1}{2} \frac{dL_2}{d\alpha}.$$

Таким образом для статического равновесия ($M_1 = M_2$) при условии, что магнитная связь между катушками отсутствует, имеем

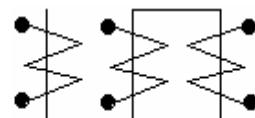
$$I_1^2 \frac{1}{2} \frac{dL_1}{d\alpha} = I_2^2 \frac{1}{2} \frac{dL_2}{d\alpha},$$

откуда

$$\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{dL_2/d\alpha}{dL_1/d\alpha},$$

или $I_1 / I_2 = f(\alpha)$.

Условные обозначения электромагнитных механизмов (справа – логометров):



4.2.5. Электродинамические механизмы

Принцип работы электродинамического механизма состоит во взаимодействии двух магнитных полей: поля неподвижной катушки и поля подвижной магнитной системы. На основе электродинамических механизмов обычно конструируются такие приборы, как ваттметры, частотомеры, фазометры. Общий вид прибора представлен на рис. 4.12.

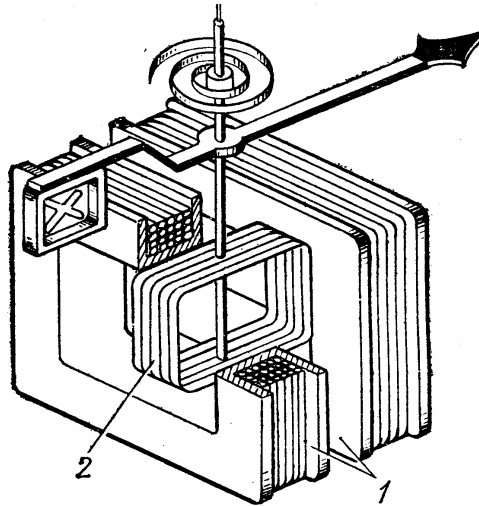


Рис. 4.12. Общий вид прибора электродинамической системы:
1 – неподвижная катушка; 2 – подвижная рамка

Принцип работы прибора приведен на рис. 4.13.

Подвижная рамка (катушка), укрепленная на оси или растяжках, может поворачиваться внутри неподвижной катушки. При протекании в обмотках катушек токов I_1 и I_2 возникают электромагнитные силы, стремящиеся так повернуть подвижную часть, чтобы магнитные потоки подвижной и неподвижной катушек совпали.

Энергия магнитного поля двух катушек с токами I_1 и I_2

$$W = L_1 I_1^2 / 2 + L_2 I_2^2 / 2 + M_{12} I_1 I_2,$$

где $L_1 = \text{const}$, $L_2 = \text{const}$ – индуктивности катушек; M_{12} – взаимная индуктивность катушек. Из данного уравнения видно, что только взаимная индуктивность M_{12} зависит от угла поворота подвижной части, поэтому вращающий момент равен

$$M_{\text{эм}} = \frac{dW}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}.$$

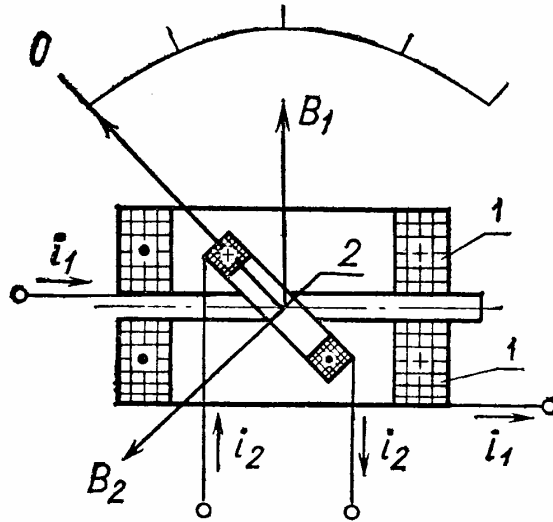


Рис. 4.13. Принцип работы электродинамического механизма:
 1 – неподвижная катушка; 2 – подвижная рамка

Предположим, что измеряется переменный ток (по катушкам протекают переменные токи):

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t;$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \psi).$$

Подвижная часть из-за инерционности будет реагировать на среднее значение вращающего момента:

$$M_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = \frac{dM_{12}}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T I_{1m} I_{2m} \sin \omega t \sin(\omega t - \psi) dt = I_{1m} I_{2m} \cos \psi \frac{dM_{12}}{d\alpha},$$

где I_1 и I_2 – действующие значения токов.

Таким образом, вращающий момент пропорционален произведению действующих значений токов в катушках и косинусу угла сдвига фаз между ними. Следовательно, электродинамический механизм обладает фазочувствительными свойствами. Поэтому он может быть использован для измерения не только тока и напряжения, но и мощности.

Для механизма прибора, работающего на переменном токе:

$$M_{mex} = -k\alpha,$$

$$\alpha = \frac{I_{1m} I_{2m} \cos \psi}{k} \frac{dM_{12}}{d\alpha}.$$

Следовательно, характер шкалы прибора зависит от выражений $I_{1m} I_{2m} \cos \psi$ и $dM_{12}/d\alpha$.

При протекании по катушкам постоянных токов

$$\alpha = \frac{I_1 I_2}{k} \frac{dM_{12}}{d\alpha}.$$

Чувствительность по току I_1 равна

$$S = \frac{1}{k} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_2$$

и зависит от I_2 , следовательно, шкала неравномерна.

Компенсация линейности шкалы, как и в случае с электромагнитными приборами, производится за счет нелинейного изменения $dM_{12}/d\alpha$.

Характеристики электродинамических механизмов

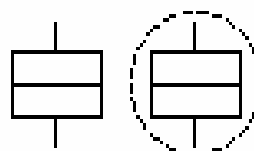
Достоинства:

1. Одинаковые показания на постоянном и переменном токе (при последовательном соединении катушек).
2. Наиболее точные электромеханические приборы для цепей переменного тока.
3. Стабильность показаний во времени.
4. Многопредельность (от 1 мкА до 10 А).
5. Измерения на относительно высоких частотах (до 10 кГц).

Недостатки:

1. Невысокая чувствительность.
2. Большая потребляемая мощность.
3. Чувствительность к перегрузкам.
4. Сильное влияние внешнего магнитного поля.

Условные обозначения приборов электродинамической системы (окружность, проведенная прерывистой линией, обозначает магнитный экран):



4.2.6. Электродинамические логометры

Логометры электродинамической системы содержат две неподвижные и две взаимно перпендикулярные подвижные катушки. Неподвижные катушки обычно включаются в сеть последовательно с нагрузкой. Подвижные катушки 1 и 2 включаются параллельно нагрузке, но последовательно с добавочными сопротивлениями. Поэтому токи I_1 и I_2 сдвинуты на разные углы как от напряжения, так и от тока нагрузки I_n . Подвижные катушки прибора подключены таким

образом, что возникающие электромагнитные моменты взаимно уравниваются (рис. 4.14). Необходимо помнить, что в логометрах противодействующий момент создается не силами упругости, а электромагнитными силами взаимодействия рабочих элементов.

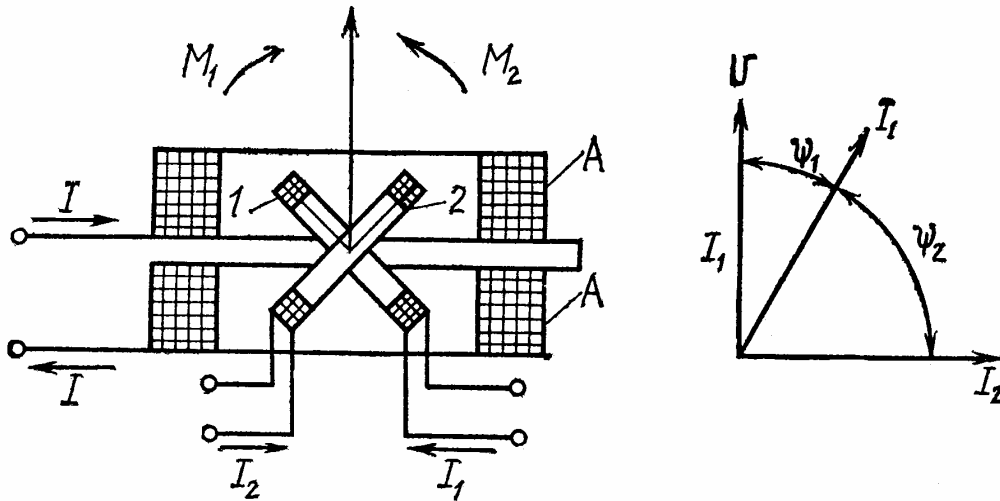


Рис. 4.14. Схема работы электродинамического логометра:
а – схема включения; *б* – векторная диаграмма

При работе на переменном токе, согласно принципу действия электродинамических приборов, вращающие электромагнитные моменты зависят от сдвига фаз между токами в неподвижной катушке и токами I_1 или I_2 в подвижных катушках:

$$M_1 = c_1 I_1 I \cos \psi_1 f_1(\alpha),$$

$$-M_2 = c_2 I_2 I \cos \psi_2 f_2(\alpha),$$

где ψ_1 и ψ_2 – фазовые сдвиги между током нагрузки и токами в катушках; c_1 и c_2 – коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами и выбором системы единиц.

Под действием этих моментов подвижная часть поворачивается до тех пор, пока $M_1 = -M_2$, тогда

$$c_1 I_1 I \cos \psi_1 f_1(\alpha) = c_2 I_2 I \cos \psi_2 f_2(\alpha),$$

или

$$I_2 \cos \psi_2 / I_1 \cos \psi_1 = c_1 f_1(\alpha) / c_2 f_2(\alpha) = f_3(\alpha).$$

Из приведенного уравнения видно, что угол поворота подвижной части электродинамического логометра определяется отношением проекций векторов токов в подвижных катушках на вектор тока в неподвижной катушке. Иными словами, угол поворота подвижных

катушек зависит не только от отношения токов, но и от сдвига фаз токов I_1 и I_2 относительно тока I неподвижной катушки.

Условное обозначение логометра: 

4.2.7. Ферродинамические механизмы

Ферродинамические приборы отличаются от электродинамических тем, что у них как неподвижная, так и подвижная катушки имеют свои магнитопроводы, выполненные из магнитомягких ферромагнитных материалов, которые позволяют существенно увеличивать магнитный поток и соответственно вращающий момент и чувствительность прибора. Устройство ферродинамических механизмов схематично представлено на рис. 4.15.

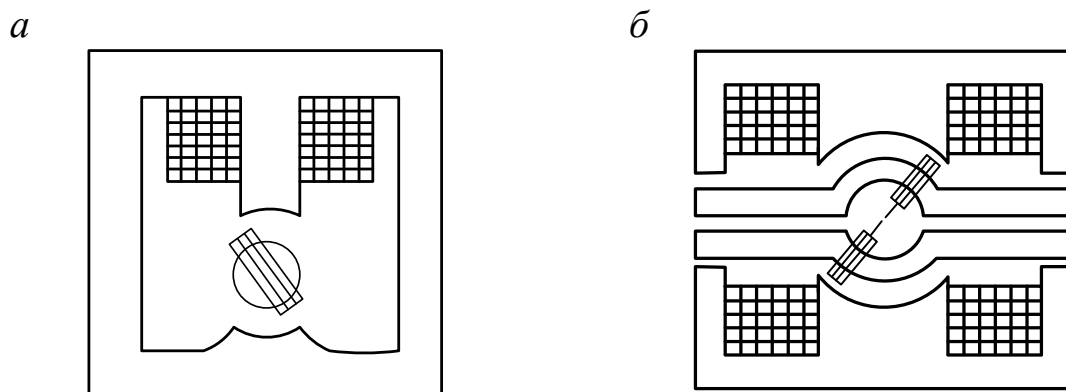


Рис. 4.15. Устройство приборов ферродинамической системы:
a – однокатушечного; *б* – двухкатушечного

Общие выражения вращающего момента, полученные для электродинамического механизма, остаются в основном справедливыми и для ферродинамического механизма. Однако так как в воздушном зазоре, где перемещается подвижная катушка, магнитное поле равномерное и радиальное, то $dM_{12}/d\alpha = \text{const}$. В связи с тем что вращающий момент создается в результате взаимодействия индукции B_1 в зазоре магнитопровода и тока в подвижной катушке I_2 в уравнение для среднего значения вращающего момента войдет не $\cos \psi = \cos(I_1 \wedge I_2)$, а $\cos(B_1 \wedge I_2)$. Вращающий момент (среднее значение) можно представить выражением

$$M = cB_1I_2 \cos(B_1 \wedge I_2).$$

Основное уравнение прибора (уравнение преобразования) для переменного тока имеет вид

$$\alpha = \frac{cI_{1m}I_{2m}}{k} \cos \Psi,$$

где c – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами и выбором системы единиц. Для постоянного тока

$$\alpha = \frac{I_1 I_2}{k}.$$

Особенности конструкции ферродинамических логометров вытекают из особенностей логометров как магнитоэлектрической, так и электродинамической систем и представлены на рис. 4.16.

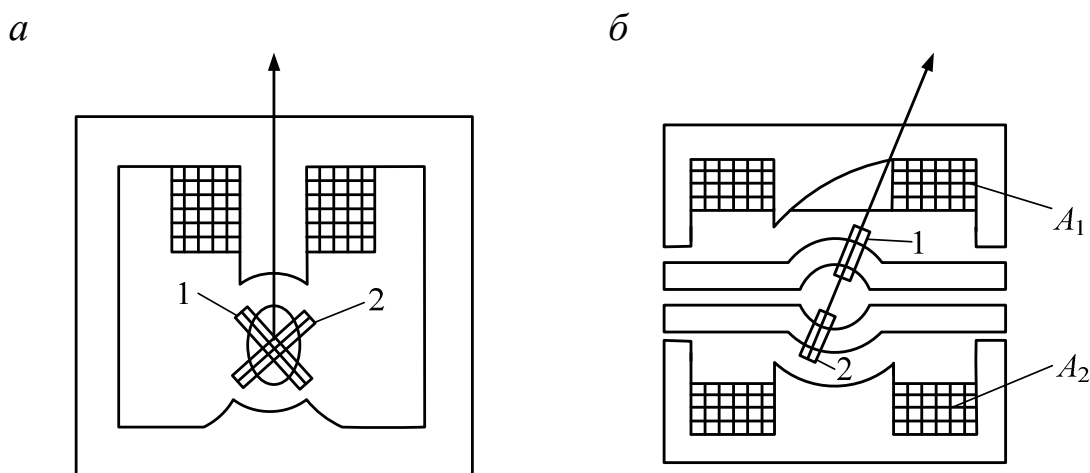


Рис. 4.16. Конструкции ферродинамических логометров с перекрещенными (а) и неперекрещенными (б) катушками 1 и 2

Характеристики ферродинамических механизмов

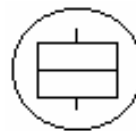
Достоинства:

1. Малая восприимчивость к внешним магнитным полям.
2. Малое собственное потребление мощности.
3. Большой вращающий момент.

Недостатки:

1. Малая точность (ниже, чем у электродинамических механизмов).
2. Частотный диапазон измеряемых токов менее, чем у электродинамических механизмов (до 1 кГц).
3. Сложность конструкции.

Условное обозначение ферродинамического механизма (сплошная окружность означает наличие сердечника):



4.2.8. Электростатические механизмы

Перемещение подвижной части механизма происходит под действием энергии электрического поля системы двух или нескольких разноименно заряженных проводников (электродов). Принципиальное отличие электростатического механизма от предыдущих систем состоит в том, что перемещение происходит вследствие притяжения накопленных зарядов, под действием приложенного напряжения. Ток через механизм не протекает, поэтому электростатические механизмы могут быть только вольтметрами (рис. 4.17).

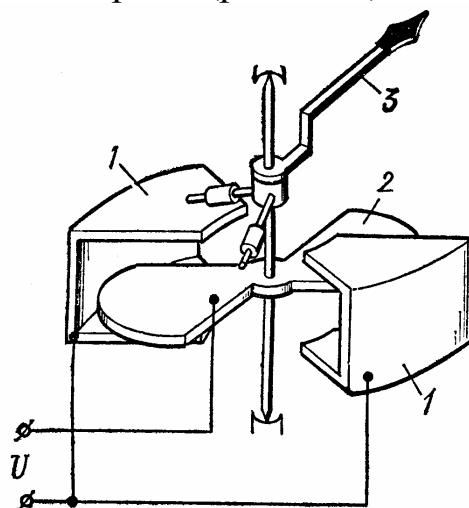


Рис. 4.17. Устройство вольтметра электростатической системы:
1 – система неподвижных металлических пластин; 2 – система подвижных металлических пластин; 3 – стрелка; 4 – ось

Перемещение подвижной части связано с изменением емкости. Под действием подведенного к электродам напряжения создается электрическое поле. Силы электрического поля стремятся повернуть подвижную часть таким образом, чтобы энергия электрического поля $W_э = CU^2/2$, где C – емкость между подвижным и неподвижным электродами, была наибольшей, т.е. чтобы подвижный электрод втягивался в пространство между неподвижными электродами и поворачивал указатель.

Изменение энергии поля вследствие перемещения подвижной части прибора определяет вращающий момент

$$M_{эм} = \frac{dW_э}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha},$$

где C – электрическая емкость между подвижными и неподвижными электродами.

В положении равновесия $M_{эм} = M_{мех} = -k\alpha$, отсюда

$$\alpha = \frac{1}{2k} \frac{dC}{d\alpha} U^2.$$

При $dC/d\alpha = \text{const}$ угол α пропорционален квадрату действующего значения напряжения (U^2), т.е. шкала прибора неравномерная (квадратичная), с индикаторной зоной в начале шкалы. Подбором формы и размеров подвижных и неподвижных электродов можно получить такую зависимость $dC/d\alpha$, которая обеспечивает практически равномерную шкалу от 15 до 100% верхнего предела измерения.

При переменном напряжении $U = U_m \sin \omega t$, приложенном к электродам, подвижная часть вследствие инерционности будет реагировать на действующее значение переменного напряжения. Поэтому прибор одинаково успешно регистрирует как постоянное, так и переменное напряжение.

Малые силы взаимодействия требуют тонкой, качественной подвески подвижной системы, поэтому используется плоская стальная или бронзовая нить, а увеличение чувствительности отсчета достигается за счет применения «светового рычага» (рис. 4.18).

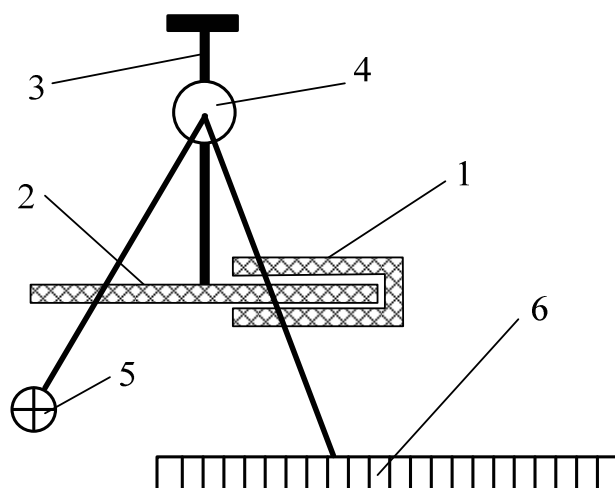


Рис. 4. 18. Электростатический механизм со световым индикатором: 1 – неподвижный электрод; 2 – подвижный электрод; 3 – стальная нить подвески; 4 – зеркало; 5 – лампа освещения со световым индексом; 6 – отсчетная шкала

Приборы применяются в широком частотном диапазоне (до десятков мегагерц) а также в цепях высокого напряжения (до сотен киловольт).

Характеристики электростатических механизмов

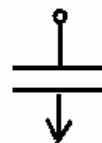
Достоинства:

1. Возможность измерения постоянных и переменных напряжений.
2. Малое потребление мощности от измерительной цепи (на постоянном токе равно нулю).
3. Малое влияние температуры, частоты и формы напряжения, внешнего магнитного поля.
4. Возможность измерения напряжений высокой частоты.
5. Возможность изготовления приборов для измерения высоких напряжений (до сотен киловольт) без громоздких, дорогих добавочных резисторов и измерительных трансформаторов.

Недостатки:

1. Малый вращающий момент (измерения возможно проводить начиная с напряжения, равного 10 В).
2. Чувствительность мала, поэтому используется подвеска подвижной системы и световой отсчет.
3. Сильное влияние внешних электростатических полей, вследствие чего необходимо использовать электростатический немагнитный экран.
4. Высокая чувствительность к ударным нагрузкам.

Условное обозначение электростатического механизма (символ конденсатора и стрелка):



4.2.9. Индукционные механизмы. Электромеханические счетчики электрической энергии

Учет активной энергии переменного тока осуществляется *счетчиками электрической энергии*, построенными на базе индукционных механизмов. Счетчики энергии, как и ваттметры, имеют две электрические цепи – параллельную и последовательную. Но в отличие от ваттметра подвижная часть счетчика (диск) не имеет пружины и угол

поворота не ограничен, т.е. при потреблении энергии диск счетчика будет непрерывно вращаться. Такое устройство позволяет определять потребление энергии (произведение мощности на время потребления). Поэтому каждому обороту диска счетчика соответствует строго определенное количество энергии, прошедшее через счетчик. Для учета израсходованной энергии необходимо регистрировать число оборотов подвижной части счетчика. Эта задача выполняется с помощью обычного счетного механизма роликового типа, где поворот каждого следующего ролика осуществляется на $1/10$ оборота после того, как предыдущий ролик сделает один оборот.

Основными деталями индукционного измерительного механизма, который используется в индукционном счетчике, являются два электромагнита. Электромагнит 1 с большим числом витков обладает преимущественно индуктивным сопротивлением и включается параллельно с нагрузкой (рис. 4.19). Электромагнит 2 имеет малое число витков, включается последовательно с нагрузкой и обладает преимущественно активным сопротивлением. Между полюсами электромагнитов располагается легкий алюминиевый диск 3 , ось которого устанавливается на подшипниках и соединяется со счетным механизмом 4 . Ток I_A в обмотке последовательного электромагнита равен току нагрузки. Ток I_U в обмотке параллельно включенного электромагнита пропорционален напряжению на нагрузке. В силу различного характера сопротивлений обмоток электромагнитов токи в них будут сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол φ .

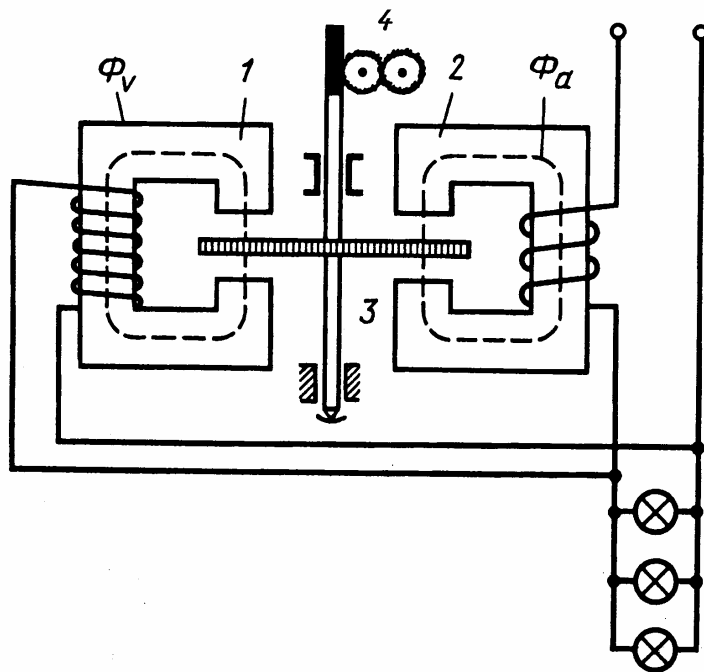


Рис. 4.19. Упрощенная конструкция индукционного счетчика

Принцип действия индукционного механизма основан на взаимодействии двух или более переменных магнитных потоков с вихревыми токами, индуцированными ими в подвижном алюминиевом диске. Это достигается использованием электромагнита специальной конструкции (рис. 4.20).

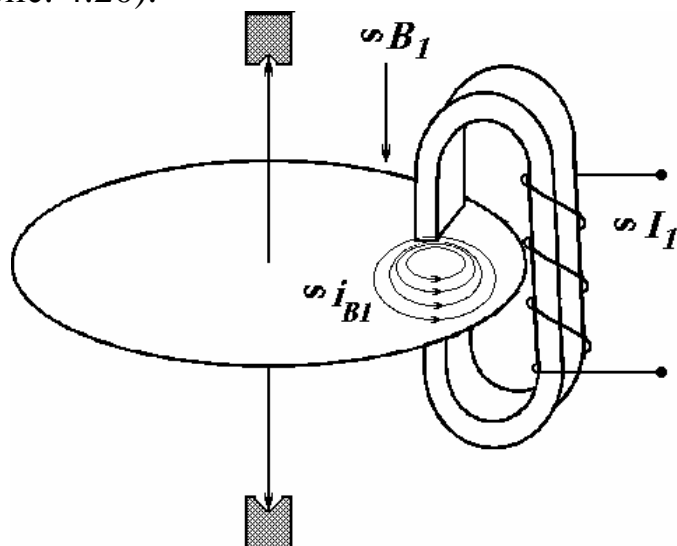


Рис. 4.20. Схема взаимодействия электромагнита с подвижным алюминиевым диском счетчика:

I_1 – ток питания электромагнита; B_1 – вектор индукции переменного магнитного поля, индуцируемого электромагнитом; i_{B1} – вихревой ток, индуцируемый в диске переменным магнитным полем

Вращение алюминиевого диска обеспечивается за счет взаимодействия переменных магнитных полей и возбуждаемых ими вихревых токов от нескольких (не менее двух) электромагнитов (рис. 4.21).

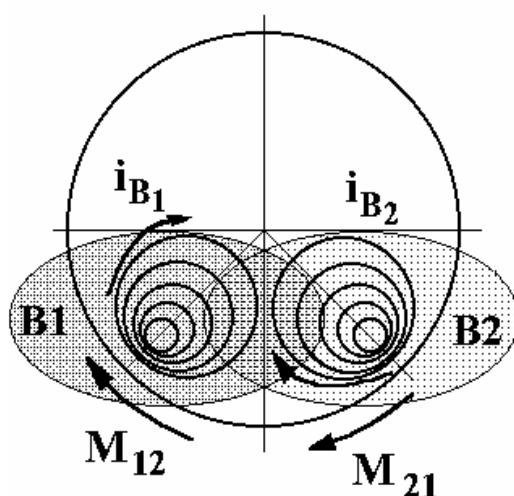


Рис. 4.21. Схема взаимодействия в счетчике двух переменных магнитных полей и индуцируемых ими вихревых токов

Вихревые токи i_{B1} , индуцируемые магнитным полем первого электромагнита, взаимодействуют с магнитным полем B_2 второго электромагнита, которое старается вытолкнуть их, и при этом создается вращающий момент M_{12} . С другой стороны, вихревые токи, создаваемые вторым электромагнитом i_{B2} , втягиваются в магнитное поле первого электромагнита, создавая вращающий момент M_{21} . Направление создаваемых моментов одинаково, что приводит к вращению диска.

Переменные магнитные потоки электромагнитов (Φ), пронизывая алюминиевый диск, создадут в любом контуре на диске ЭДС индукции (E_A, E_U), отстающие по фазе на $\pi/2$ от соответствующих потоков. Под действием этих ЭДС в контурах возникают индуцированные вихревые токи i'_A (i_{B1}) и i'_U (i_{B2}), приблизительно совпадающие по фазам с соответствующими ЭДС в силу малости индуктивного сопротивления диска. Действующие значения ЭДС и соответствующих возникающих токов пропорциональны частоте тока при данных значениях потоков Φ_A и Φ_U :

$$E_{A,U} = \omega \Phi_{A,U}, \quad I'_{A,U} = E_{A,U} / R_\delta,$$

где R_δ – сопротивление контура в диске (рис. 4.22).

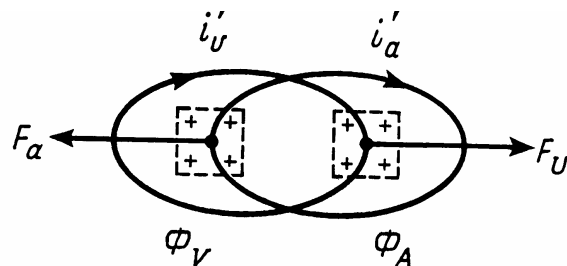


Рис. 4.22. Схема образования сил в результате взаимодействия индуцированных токов

Если сердечники электромагнитов не достигают состояния магнитного насыщения, то магнитные потоки Φ_A и Φ_U будут прямо пропорциональны соответствующим токам в электромагнитах I_A и I_U . Благодаря большому моменту инерции диск будет реагировать только на среднее значение моментов. Так как силы F_A и F_U направлены в разные стороны, среднее значение результирующего момента равно разности средних значений вращающих моментов:

$$M_{cp} = M_{Acp} - M_{Uc.c} = k_1'' \Phi_U I'_A \sin \psi + k_2'' \Phi_A I'_U \sin \psi,$$

где ψ – угол между векторами магнитных потоков.

Но так как $\omega \Phi_U \approx I'_U$ и $\omega \Phi_A \approx I'_A$, то

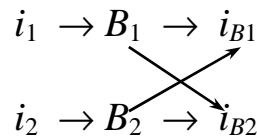
$$M_{cp} = k_1'' \omega \Phi_A \Phi_U \sin \psi + k_2'' \omega \Phi_U \Phi_A \sin \psi = k_3 \omega \Phi_A \Phi_U \sin \psi.$$

Из последнего выражения видно, что, во-первых, для создания вращающего момента необходимо иметь два магнитных потока, сдвинутых по фазе и смещенных в пространстве, и, во-вторых, показания счетчика зависят от частоты.

Таким образом, принцип действия индукционного счетчика коротко можно сформулировать так: взаимодействие токов i'_A (i_{B1}) и i'_U (i_{B2}) с «чужими» потоками Φ_U и Φ_A приводит к появлению вращающего момента $M_{вр}$, пропорционального активной мощности P в нагрузке (при определенных условиях).

Под действием этого момента диск должен вращаться с постоянным угловым ускорением, т.е. все быстрее и быстрее. Чтобы диск вращался с постоянной скоростью, необходимо приложить к нему тормозной момент. Он создается постоянным тормозным магнитом, в поле которого вращается диск. В диске появляются вихревые токи, которые, взаимодействуя с вызвавшим их магнитным полем Φ_m , приводят к появлению сил тормозного момента M_m пропорционального скорости вращения диска n и препятствующего этому вращению (в соответствии с правилом Ленца).

Схема причинно-следственных связей в работе индукционного механизма показана ниже:



Конструкция счетчика выполнена с учетом условия

$$\sin \psi = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \cos \varphi,$$

где φ – угол между U и I_A .

Окончательно результирующий момент будет равен

$$M = kIU \cos \varphi = kP_{акт},$$

где k – постоянный коэффициент.

Из этого выражения следует, что вращающий момент пропорционален мощности переменного тока.

На основании изложенного выше можно сделать выводы:

1. Для создания вращающего момента необходимо создание не менее двух магнитных потоков, смещенных в пространстве.

2. Вращающий момент зависит от частоты приложенного напряжения.

Если считать магнитный поток тормозного магнита постоянным, то для тормозного момента справедливо выражение

$$M_m = k_1 \omega = k_1 (d\alpha / dt).$$

Итак, при постоянной нагрузке крутящий момент уравновешивается тормозным моментом и диск вращается с постоянной скоростью. Приравнивая вращающий и тормозной моменты, получаем

$$kUI \cos \varphi = k_1 (d\alpha / dt).$$

Число оборотов диска N за время Δt измерения энергии определяется интегралом по времени от частоты вращения диска $(d\alpha / dt)$, т.е.

$$N = k_2 \int_0^{\Delta t} \frac{d\alpha}{dt} dt = k_2 \frac{k}{k_1} \int_0^{\Delta t} UI \cos \varphi dt = \frac{W}{C},$$

где $C = k_1 / k k_2$ – постоянная счетчика; W – энергия, прошедшая через счетчик за интервал времени Δt .

Отсчет энергии производится по показаниям счетного механизма – счетчика оборотов, градуированного в единицах энергии. Единице электрической энергии (обычно 1 кВт·ч), регистрируемой счетным механизмом, соответствует определенное число оборотов подвижной части счетчика. Это соотношение, называемое *передаточным числом* A , указывается на счетчике (например, 1 кВт·ч = 2000 оборотов диска).

Величину, обратную передаточному числу, т.е. отношение зарегистрированной энергии к числу оборотов диска, называют *номинальной постоянной* $C_{ном}$. Значения A и $C_{ном}$ зависят только от конструкции счетного механизма и для конкретного счетчика остаются неизменными.

Под *действительной постоянной счетчика* C понимают количество энергии, действительно прошедшей через счетчик за один оборот подвижной части. Действительная постоянная в отличие от номинальной зависит от тока нагрузки, а также от внешних условий (температуры, частоты и т.д.). Зная C и $C_{ном}$, можно определить относительную погрешность счетчика $\delta = (W' - W) / W = (C_{ном} - C) / C$, где W' – энергия, измеренная счетчиком; W – действительное значение энергии, прошедшей через счетчик.

Счетчики активной энергии обычно выпускают классов точности 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; счетчики реактивной энергии – 1,5; 2,0 и 3,0. Класс точности счетчиков нормирует относительную основную погрешность и другие метрологические характеристики.

Государственным стандартом устанавливается порог чувствительности (в процентах) счетчика, определяемый выражением $\Delta S = 100 I_{\min} / I_{\text{ном}}$, где I_{\min} – минимальное значение тока, при котором диск счетчика начинает безостановочно вращаться; $I_{\text{ном}}$ – номинальное для счетчика значение тока в токовой обмотке. При этом напряжение и частота тока в цепи должны быть номинальными, а $\cos \varphi = 1$. Согласно ГОСТ 6570–75 порог чувствительности не должен превышать 0,4% для счетчиков класса точности 0,5 и 0,5% – для счетчиков классов 1,0; 1,5 и 2,0. Для счетчиков реактивной энергии классов 2,5 и 3,0 значение ΔS должно быть не более 1%.

Вращение диска при отсутствии тока в нагрузке и при наличии напряжения в параллельной цепи счетчика называют *самоходом*. Согласно ГОСТ 6570–75 самохода не должно быть при любом напряжении от 80 до 110% номинального.

Погрешность счетчика зависит от режима его работы, поэтому государственным стандартом нормируется разная относительная погрешность при различных нагрузках.

Под действием внешних факторов у счетчика появляются дополнительные погрешности, также нормируемые государственным стандартом. Дополнительные погрешности возникают вследствие искажения нормы кривой тока и напряжения, колебаний напряжения и частоты сети, резкого перепада мощности, потребляемой нагрузкой, и некоторых других факторов.

Кроме однофазных индукционных счетчиков промышленность выпускает трехфазные счетчики активной и реактивной энергии. Трехфазные счетчики представляют собой как бы три (трехэлементные) или два (двухэлементные) счетчика, объединенных одной осью вращения. Двухэлементные счетчики применяют при измерении энергии в трехпроводных трехфазных цепях, а трехэлементные счетчики – в четырехпроводных цепях.

Конструкция современных электромеханических счетчиков представляет собой трехпоточный измерительный механизм с тремя магнитными потоками и тремя контурами вихревых токов. Однако

это не влияет на выражения для вращающего момента, которые приводились выше.

Конструктивно современные электромеханические счетчики выполняются по приведенной ниже обобщенной схеме (рис. 4.23). Конструкция сердечника электромагнита \mathcal{E}_1 позволяет разделить магнитный поток $\Phi_{Uв}$, создаваемый обмоткой напряжения, на два потока: вспомогательный $\Phi_{Uв}$ и рабочий $\Phi_{Uр}$.

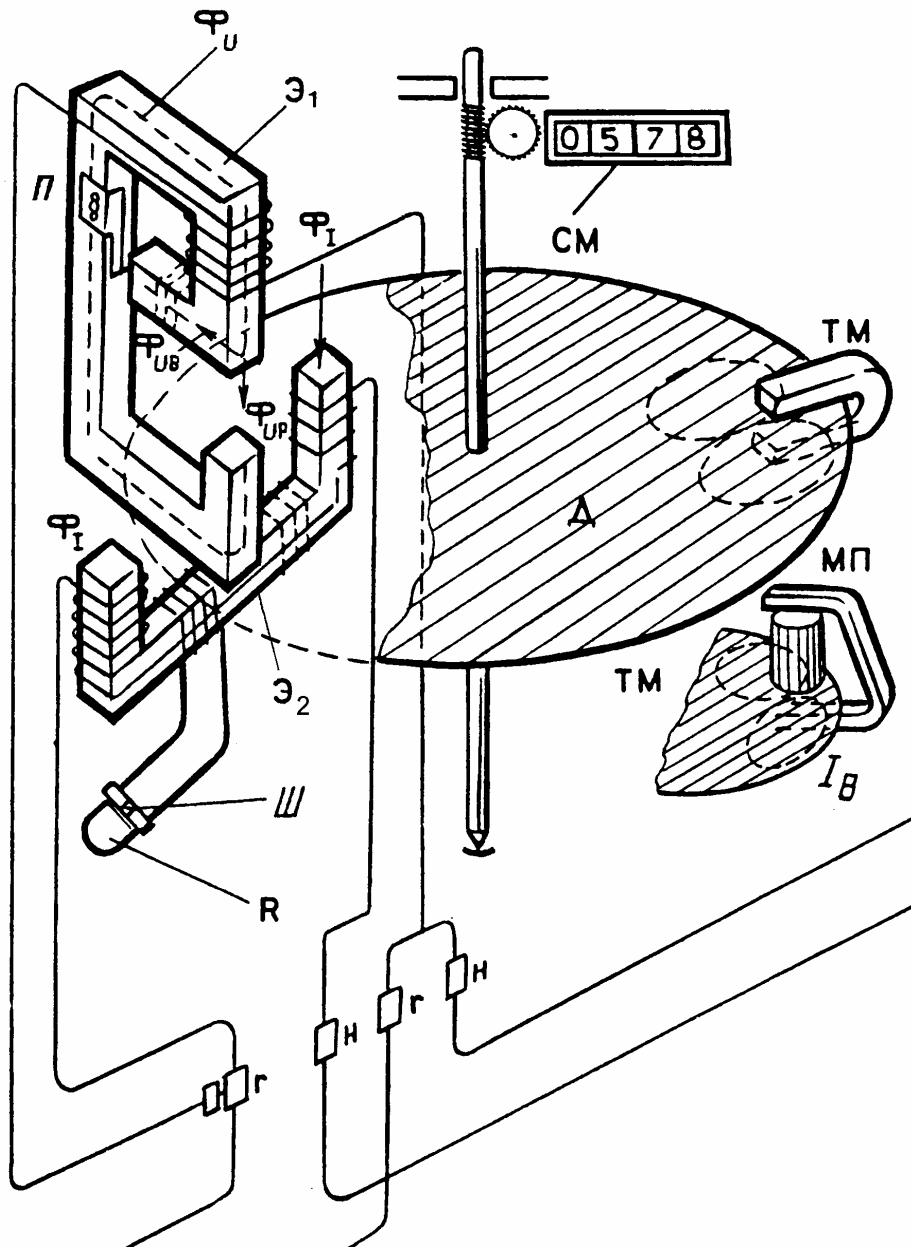


Рис. 4.23. Принципиальная конструктивная схема индукционного счетчика

На пути вспомогательного магнитного потока есть воздушный зазор, в который может вдвигаться медная пластинка *П*. Рабочий поток пронизывает диск *Д*, ось которого параллельна оси электромагнита \mathcal{E}_2 . Обмотка последнего включается последовательно с нагрузкой и имеет малое число витков. На сердечник этого электромагнита (для регулирования счетчика) накладываются короткозамкнутые витки. Некоторые из них замыкаются на внешний резистор с очень малым сопротивлением *R*, имеющий вид петли. Величину этого резистора можно изменять путем перемещения по нему шунтирующей пластины *Ш*. Постоянный тормозной магнит *ТМ* в современных конструкциях выполняется в виде цилиндра, который дополняется магнитопроводом *МП*.

Источники погрешностей счетчика индукционной системы:

1. *Момент трения в опорах*. Устраняется созданием малого компенсационного момента путем расщепления рабочего магнитного потока с помощью винта, вкрученного в сердечник или дополнительной пластинки, находящейся на противоположной стороне диска параллельно ему.

2. *Самоход*. Устраняется введением ферромагнитного флажка на оси диска, который при малой величине вращающего момента останавливается напротив специального постоянного магнита.

В отличие от классов точности аналоговых показывающих приборов классы точности счетчиков определяются не по приведенной, а по относительной погрешности, устанавливаемой при различных оговоренных ГОСТами нагрузках. Допускаемую относительную погрешность счетчика определяют по формуле

$$\delta = \frac{W_{сч} - W}{W} 100,$$

где $W_{сч}$ – значение электрической энергии, определенное по показаниям проверяемого счетчика за данный интервал времени; W – действительное значение электрической энергии, определенное за этот же интервал времени по показаниям образцовых приборов. В качестве образцовых приборов используется либо образцовый счетчик (имеющий более высокий класс точности), либо ваттметр и секундомер.

Относительная погрешность счетчика имеет сложную зависимость от тока нагрузки (рис. 4.24).

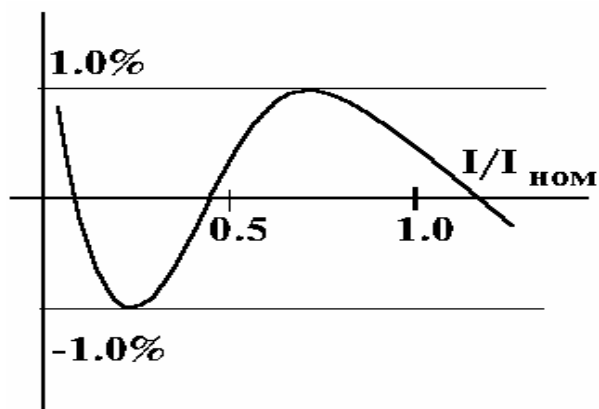


Рис.4.24. Нагрузочная кривая индукционного однофазного счетчика

Изгиб кривой в области малых нагрузок объясняется преобладающим влиянием трения, спад кривой в области больших нагрузок – влиянием торможения, создаваемого магнитным потоком последовательного электромагнита.

Типовые требования к исправному счетчику класса 2,5:

1. Погрешность счетчика должна удовлетворять следующим нормам:

Нагрузка, %	10	50	100	150
Погрешность	3,5	2,5	2,5	2,5

Из приведенных данных следует, что класс точности счетчика соответствует его погрешности в области больших нагрузок.

2. При отключении нагрузки диск счетчика должен делать не более одного оборота при колебаниях напряжения в пределах 80...110% от номинального.

3. При номинальном напряжении, частоте и $\cos\varphi = 1$ диск счетчика должен начать вращаться при нагрузке не более 1% от номинальной.

Наименьшая нагрузка, при которой диск счетчика начинает безостановочное вращение, называется *чувствительностью счетчика*.

Характеристики индукционных счетчиков

Достоинства:

1. Простота конструкции.
2. Низкая стоимость.
3. Выносливость к перегрузкам.
4. Независимость показаний от изменения температуры (и вращающий, и тормозной моменты одинаково зависят от меняющегося с температурой сопротивления контура тока в диске).

Недостатки:

1. Невысокая точность.
2. Значительная собственная потребляемая мощность (несколько ватт).

4.2.10. Электронные счетчики электрической энергии

Электронные счетчики электрической энергии предназначены для учета активной энергии в одно- и трехфазных цепях переменного тока в режиме одно- и многотарифности, а также для использования в составе *автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ)*.

Рассмотрим основные особенности таких устройств на примере статического однофазного счетчика электрической энергии классов точности 1,0 и 2,0 непосредственного включения с максимальным током до 100 А. Подобный счетчик имеет более компактную конструкцию по сравнению с индукционными механизмами и предназначен для использования в энергосистемах с промышленными, мелкомоторными и бытовыми потребителями. Для создания систем АСКУЭ на базе счетчиков может использоваться импульсный телеметрический выход, построенный по схеме с открытым коллектором (разъем винтовой или RJ11) (рис. 4.25).

Результаты измерений получаются путем обработки и вычисления входных сигналов тока и напряжения микропроцессорной схемой модуля счетчика. Измеренные данные и другая информация отображаются на семиразрядном жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ).

Предусмотрена возможность считывания диагностических и коммерческих данных на персональный компьютер через имеющийся IrDA-порт (Infrared Data Association) счетчика с помощью адаптера с преобразованием инфракрасного излучения в сигналы цифрового последовательного интерфейса RS232 (стандартные скорости передачи данных 2400, 4800 и 9600 бод). Счетчик является полностью электронным. В отличие от электромеханических счетчиков он не имеет движущихся частей, что повышает эксплуатационную надежность прибора и обеспечивает его многолетнюю безотказную работу. При отключении напряжения сети для хранения данных и конфигурации в схеме счетчика используется энергонезависимая память EEPROM.

Счетчики регистрируют и сохраняют в памяти некоторые вспомогательные данные, позволяющие контролировать достоверность учета электроэнергии, такие как:

- суммарная активная энергия в обратном направлении;
- непосредственная индикация потока энергии в обратном направлении на ЖКИ;
- количество отключений питания;
- суммарное время работы счетчика;
- время работы после последнего включения питания;
- время нахождения счетчика в режиме отсутствия тока;
- количество случаев перезапуска работы центрального процессора;
- количество случаев реверса активной энергии.

Срок гарантированного сохранения данных в памяти составляет 10 лет.

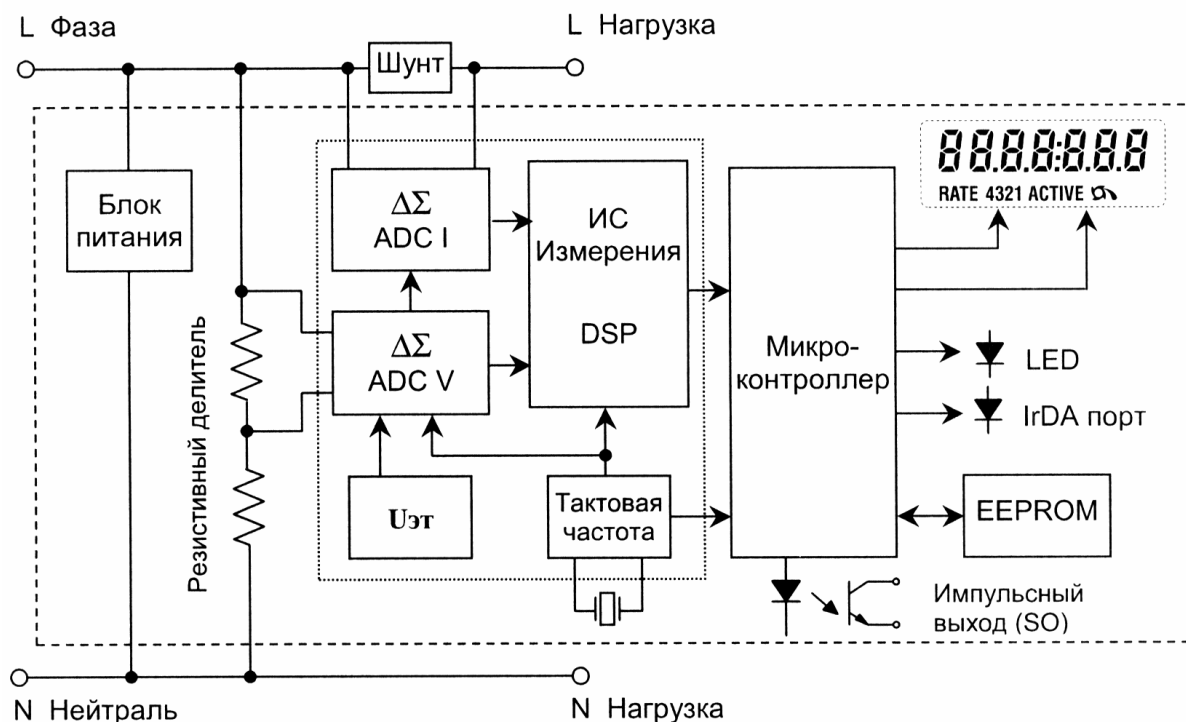


Рис. 4.25. Структурная схема электронного счетчика: $ADC I$, $ADC V$ – аналого-цифровые преобразователи тока и напряжения («дельта-сигма»-преобразователи); DSP – цифровой сигнальный процессор; $U_{эт}$ – источник высокостабильного напряжения (опорного); $EEPROM$ – постоянное запоминающее устройство; LED – светодиодный индикатор

Поскольку в счетчике нет движущихся частей, он невосприимчив к попыткам постороннего воздействия, которые могут иметь место с электромеханическими счетчиками. Счетчик невосприимчив также к наличию постоянной составляющей в сети. Чувствительность его составляет не более пятидесяти миллиампер (около $0,005 I_{ном}$).

Проверка счетчика производится с использованием импульсного выхода, имеющего гальваническую развязку; *постоянная счетчика*, или *передаточное число A* (число импульсов), равна 100 или 200 имп/кВт·ч в зависимости от модификации (максимального значения тока). Межповерочный интервал – 15 лет. Диапазон рабочих температур составляет от -20 до $+65$ °С. Срок службы – 30 лет.

Электронный модуль счетчика. Высокая точность измерений активной энергии достигается использованием специальной измерительной интегральной схемы (ИС), включающей в себя «дельта-сигма»-преобразователи (аналого-цифровые преобразователи) для входных сигналов тока и напряжения с высокостабильным опорным напряжением и кварцевым генератором, а также цифровой сигнальный процессор (DSP).

Выходные сигналы двух «дельта-сигма»-преобразователей поступают в цифровой сигнальный процессор, где обрабатываются и перемножаются. В результате на выходе DSP формируются импульсы с частотой, пропорциональной потребленной мощности. Также цифровой сигнальный процессор управляет процессом выделения и фильтрации возможной постоянной составляющей сигналов тока и напряжения.

Подсчет импульсов, выдаваемых цифровым сигнальным процессором, производит микроконтроллер с последующим увеличением регистра активного тарифа и сохранением (записью) данных в энергонезависимой памяти EEPROM. Микроконтроллер является важным звеном между микропроцессором и периферийными устройствами схемы, управляя работой жидкокристаллического дисплея, светодиодного индикатора (LED), IrDA-порта и импульсного выхода.

Используемые для необходимых вычислений постоянные калибровки загружаются в счетчик на заводе и сохраняются в энергонезависимой памяти EEPROM вместе с конфигурацией. В токовой цепи счетчика используется низкоомный шунт с сопротивлением не более $0,6$ мОм. Напряжение перед поступлением на вход «дельта-сигма»-преобразователя проходит через ряд высоколинейных резистивных

делителей напряжения. Все основные электронные элементы счетчика расположены на одной печатной плате с планарно-поверхностным и сквозным монтажом.

Источники питания электронной схемы рассчитаны на широкий диапазон входных напряжений питающей сети – от 184 до 276 В. Для надежной защиты от перегрузок и быстрых переходных всплесков входные цепи источника питания имеют нелинейное устройство подавления, ряд защитных резисторов по току и напряжению, а также фильтр высоких частот.

Измерительные датчики напряжения. Для получения высоколинейного сигнала напряжения и сведения к минимуму фазового сдвига в широком динамическом диапазоне используются резистивные делители напряжения. В качестве делителей применяются высокостабильные SMT-резисторы с минимальным температурным коэффициентом. Напряжение подается непосредственно на основную плату, где при помощи резистивных делителей приводится к необходимому уровню входных сигналов для «дельта-сигма»-преобразователя измерительной ИС. Измерительная ИС в составе схемы обеспечивает точное измерение напряжения и тока для использования в расчетах необходимых величин.

Преобразование и вычисление сигналов. «Дельта-сигма»-преобразователи преобразуют входные сигналы напряжения и тока в цифровой код, и цифровой сигнальный процессор соответствующим образом перемножает результаты аналого-цифрового преобразования. Далее измерительная ИС преобразует энергию в импульсы для микроконтроллера счетчика, который обрабатывает входные импульсы и передает данные в память счетчика, а также при необходимости обеспечивает передачу данных на ЖКИ и периферийные устройства схемы (реле, порты). Измерительная ИС содержит схему обнаружения перерывов питания, посылающую соответствующий сигнал на микроконтроллер. Постоянные калибровки, хранящиеся в памяти EEPROM, загружаются в счетчик на заводе и становятся частью соответствующих операций вычисления нужных величин.

Микроконтроллер выполняет различные функции, такие как:

- прием управляющих сигналов тарифного входа;
- связь между DSP и памятью EEPROM;
- передача данных через порт IrDA;

- управление светодиодным индикатором (LED) и импульсным выходом (SO);
- управление работой жидкокристаллического индикатора.

Микроконтроллер и измерительная ИС постоянно поддерживают связь между собой для непрерывной обработки входных сигналов токов и напряжений. При прекращении питания счетчика микроконтроллер инициирует его отключение и сохраняет расчетные и другие данные. При восстановлении (подаче) питания все данные считываются из памяти микроконтроллером и счетчик возвращается в исходное состояние (до отключения питания). Жидкокристаллический индикатор используется для отображения измеренных (вычисленных) данных и статусной информации. Светодиодный индикатор выдает импульсы (мигает) с частотой, пропорциональной измеренной энергии. При значении тока в цепи ниже чувствительности счетчика или его отсутствии светодиодный индикатор высвечивается непрерывно.

IrDA-порт. Через IrDA-порт счетчика можно считать следующие данные:

1. Заводской номер счетчика.
2. Идентификационный номер счетчика.
3. Номер конфигурации (запрограммированной).
4. Название счетчика (например, АBB А100).
5. Версия программного обеспечения счетчика.
6. Активная потребленная энергия тарифа 1 (10 цифровых разрядов).
7. Активная потребленная энергия тарифа 2 (10 цифровых разрядов).
8. Активная выданная энергия (суммарное значение, 10 цифровых разрядов).
9. Флаги событий (число тарифов, номер текущего тарифа, реверс активной энергии и нахождение счетчика в режиме отсутствия тока).
10. Ошибки контрольной суммы памяти.
11. Суммарное время работы счетчика.
12. Время работы счетчика с момента последнего включения питания.
13. Суммарное время нахождения счетчика в режиме отсутствия тока.
14. Количество отключений питания.

15. Количество случаев обнаружения счетчиком потока энергии в обратном направлении (активной выданной энергии).

16. Количество случаев перезапуска центрального процессора по причине аварийной работы (счетчик сбоя работы микропроцессора).

Тарифные входы и управление тарифами. В зависимости от модификации счетчики могут быть одно- или двухтарифными. Для двухтарифных счетчиков показания энергии отображаются вместе с индикатором тарифа (обычно цифра от 1 до 4), при этом действующий расчетный тариф индицируется одновременно с индикатором «ACTIVE». Показания отображаются в автоматическом режиме с длительностью удержания по умолчанию, равной 6 с (рис. 4.26).

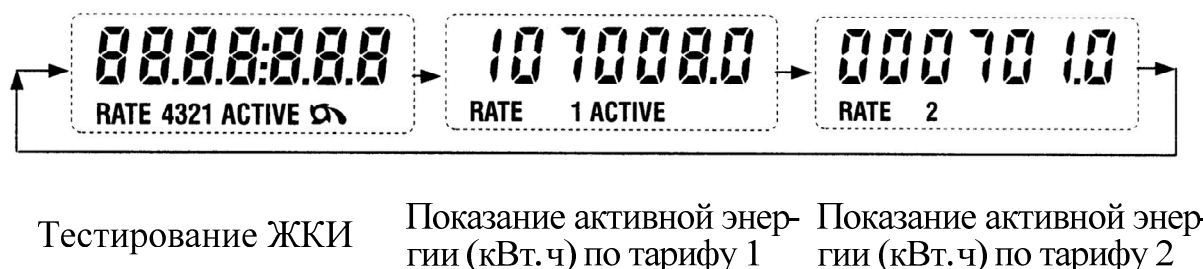


Рис. 4.26. Последовательность данных, отображаемых на ЖКИ двухтарифного счетчика

Двухтарифные счетчики имеют зажим для подключения *внешнего реле управления тарифами*, называемого также «реле времени», «таймер» или «тарификатор». В зависимости от модификации счетчика замкнутое положение внешнего реле (тарификатора) может соответствовать первому или второму тарифу. По умолчанию замкнутое положение внешнего реле соответствует второму тарифу.

Разработаны устройства для организации системы двухтарифного учета энергии – *групповые переключатели тарифа*, которые переключают тариф (временную зону в сутках) и могут обслуживать до 100 счетчиков одновременно. Они имеют следующие типовые особенности:

- запрограммированный электронный астрономический календарь на 50 лет;
- встроенный таймер для отсчета текущего времени (часы, минуты, секунды);
- жидкокристаллический индикатор, отображающий текущее время и границы временных зон;

- автономный источник питания, обеспечивающий сохранение хода часов и запрограммированной информации на срок более года при отсутствии сетевого питания;
- устойчивость к климатическим, механическим и электромагнитным воздействиям;
- автоматическая коррекция суточного хода часов и перехода на «зимнее» («летнее») время;
- программное задание двух зон суточного графика.

Устройства, называемые обобщенно «внешние реле» или «таймеры», предназначены также для формирования сигналов управления режимами работы разнообразных электроустановок по программно-задаваемым временным интервалам:

- тарифами счетчиков электроэнергии;
- включением/выключением нагревательных устройств;
- включением/выключением световой рекламы в заранее определяемое время и др.

При отключении сетевого питания работа таймера продолжается за счет питания внутренней литиевой батареи.

Дальнейшее развитие счетчиков энергии происходит по пути использования электронных устройств с предварительной оплатой на smart-картах. В этом случае необходимое количество электроэнергии оплачивается заранее, при покупке карты определенного номинала (или зачислении средств на нее). При минимальном остатке устройство дает сигнал абоненту, а при превышении лимита (овердрафте) происходит переключение токового ключа в положение минимальной расходуемой мощности. В таком режиме абонент не может применять большинство электроприборов. При истечении лимита овердрафта и по истечении периода неотключения абонента (ночное время или выходные дни, когда уплату произвести невозможно) приставка автоматически отключает абонента от энергоснабжения.

Основной задачей, реализуемой современными системами с предварительной оплатой, является организация таких взаимоотношений между энергосбытовыми компаниями и абонентами, при которых абоненты авансируют поставщика на отпуск определённого количества энергии.

4.3. Электронно-графические приборы

4.3.1. Универсальные осциллографы

Электрические процессы, протекающие в цепях радиоэлектронных устройств, часто весьма сложны и характеризуются большим числом параметров, не все из которых можно непосредственно измерить стрелочными измерительными приборами. Действительно, вольтметром переменного тока, например, можно измерить только среднеквадратическое эффективное значение переменного напряжения в относительно узком диапазоне частот, и то если его форма близка к синусоидальной. Если же форма колебаний значительно отличается от синусоидальной, погрешность измерений резко возрастает. Правда, эту погрешность можно учесть, но для этого необходимо знать, насколько форма колебаний отличается от синусоидальной. Для полной же характеристики электрических процессов в той или иной цепи необходимо знать *закон их изменения во времени*. Для исследования изменения электрических сигналов во времени используются электронно-графические приборы.

Электронно-графические приборы предназначены для получения оптического изображения на экране под действием электронов. К ним относятся осциллографические, радиолокационные и приемные телевизионные трубки (кинескопы).

Электронно-лучевыми называются электровакуумные приборы, в которых используется поток электронов, сконцентрированный в форме луча или пучка лучей.

Осциллограф (от лат. *oscillo* – качаюсь и греч. *grapho* – пишу) – прибор для визуального наблюдения или регистрации функциональной связи между двумя или более величинами, характеризующими какой-либо физический процесс.

Осциллограф относится к аналоговым средствам динамических измерений. В электротехнике и электронике наиболее часто осциллограф используется для наблюдения изменений тока или напряжения во времени, а также для измерения различных электрических величин: амплитуды тока и напряжения, частоты, сдвига фаз, глубины модуляции, длительности и частоты повторения электрических импульсов и др. С помощью осциллографа можно также наблюдать и запи-

сывать быстро меняющиеся неэлектрические величины (давление, температуру, влажность и др.), предварительно преобразовав их в электрические сигналы. По принципу действия различают светолучевые и электронно-лучевые (или электронные) осциллографы.

В электронно-лучевом осциллографе изменение исследуемой физической величины во времени отображается с помощью электронного луча на экране осциллографического электронно-лучевого прибора (или, иначе, электронно-лучевой трубки (ЭЛТ)).

Чаще всего с помощью электронного осциллографа исследуют электрические сигналы. На экранах большинства осциллографов имеются проградуированные шкалы, позволяющие измерять амплитудные или временные характеристики всего сигнала либо его части. (Вспомните, какие характеристики гармонического сигнала можно измерить электромеханическими измерительными приборами). В типовой схеме однолучевого осциллографа помимо ЭЛТ имеются: усилитель вертикального отклонения – канал «Y»; генератор (например, ждущий мультивибратор) и усилитель развертки (усилитель горизонтального отклонения), формирующие пилообразное напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах, – канал «X»; синхронизатор, формирующий синхроимпульс для запуска генератора в момент, соответствующий выбранной точке исследуемого сигнала; калибратор длительности, вырабатывающий временные отметки, по которым можно измерять временные характеристики сигналов; блок электропитания.

Важным элементом схемы осциллографа является входной делитель (аттенюатор), который обеспечивает:

- большое входное сопротивление осциллографа (для уменьшения его воздействия на исследуемую схему и соответственно искажения сигнала);
- масштабирование сигнала (деление напряжения), чтобы он уместился на экране;
- задание режима исследуемого сигнала: переменное напряжение – « \sim »; постоянное напряжение, в том числе с переменной составляющей, – « \cong »; отключение входа «Y» от исследуемой схемы (вход заземлен) для позиционирования линии развертки на экране относительно оси времени – « \perp » (рис. 4.27).

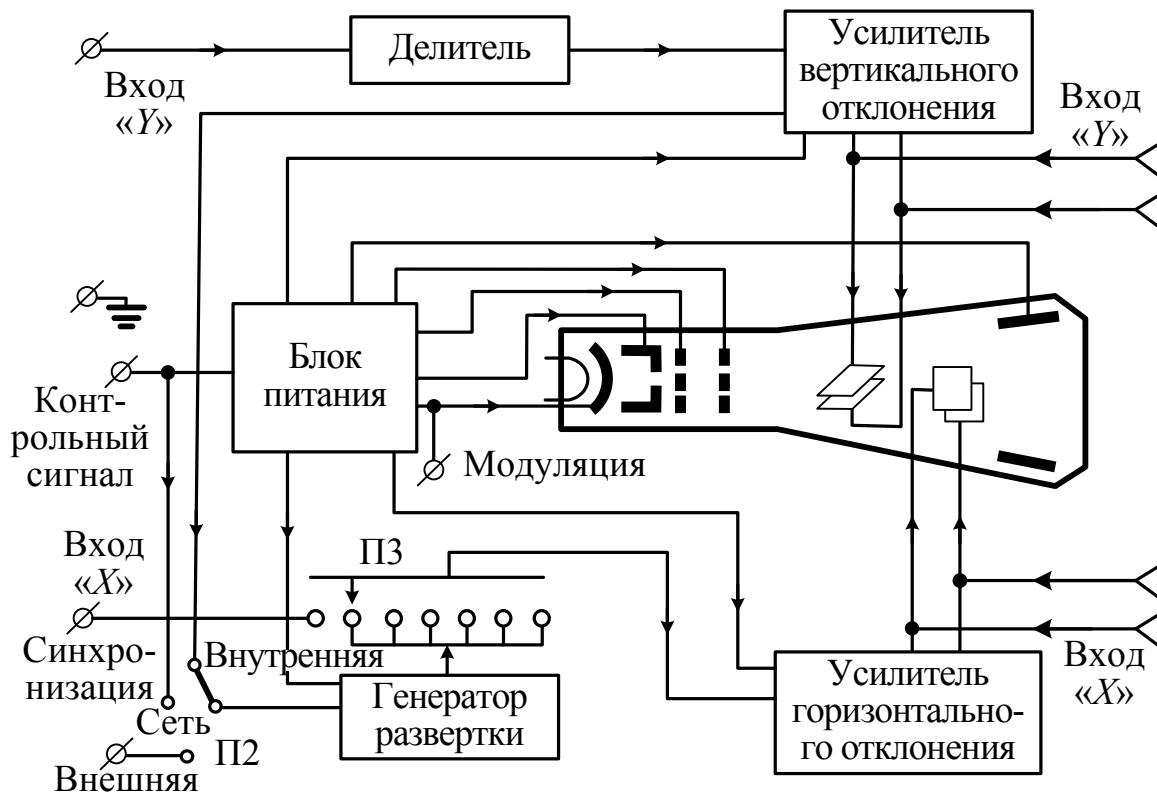


Рис. 4.27. Функциональная схема осциллографа

Осциллографическая трубка (рис. 4.28) представляет собой одноручево́й или многоручево́й прибор, предназначенный для наблюдения или регистрации изменений во времени быстропротекающих процессов, а также для генерации на экране требуемых изображений.

В электронно-графических приборах широко применяется электростатическое управление электронным лучом, так как электростатическая отклоняющая система конденсаторного типа обладает меньшей инерционностью по сравнению с электромагнитной системой, используемой, например, в телевизионных кинескопах.

В торце узкой части стеклянного баллона расположен катод в виде небольшого цилиндра. Внутри катода помещена спираль для подогрева. Дно цилиндра с внешней стороны покрыто оксидным слоем (эмиссионно-активным веществом, например оксидом бария, титана). Под действием напряжения накала U_n подогреватель раскаляет катод и его торцевая поверхность, на которую нанесен оксидный слой, начинает испускать электроны (явление термоэлектронной эмиссии). Вблизи катода располагается по́лый цилиндр, называемый управляю-

щим электродом или модулятором. Он служит для изменения плотности тока электронного луча.

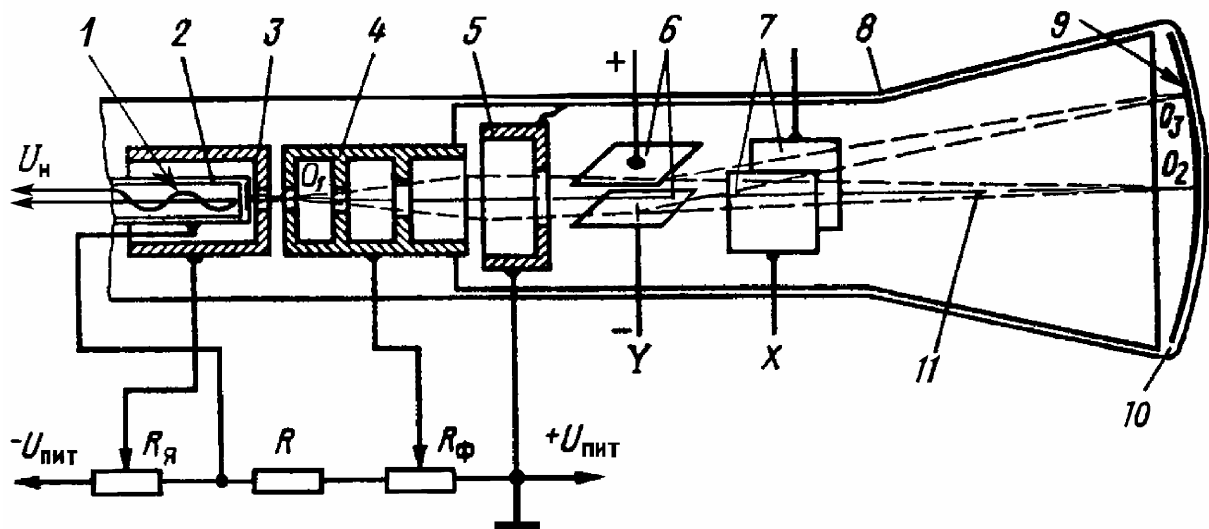


Рис. 4.28. Устройство электронно-лучевой трубки:

1 – подогреватель; 2 – катод; 3 – управляющий электрод (модулятор); 4 – фокусирующий электрод (первый анод); 5 – анод (второй анод); 6 – пластины вертикального отклонения луча (горизонтальные пластины); 7 – пластины горизонтального отклонения луча (вертикальные пластины); 8 – аквадаг; 9 – люминофор; 10 – баллон электронно-лучевой трубки; 11 – электронный луч

По оси трубки располагаются еще два цилиндра – первый и второй *аноды*. Первый анод, находясь под положительным потенциалом в несколько сотен вольт, ускоряет движущийся от катода поток электронов. Ко второму аноду подводится напряжение, достигающее в некоторых электронно-лучевых приборах десятков киловольт. В результате этого электронный поток из второго анода выходит с достаточно высокой скоростью. Кроме ускорения электронов аноды фокусируют электронный поток в узкий луч, сходящийся у поверхности экрана. Яркость свечения регулируется с помощью потенциометра $R_{я}$, изменяющего напряжение между модулятором и катодом; фокусировка обеспечивается потенциометром $R_{ф}$, изменяющим потенциал на первом аноде. Вся система электродов крепится на траверсах и образует единое устройство, называемое *электронным прожектором*.

Выйдя из электронного прожектора, электронный луч попадает в *отклоняющую систему*, служащую для управления положением луча в пространстве. Отклоняющая система состоит из двух пар пластин, расположенных попарно в вертикальной и горизонтальной

плоскостях. Пластины, расположенные ближе к прожектору, называются *измерительными* (или горизонтальными пластинами *вертикального отклонения* луча, или входом « Y »). Трубку в аппаратуре устанавливают таким образом, чтобы измерительные пластины давали вертикальное отклонение пятна.

Под действием напряжения, поступающего на эти пластины, луч на экране прочерчивает вертикальную прямую линию. Ее длина характеризует размах исследуемого колебания (для синусоидального процесса она равна двум амплитудам ($2U_{\max}$) (рис. 4.32). На электроны, попадающие в электростатическое поле отклоняющих пластин, действует сила Лоренца.

Для наблюдения (регистрации) исследуемого колебания пятно на экране должно двигаться с постоянной скоростью в горизонтальном направлении (сигнал необходимо «развернуть» во времени). Это достигается с помощью вертикальных пластин *горизонтального отклонения* (вход « X »). Если на пластины X и Y напряжение не подано, то электронный луч образует светящуюся точку в центре экрана.

Благодаря *люминофорному* покрытию происходит свечение экрана под действием бомбардирующих его электронов (явление люминесценции). При бомбардировке экрана электронами луча с его поверхности также вылетают вторичные электроны, создающие нежелательное «размывание» светового пятна и свечение всего экрана. Для уменьшения этого эффекта используется *аквадаг* – покрытие электронно-лучевой трубки из проводящей графитовой пасты. Вторичные электроны увлекаются полем аквадага, находящегося под положительным потенциалом заземленного второго анода, и уходят от люминофорного покрытия экрана.

Рассмотрим простые варианты образования изображения на экране. Если на пластины отклоняющей системы X и Y напряжение не подано, то, как уже было сказано, луч образует пятно в центре экрана. Если на одну из пластин, например X , подано постоянное положительное напряжение, то пятно перемещается по горизонтали (рис. 4.29), а если на Y , то по вертикали (рис. 4.30).

Одновременная подача отклоняющего напряжения на обе пары пластин сдвигает пятно по диагонали в сторону пластин, которые находятся под положительным напряжением (рис. 4.31). При подаче на вход « Y », например, синусоидального напряжения, на экране будет

вертикальная прямая, по которой можно определить размах напряжения (рис. 4.32).

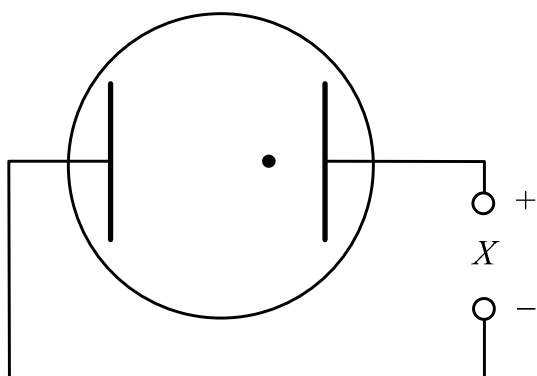


Рис. 4.29. Отклонение луча в сторону положительно заряженной вертикальной пластины X

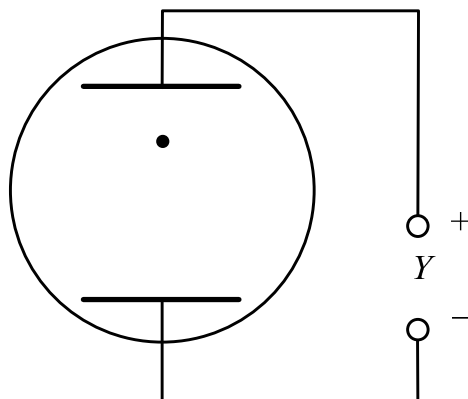


Рис. 4.30. Отклонение луча в сторону положительно заряженной горизонтальной пластины Y

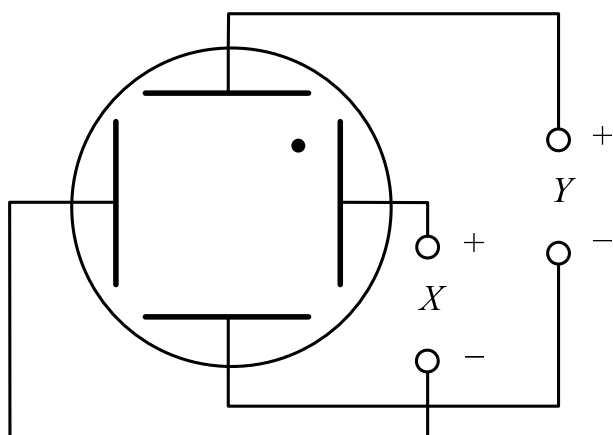


Рис. 4.31. Взаимное действие на луч двух пластин, находящихся под положительным потенциалом

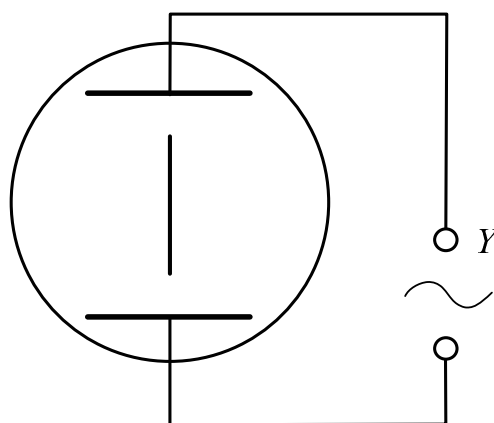


Рис. 4.32. Действие на луч переменного напряжения, поданного на пластины Y

Проследим образование изображения на экране осциллографической трубки (случай исследования сигнала синусоидальной формы). Пусть на пластины горизонтального отклонения подается линейно изменяющееся напряжение – напряжение развертки (рис. 4.33). Когда напряжение на этих пластинах имеет максимальное отрицательное значение t_0 , пятно находится на левом краю экрана. По мере

увеличения напряжения (интервал T_1) пятно *с постоянной скоростью* (так как напряжение изменяется во времени линейно) перемещается вдоль горизонтальной оси слева направо, и при наличии на измерительных пластинах Y исследуемого сигнала луч описывает кривую, подобную ему. Когда пятно достигает противоположного края экрана, развертывающее напряжение (напряжение развертки) быстро уменьшается (интервал T_2) и пятно возвращается в исходное положение. Осциллограммы на экране получаются неподвижными (не бегущими и не двоящимися) только тогда, когда период напряжения развертки равен или кратен периоду исследуемого колебания. Выполнение этого условия достигается при помощи синхронизации, когда генератору, вырабатывающему напряжение развертки, принудительно навязывается частота синхронизирующего сигнала, равная или кратная частоте исследуемого напряжения.

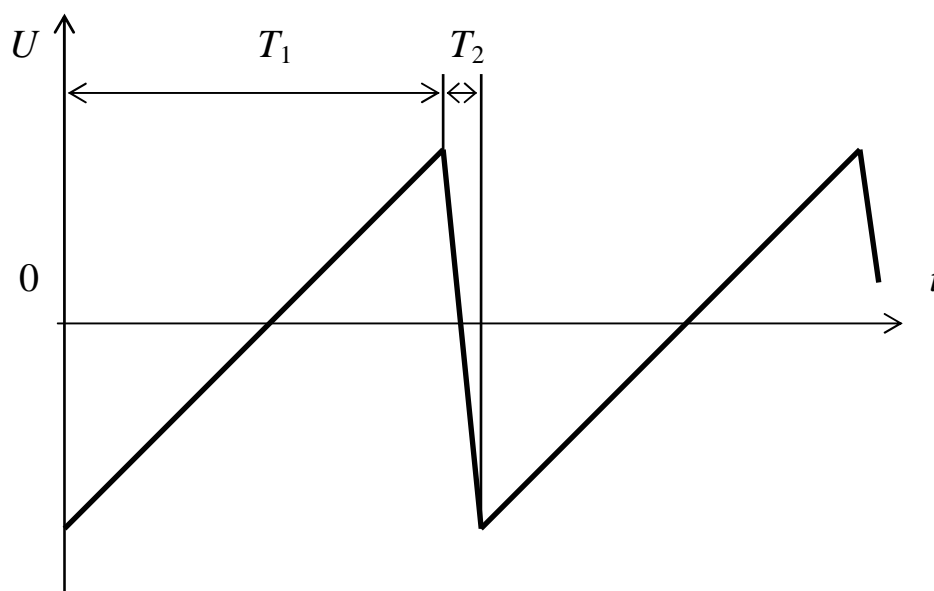


Рис. 4.33. Временная диаграмма работы генератора развертывающего напряжения

На рис. 4.34 показано, как образуется изображение на экране ЭЛТ. Исследуемое напряжение с амплитудой U_c и периодом T_c подается на пластины Y , напряжение развертки с амплитудой U_p и периодом T_p – на пластины X . Если $T_p = T_c$, то каждому периоду развертки будет соответствовать период исследуемого напряжения и изображение на экране не будет изменяться со временем, оставаясь неподвижным. Это изображение можно построить по точкам, отмечая значения напряжений развертки и сигнала в заданные моменты времени и пе-

рenessя их на экран. На рис. 4.34 это сделано для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3 и t_4 . Пятно на экране в эти моменты будет занимать положения $0, 1, 2, 3$ и 4 соответственно. Полученное таким образом изображение (или его запись), показывающее, как изменяется исследуемое напряжение в зависимости от времени, называется *осциллограммой*. Имея осциллограмму, можно определить многие параметры сигнала: амплитуду, частоту, период и др.

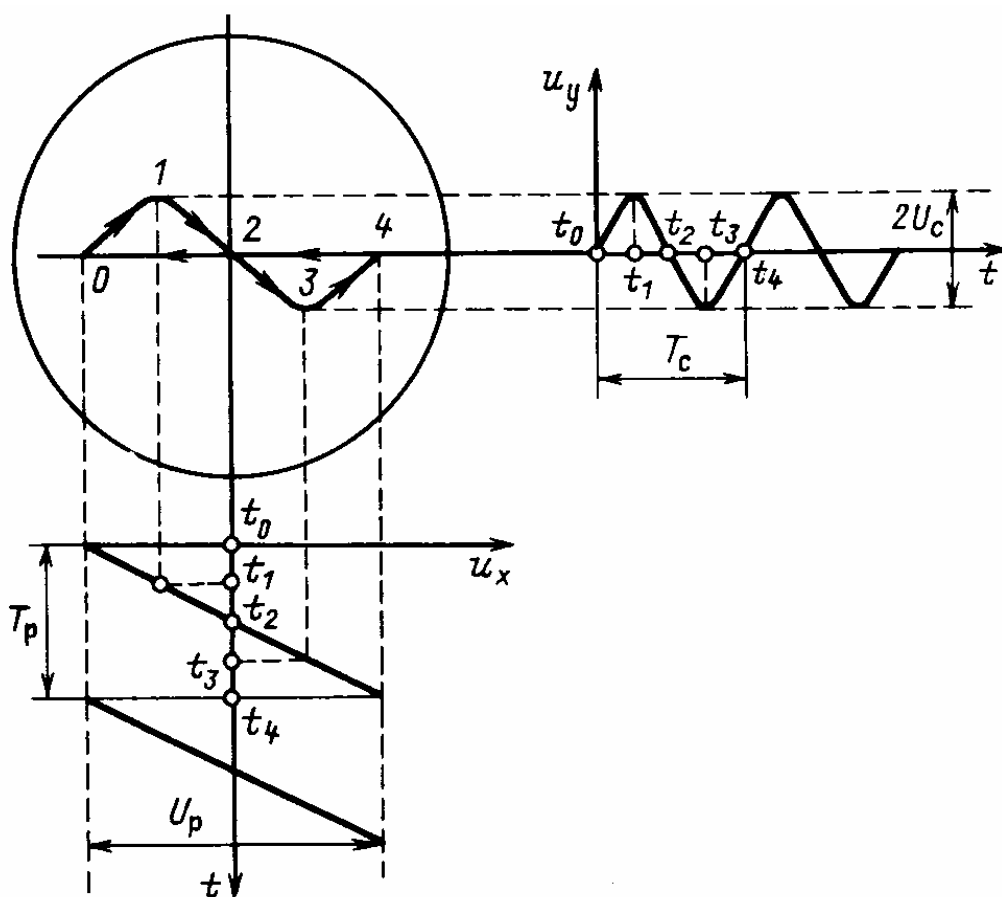


Рис. 4.34. Образование изображения на экране ЭЛТ с помощью развертывающего напряжения

Основными техническими характеристиками осциллографа являются:

- рабочая часть экрана осциллографа, мм;
- минимальная частота следования развертки, при которой обеспечивается наблюдение и измерение исследуемого сигнала на наиболее быстрой развертке, кГц;
- полоса пропускания тракта вертикального отклонения, МГц;

- полоса пропускания тракта горизонтального отклонения, МГц;
- входное активное сопротивление и параллельная емкость, МОм, пФ;
- погрешность коэффициента отклонения в рабочем диапазоне влияющего фактора, %;
- максимальный размах напряжения исследуемого сигнала, В.

Типовая панель управления универсального осциллографа типа С1-73 показана на рис. 4.35.

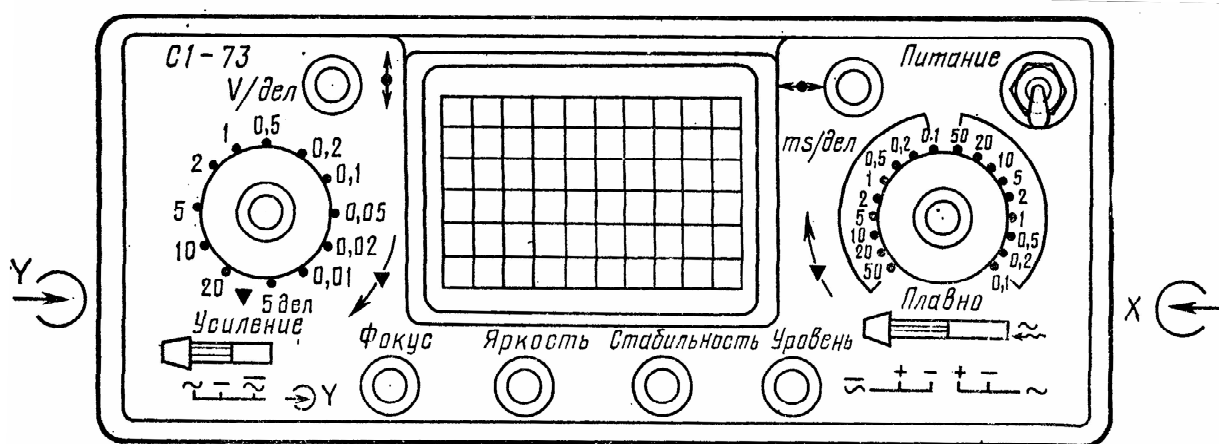


Рис. 4.35. Компоновка органов управления осциллографа С1-73

При электрических измерениях наиболее часто используют три значения переменных напряжений (токов): максимальное, средневыпрямленное и среднеквадратическое.

Максимальное значение – наибольшее мгновенное значение сигнала на протяжении заданного интервала времени. При синусоидальной форме напряжения (тока) его называют амплитудным значением или просто амплитудой U_a . Его важно знать, например, для оценки электрической прочности изоляции и в ряде других случаев. Двойная амплитуда $2U_a$ называется «размах» (рис. 4.36).

Средневыпрямленное значение – это среднее значение сигнала после полного выпрямления. Для напряжений и токов симметричной формы (например, синусоидальной) его можно определить как среднее арифметическое мгновенных значений за положительный полупериод. Знать это значение важно, например, при проектировании устройств для зарядки аккумуляторов, электролизеров и т.п.

Среднеквадратическое (эффективное) значение переменного тока (напряжения) численно равно такому постоянному току (напряжению), который создает в соответствующих условиях равный энергетический (например, тепловой) эффект. Это значение иногда называют *действующим*. Если в тексте или на схеме указано числовое значение переменного тока (напряжения) без каких-либо оговорок, то обычно имеется в виду его среднеквадратическое значение.

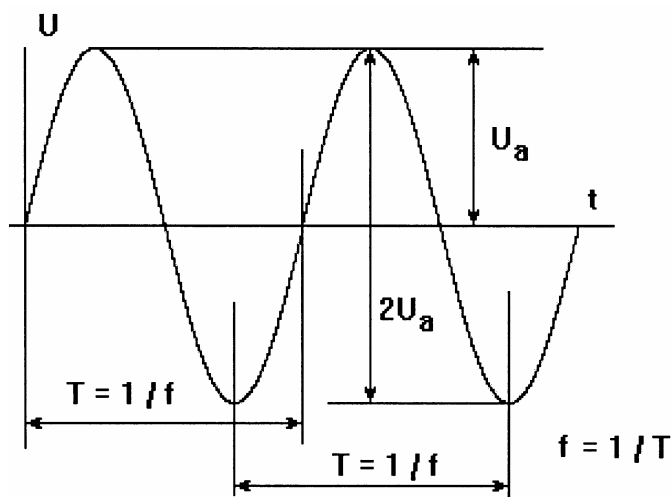


Рис. 4.36. Параметры синусоидального сигнала

Полезно помнить, что максимальное значение не может быть меньше среднеквадратического, а среднеквадратическое – меньше среднев्यпрямленного. Если ток имеет синусоидальную форму, то максимальное, среднеквадратическое и среднев्यпрямленное значения относятся одно к другому как 1,41:1,0:0,9. Если же ток имеет пилообразную (треугольную) форму, то те же значения соотносятся как 1,73:1,0:0,86. Если форма сигнала симметричная прямоугольная, то все три значения одинаковы.

При выполнении измерений с помощью осциллографа обычно имеют дело со следующими основными видами исследуемого сигнала:

- негармонические сигналы с постоянно изменяющейся частотой и амплитудой, характеризующие случайные процессы в цепях («шумы»);
- постоянное напряжение;
- гармонические сигналы синусоидальной формы;

- синусоидальные сигналы с постоянной составляющей напряжения (со сдвигом напряжения);
- прямоугольные импульсы;
- другие виды сигналов (например, пилообразное напряжение, двухполупериодное напряжение и т.п.).

Точность измерений осциллографом непосредственно измеряемых параметров (т.е. времени t и напряжения u) варьируется от 5 до 10%. При проведении измерений с помощью универсального осциллографа условно считаем, что его погрешность составляет около 7%, т.е. $\Delta T/T \approx 7\%$; $\Delta u/u \approx 7\%$.

Далее рассмотрим исследование частотных и фазовых характеристик синусоидальных сигналов методом фигур Лиссажу (метод сравнения с образцовой мерой).

Измерение частоты. Для измерения частоты электрических сигналов получил распространение метод сравнения с мерой, отличающийся относительной простотой, сравнительно высокой точностью и пригодностью для использования в широком диапазоне частот – способ измерения по интерференционным фигурам, или *метод фигур Лиссажу*. В качестве меры может служить частота аттестованного генератора, например кварцевого. В студенческих лабораторных работах мы обычно используем в качестве меры частоту промышленного переменного тока 50 Гц. Допустимые отклонения частоты жестко контролируются стандартом, и величина отклонения $\pm 0,5$ Гц считается аварийной. Таким образом, мы имеем «образцовую» частоту, задаваемую с погрешностью менее 1%. Этот способ пригоден для измерения частот в пределах полосы пропускания электронно-лучевой трубки. Измерение частоты можно производить при линейной, синусоидальной и круговой развертках. Измеряемая частота определяется по равенству или кратности известной частоте. Индикатором равенства или кратности частот может служить электронный осциллограф. При этом неизвестная частота сравнивается с точно известной частотой, а *фигуры Лиссажу* используются для определения отношения между двумя частотами. Форма фигур Лиссажу зависит от отношения частот m/n и начальных фаз сравниваемых колебаний.

Для получения фигуры Лиссажу сигнал неизвестной частоты подается на вертикальный вход осциллографа «Y». Внутренняя развертка осциллографа отключается, и выход от измерительного генератора высокой точности (*эталонного генератора*) присоединяется к входу системы горизонтального отклонения – «X». Чувствительности обоих входов регулируют, чтобы воспроизводимая на экране картина заполняла весь экран. Частота измерительного генератора затем подбирается так, чтобы на экране получилось стационарное (неподвижное) изображение. Это происходит при фиксированном целочисленном отношении между частотами двух входных сигналов. Оно находится как отношение числа точек пересечения фигуры на экране с горизонтальной и вертикальной опорными линиями (рис. 4.37). Иначе говоря, это отношение числа касаний фигуры с наложенными на экран горизонтальной и вертикальной осями.

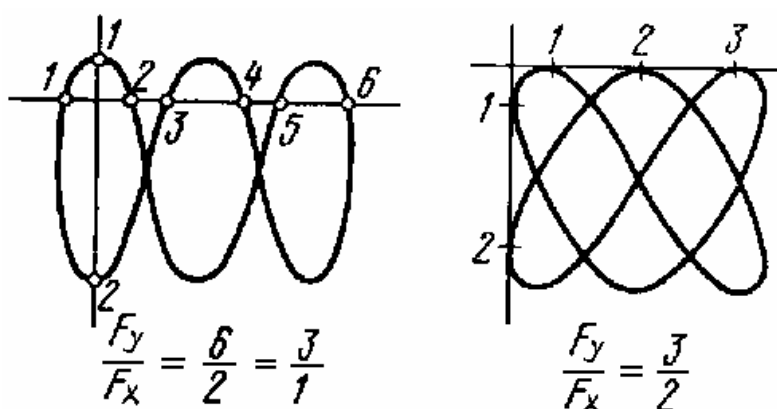


Рис. 4.37. Определение соотношения частот по фигуре Лиссажу с помощью секущих или касательных линий

Полученное изображение зависит от соотношения частот и фазовых соотношений двух входных сигналов, но в любом случае выполняется условие

$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{\text{Число пересечений горизонтальной опорной линии}}{\text{Число пересечений вертикальной опорной линии}}$$

Точность этого метода определения частоты колебаний оказывается высокой и определяется стабильностью образцового генератора, однако получение и наблюдение фигур Лиссажу – достаточно сложная измерительная задача.

Фазовые измерения. Фигуры Лиссажу могут использоваться для измерения сдвига фаз между двумя сигналами. Приведем пример для сигналов с равными частотами и амплитудами. В этом случае изменение фазового сдвига от 0° до 180° приводит к изменению формы фигуры Лиссажу от прямой линии через эллипс к окружности. Окружность получается при фазовом сдвиге 90° или 270° , когда амплитуды обоих входных сигналов равны. Если они не равны, то получается эллипс с вертикальной или горизонтальной главной осью в зависимости от того, какой сигнал – вертикальный или горизонтальный – имеет большую амплитуду.

Фазовый сдвиг между двумя сигналами можно определить по методу эллипса, как показано на рис. 4.38. Коэффициенты усиления усилителей вертикального и горизонтального отклонения обычно подбирают так, чтобы эллипс вписался в квадрат. Значение фазового угла θ находится как отношение параметров эллипса по формуле

$$\theta = \arcsin (Y_1/Y_2) = \arcsin (X_1/X_2).$$

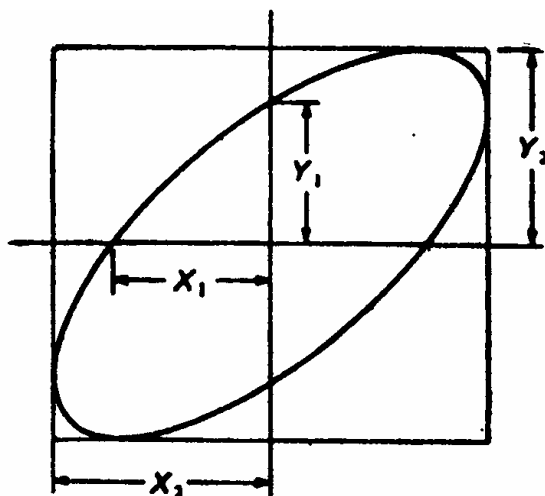


Рис. 4.38. Измерение фазового сдвига по методу эллипса

Варианты фигур Лиссажу для сигналов с разным отношением частот и фаз показаны в табл. 4.2, а пример графического построения фигуры Лиссажу приведен в прил. 2.

Таблица 4.2

Интерференционные фигуры (Лиссажу) при разных фазовых сдвигах на входе «Y» и соотношениях частот синусоидальных сигналов

φ	$f_y:f_x$			φ	$f_y:f_x$		
	1:1	2:1	3:1		1:2	1:3	3:2
0° (360°)				0° (360°)			
45° (315°)				45° (315°)			
90° (270°)				90° (270°)			
135° (225°)				135° (225°)			
180°				180°			

4.3.2. Цифровые осциллографы

Цифровой осциллограф позволяет одновременно наблюдать на экране сигнал и получать численные значения ряда его параметров с большей точностью, чем это возможно путем считывания количественных величин непосредственно с экрана обычного осциллографа. Это возможно потому, что параметры сигнала измеряются непосредственно на входе цифрового осциллографа, тогда как сигнал, прошедший через канал вертикального отклонения, может быть измерен с существенными ошибками, достигающими 10%.

Параметрами, измеряемыми современными цифровыми осциллографами, являются амплитуда сигнала, его частота или длительность. 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. Однако возможности цифровых осциллографов этим не ограничиваются. Сопряжение цифровых осциллографов с микропроцессорами позволяет определять действующее значение напряжения сигнала и даже вычислять и отображать на экране преобразования Фурье для любого вида сигнала.

В цифровых осциллографах осуществляется полная цифровая обработка сигнала, поэтому в них, как правило, используется отображение на новейших индикаторных панелях.

В цифровых осциллографах отображение результата измерения производится тремя способами:

- параллельно с наблюдением динамического изображения сигнала на экране его численные параметры высвечиваются на табло;
- оператор подводит к изображению сигнала на экране световые метки так, чтобы отметить измеряемый параметр, и по цифре на соответствующей регулировке определяет величину интересующего параметра;
- используются специальные кинескопы (например, матричные индикаторы) и растровый метод формирования изображения исследуемых сигналов и цифровой информации.

В современных цифровых осциллографах автоматически устанавливаются оптимальные размеры изображения на экране трубки.

Структурная схема автоматизированного цифрового осциллографа содержит: аттенюатор входного сигнала, усилители вертикального и горизонтального отклонения, измерители амплитуды и временных интервалов, интерфейсы сигнала и измерителей, микропроцессорный контроллер, генератор развертки, схему синхронизации и электронно-лучевую трубку.

Технические характеристики современного типового цифрового осциллографа:

- полоса пропускания 0...100 МГц;
- коэффициенты отклонения 0,002...10 В/дел;
- коэффициенты развертки 20 нс/дел...20 мс/дел;
- погрешность коэффициентов отклонения и развертки 2...4 %;
- погрешность цифровых измерений 2...3 %;
- размер экрана 80×100 мм.

Функциональные возможности:

- автоматическая установка размеров изображения;
- автоматическая синхронизация;
- разностные измерения между двумя метками;
- автоматическое измерение размаха, максимума и минимума амплитуды сигналов, периода, длительности, паузы, фронта и спада импульсов;
- вход в канал общего пользования.

Из структурной схемы цифрового осциллографа (рис. 4.39) видно, что амплитудные и временные параметры исследуемого сигнала определяются с помощью встроенных в прибор измерителей. На основании данных измерений микропроцессорный контроллер производит вычисление требуемых коэффициентов отклонения развертки и через интерфейс устанавливает эти коэффициенты в аппаратной части каналов вертикального и горизонтального отклонения. Это обеспечивает неизменные размеры изображения по вертикали и горизонтали, а также автоматическую синхронизацию сигнала.

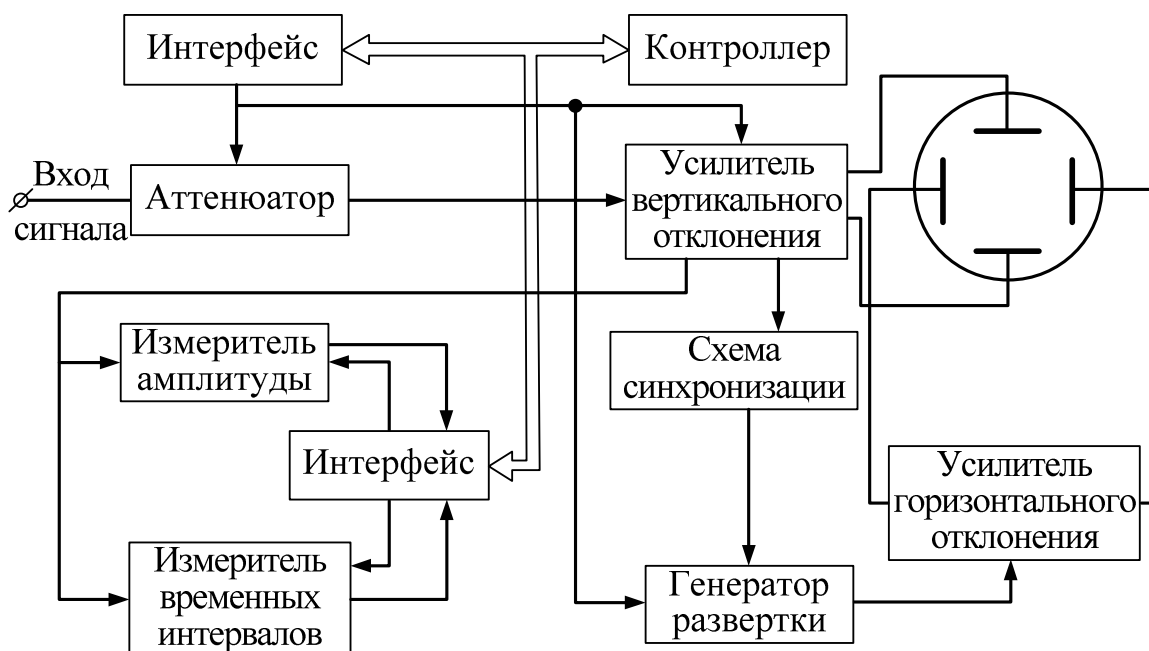


Рис. 4.39. Упрощенная структурная схема цифрового осциллографа

Микропроцессорный контроллер также опрашивает положение органов управления на передней панели, и данные опроса после кодирования снова поступают в контроллер, который через интерфейс включает соответствующий режим автоматического измерения. Ре-

зультаты измерений индицируются на отдельном световом табло (оно может быть встроено в экран трубки), причем амплитудные и временные параметры сигнала отображаются одновременно.

4.4. Измерение переменных токов и напряжений с помощью преобразователей тока

В современных средствах измерений входной сигнал, несущий информацию об измеряемой величине, часто испытывает ряд преобразований. Их цель – привести сигнал к виду, при котором возможно последующее измерение его информативных параметров с заданной точностью. Совокупность элементов средства измерений или измерительного канала, обеспечивающая осуществление всех преобразований измерительного канала, называется *измерительной цепью*. Элемент измерительной цепи, в котором осуществляется одно из ряда последовательных преобразований измерительного сигнала, называется *преобразовательным элементом* (ПЭ). Один или несколько преобразовательных элементов, конструктивно оформленных в самостоятельное изделие, называют *измерительным преобразователем* (ИП).

Преобразования сигналов могут быть различными, например:

- изменение физической природы сигнала (например, преобразование сопротивления электрической цепи в ток или напряжение и т.п.);
- масштабирование, т.е. приведение сигнала к определенному диапазону изменения;
- линеаризация – операция, обеспечивающая линейную зависимость между информативными параметрами входного и выходного сигналов;
- фильтрация – отделение сигнала от помех, наложенных на него;
- аналого-цифровое преобразование, т.е. преобразование непрерывной (аналоговой) формы сигнала в цифровой код.

Измерительные преобразователи предназначены для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

4.4.1. Выпрямительная система

Магнитоэлектрические приборы характеризуются высокой чувствительностью, высокой точностью и малым потреблением мощности. Но они пригодны только для измерений в цепях постоянного тока. Для того чтобы использовать магнитоэлектрические приборы для измерений на переменном токе, нужно предварительно преобразовать переменный ток в постоянный. В качестве преобразователей используются полупроводниковые выпрямители. Выпрямительный прибор – это сочетание магнитоэлектрического механизма с выпрямителем на полупроводниковых диодах.

Применяются различные схемы преобразования:

1. Однополупериодная (рис. 4.40).
2. Двухполупериодная трансформаторная (рис. 4.41). Трансформатор позволяет электрически изолировать цепь измерительного механизма от цепи измеряемого тока или напряжения. Недостатком схемы является зависимость коэффициента трансформации трансформатора от частоты.
3. Двухполупериодная мостовая (рис. 4.42).

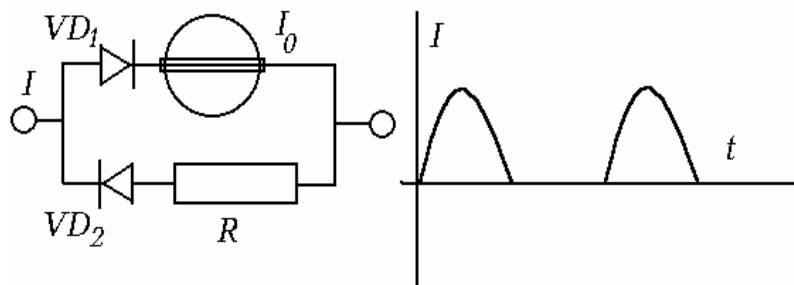


Рис. 4.40. Схема однополупериодного выпрямления

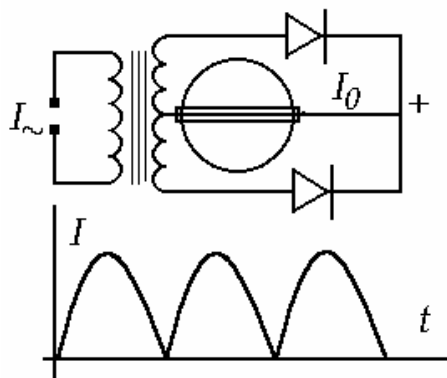


Рис. 4.41. Двухполупериодная трансформаторная схема с выводом средней точки

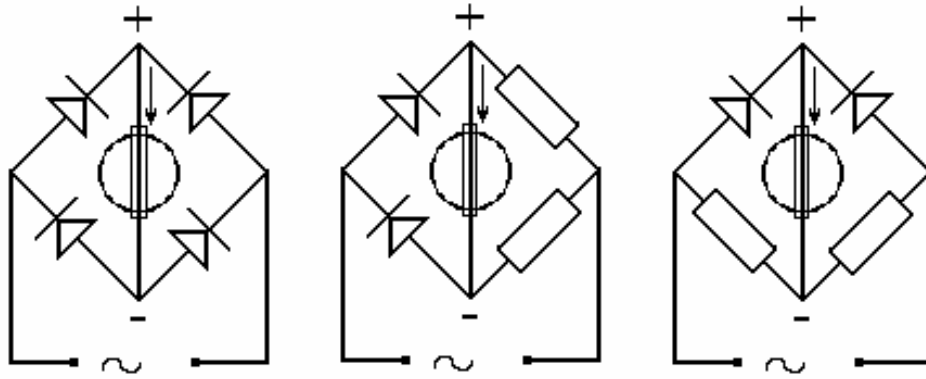


Рис. 4.42. Мостовые выпрямительные схемы

Иногда в мостовой схеме в целях экономии два диода заменяют резисторами, сопротивление которых равно прямому сопротивлению диодов. Достоинством такой схемы является уменьшение температурной погрешности приборов, а недостатком – снижение чувствительности.

Мгновенное значение вращающего момента, действующего на подвижную рамку измерительного механизма магнитоэлектрической системы, равно

$$m = BS\omega i,$$

где i – мгновенное значение тока, протекающего через измерительный механизм.

Из-за инерции подвижной части ее отклонение будет пропорционально среднему значению вращающего момента. Поскольку $i = I_m \sin \omega t$, то для схемы с однополупериодным выпрямлением средний за период вращающий момент равен

$$M_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} m dt = BS\omega \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{BS\omega}{2} I_{cp},$$

где I_{cp} – среднев्यпрямленное значение синусоидального тока,

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt.$$

Угол поворота подвижной части равен

$$\alpha = \frac{BS\omega}{2k} I_{cp}.$$

Для схемы с двухполупериодным выпрямлением значения M_{cp} и α увеличиваются вдвое.

На выходе выпрямительных приборов постоянный ток пропорционален *средневыпрямленному значению* переменного тока на входе прибора. Градуировка шкалы, как правило, проводится не по среднему значению тока, а по действующему, поэтому в окончательное уравнение прибора вводится *коэффициент формы* $k_\phi = I_\partial / I_{cp}$:

$$\alpha = \frac{BS\omega}{kk_\phi} I.$$

Для синусоидального тока $k_\phi = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$.

При отличии формы кривой измеряемого тока (напряжения) от синусоиды в показаниях приборов возникает погрешность.

В условном обозначении приборов выпрямительной системы к основному символу системы добавляется знак диода: 

4.4.2. Термоэлектрическая система преобразования тока

Физическая основа принципа действия термоэлектрической системы преобразования тока – термоэлектрический эффект. Термоэлектрические приборы представляют собой соединение одного или нескольких термоэлектрических преобразователей и магнитоэлектрического измерительного механизма (рис. 4.43, 4.44).

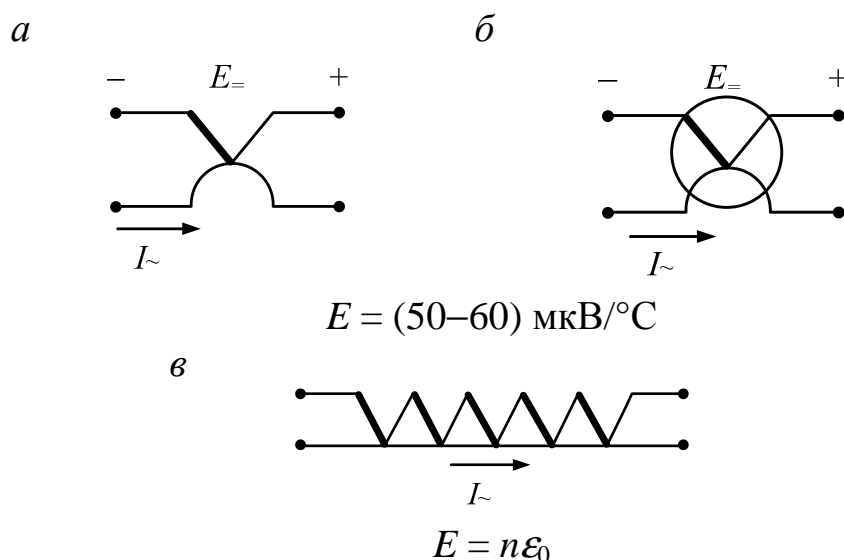


Рис. 4.43. Схемы включения термоэлектрических преобразователей тока:

a – контактный; *б* – бесконтактный (через теплопроводящий изолятор);
в – термобатарея

ТермоЭДС, развиваемая термопреобразователем, пропорциональна количеству теплоты, выделенной измеряемым током в месте присоединения спая. Количество теплоты, в свою очередь, пропорционально квадрату измеряемого тока:

$$E = k \cdot Q = k \cdot R \cdot I^2.$$

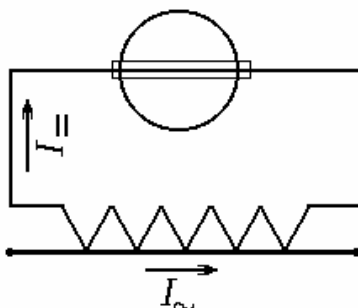


Рис. 4.44. Общая схема магнитоэлектрического прибора с термоэлектрическим преобразователем

Ток в цепи измерительного механизма может быть определен как $I = E/R$, где E – термоЭДС; R – полное сопротивление цепи прибора. Таким образом, показания термоэлектрического прибора будут пропорциональны квадрату действующего тока в нагревателе, т.е.

$$\alpha = kI^2,$$

где k – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции и типа термоэлектрического преобразователя и параметров измерительного механизма.

Теплота, выделяемая электрическим током в проводнике, в очень широких пределах не зависит от частоты, поэтому термоэлектрическими приборами можно пользоваться и на постоянном, и на переменном токе, включая токи высокой частоты.

Отклонение индикатора прибора пропорционально *действующему значению тока*.

Термоэлектрические преобразователи применяются, как правило, с магнитоэлектрическими механизмами и с предварительным электронным усилением сигнала на основе усилителей постоянного тока, подсоединяемых к выходу термоэлектрического преобразователя.

Характеристики термоэлектрических преобразователей

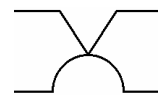
Достоинства:

1. Достаточно высокая точность (класс точности порядка 1,0) в широком диапазоне частот.
2. Независимость показаний от формы токов и напряжений.
3. Возможность измерения постоянных, переменных напряжений и токов (с нижними пределами измерения, например, от 75 мВ и 100 мкА соответственно).
4. Возможность измерения токов в области частот от 10 Гц до 100 МГц.

Недостатки:

1. Необходимость применения специальных экранированных высокочастотных трансформаторов тока для расширения пределов измерения.
2. Малая перегрузочная способность и ограниченный срок службы.
3. Значительное собственное потребление мощности.
4. Необходимость применения дополнительных электронных усилителей постоянного тока для повышения чувствительности.

Обозначение системы электромеханического прибора с термопреобразователем дополняется снизу следующим знаком:



Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «измерительные приборы».
2. Что такое абсолютная, относительная и приведенная погрешности?
3. Как называется начальная часть шкалы, в пределах которой поверка прибора не производится?
4. Как называется обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей?
5. Как обычно нормируется предел относительной погрешности, если абсолютная погрешность монотонно увеличивается от начала к концу диапазона?

6. Объясните способы нормирования основной погрешности средств измерений.
7. Перечислите основные характеристики средств измерений.
8. Что такое чувствительность прибора?
9. Почему магнитоэлектрический механизм работоспособен только на постоянном токе? Что предпринимается для использования его в приборах переменного тока?
10. Определите назначение и основные особенности гальванометров.
11. В каких целях используются логометры?
12. Почему шкала электромагнитных приборов нелинейная и каким образом ее можно уменьшить?
13. Что показывает основное уравнение прибора?
14. Назовите наиболее распространенный электроизмерительный прибор, который конструируется на основе электродинамического механизма.
15. В чем отличие ферродинамического механизма от электродинамического?
16. Почему электростатические приборы не могут измерять силу тока?
17. Объясните принцип действия приборов индукционной системы.
18. Назовите источники погрешностей счетчика индукционной системы.
19. В чем заключаются преимущества электронного счетчика энергии перед электромеханическим счетчиком индукционной системы?
20. Как называется устройство, определяющее текущий тариф? Какие дополнительные задачи в электросистемах оно способно выполнять?
21. Для каких целей применяют осциллографы?
22. Объясните устройство и принцип действия электронно-лучевой трубки.
23. Объясните принцип формирования изображения на экране электронно-лучевого осциллографа с помощью линейной развертки.
24. Объясните смысл максимального средневыпрямленного и среднеквадратического значений переменного тока.

25. Каким образом можно измерить частоту сигнала методом фигур Лиссажу?

26. Назовите функциональные возможности цифровых осциллографов, которые отличают их от электронно-лучевых.

27. Какие схемы преобразования сигнала применяются в приборах выпрямительной системы?

28. Назовите два преимущества приборов с термоэлектрическими преобразователями, которые значительно расширяют возможности их применения в цепях переменного тока по сравнению с другими электромеханическими приборами.

Глава 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Измерение тока

5.1.1. Расширение пределов измерений (применение шунтов)

Шунт (от англ. *shunt* – ответвление) представляет собой резистор, включаемый параллельно амперметру и предназначенный для уменьшения регистрируемой силы тока. Шунт является простейшим измерительным преобразователем тока в напряжение. Резистор обычно выполнен из пластины специальной электротехнической меди или манганина, на которой имеются две пары клемм: *силовые* (токовые) для подключения линейного тока и *измерительные* (потенциальные), к которым подключается измерительный прибор. При таком включении измерительного механизма устраняются погрешности от контактных сопротивлений.

На шунте указаны его характеристики. Например, если на шунте написано 10 А – 75 мВ, то это значит, что при прохождении через силовые клеммы тока силой 10 А на измерительных клеммах возникает напряжение 75 мВ (рис. 5.1).

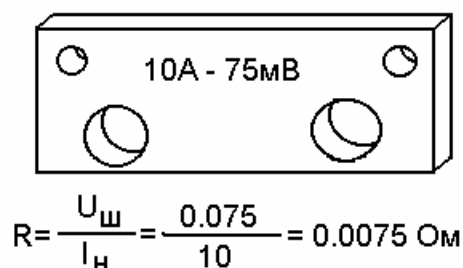


Рис. 5.1. Схема шунта полосковой конструкции

Выполним расчет шунта. На рис. 5.2 показана схема включения шунта (на схемах шунт изображается как резистор, но с дополнительными клеммами по углам резистора).

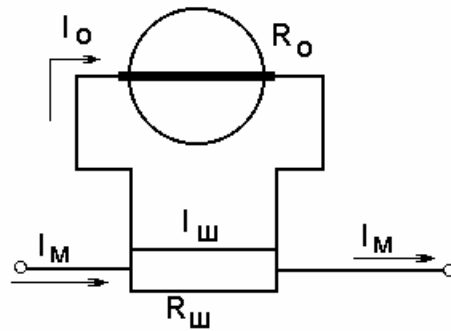


Рис. 5.2. Схема включения шунта:

I_0 – ток прибора; R_0 – сопротивление прибора; I_M – ток магистрали

$$I_{ш} \cdot R_{ш} = I_0 R_0 = (I_M - I_0) R_{ш}; I_0 R_0 = I_0 R_{ш} \left(\frac{I_M}{I_0} - 1 \right).$$

$$\frac{I_M}{I_0} = \frac{R_0}{R_{ш}} + 1 = n,$$

где $n = \frac{I_M}{I_0}$ – коэффициент шунтирования.

Если шунт рассчитан на небольшой ток (до 30 А), то его обычно встраивают в корпус прибора. Для измерения больших токов (от 30 до 5000 А) используют наружные шунты, которые не нагревают прибор. Наружные шунты выпускают калиброванными, т.е. они рассчитываются на определенные токи и падения напряжения. По ГОСТ 8042–78 калиброванные шунты должны иметь номинальное падение напряжения 10, 15, 30, 50, 60, 75, 100, 150 и 300 мВ. Шунты разделяются на классы точности 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5. Число, определяющее класс точности, обозначает допустимое отклонение сопротивления шунта в процентах от его номинального значения.

Для переносных магнитоэлектрических приборов, рассчитанных на токи до 30 А, внутренние шунты изготавливают на несколько пределов измерения. Многопредельный шунт состоит из нескольких резисторов, которые можно переключать в зависимости от предела измерения.

На практике для расширения пределов электромагнитных амперметров измерения используются также *измерительные трансформаторы тока* (рис. 5.3).

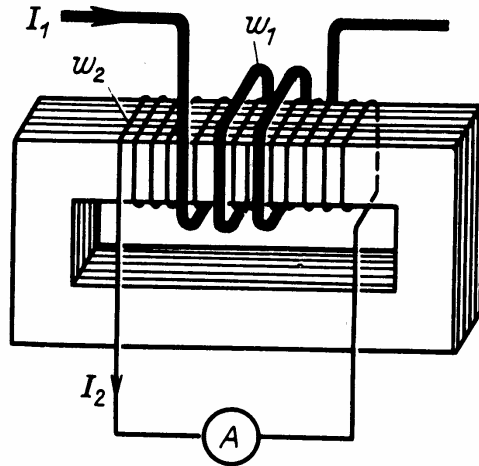


Рис. 5.3. Включение амперметра во вторичную обмотку трансформатора тока:

w_1, w_2 – первичная и вторичная обмотки; I_1 и I_2 – соответствующие токи

Измерительные трансформаторы тока преобразуют большие значения токов I_1 в малые I_2 . Коэффициент трансформации $K_I = I_1/I_2$ в основном определяется отношением числа витков во вторичной обмотке к их числу в первичной обмотке, т.е. $K_I \approx w_2/w_1$ (рис. 5.4).

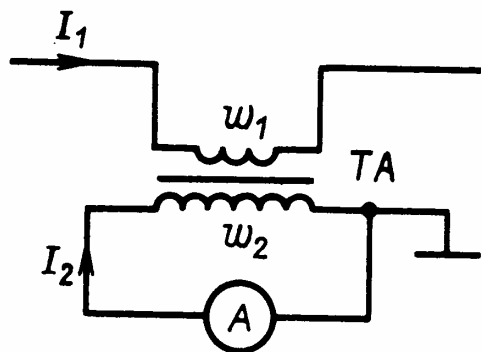


Рис. 5.4. Схема включения амперметра с трансформатором тока ТА

Чтобы получить значение измеряемого тока I_1 , следует измеренное амперметром значение тока I_2 умножить на коэффициент трансформации: $I_1 = K_I I_2$.

Классы точности трансформаторов тока переносных лабораторных: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; стационарных, устанавливаемых на подстанциях: 0,2; 0,5; 1,0; 3; 5; 10. Номинальные значения сопротивления нагрузки цепи вторичной обмотки лежат в пределах от 0,2 до 2,0 Ом. Возрастание сопротивления нагрузки ведет к увеличению погрешностей.

5.1.2. Компенсация изменения температуры при измерении тока

Основным источником погрешности измерений при изменении температуры является изменение сопротивления обмоток катушек приборов и токоподводов (до 4% на 10°C). Микро- и миллиамперметры без шунта не имеют температурной погрешности, так как при любом сопротивлении обмотки прибор измерит ток, который протекает по ней. В приборах, рассчитанных на большие токи, используются шунты. Амперметры с шунтом представляют собой милливольтметры, измеряющие падение напряжения на шунте. В амперметрах с шунтом температурная погрешность может оказаться значительной вследствие перераспределения токов между шунтом и подвижной катушкой. Для ее уменьшения применяют специальные цепи температурной компенсации. Снижение погрешности достигается за счет включения последовательно с подвижной катушкой прибора добавочного резистора R_1 из манганина, при этом уменьшается температурный коэффициент цепи рамки, но на рамку падает только часть напряжения, снимаемого с шунта. Следовательно, механизм получает лишь часть полезной мощности, отбираемой от шунта. Этот способ применяется для приборов класса точности не выше 1,0. Ток через прибор определяется величиной суммарного сопротивления: $R_0 + R_1$ (рис. 5.5).

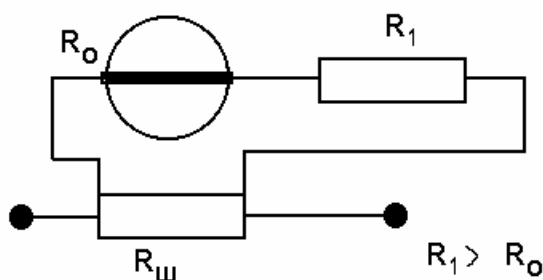


Рис. 5.5. Схема компенсации температурной погрешности путем включения последовательно дополнительного сопротивления

Для температурной компенсации вместо сопротивления R_1 (см. рис. 5.5) можно использовать полупроводниковые терморезисторы, имеющие отрицательный температурный коэффициент сопротивления. При значительных изменениях температуры применяется схема компенсации с терморезистором. Однако поскольку температурный коэффициент сопротивления сильно и нелинейно зависит от тем-

пературы, то для уменьшения этой зависимости его шунтируют резистором из манганина R_2 (рис. 5.6).

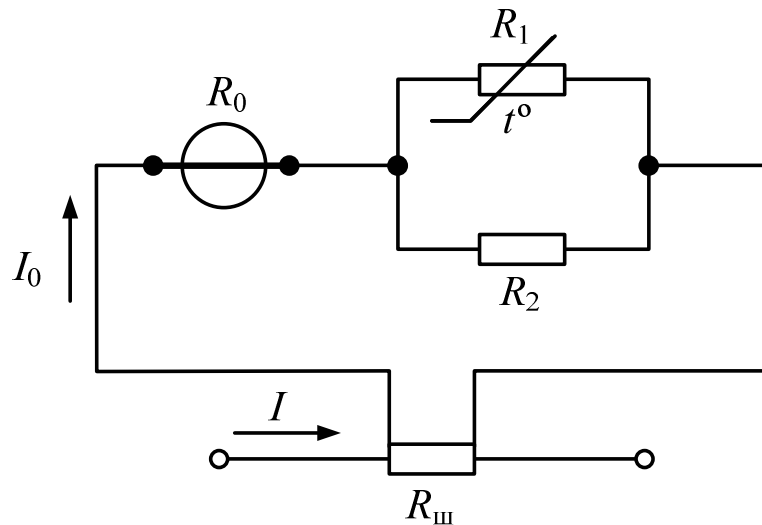


Рис. 5.6. Схема включения полупроводникового терморезистора с ОТКС при компенсации температурной погрешности

Терморезисторы применяются в приборах средних классов точности.

5.1.3. Особенности применения приборов электродинамической системы

Наиболее простая измерительная цепь у измерителя тока – миллиамперметра электродинамической системы (рис. 5.7, а). Весь измеряемый ток проходит через подвижную 2 и неподвижную 1 катушки, соединенные последовательно, поэтому $\psi = 0$ и уравнение прибора принимает вид

$$\alpha = \frac{1}{W} I^2 \frac{dM_{12}}{d\alpha},$$

где W – удельный противодействующий момент, постоянный для данного устройства; M_{12} – взаимная индуктивность катушек.

У амперметров, рассчитанных на токи от 0,5 А и выше, катушки соединяются параллельно (рис. 5.7, б) Сопротивления параллельных цепей подобраны так, чтобы ток I_2 не превышал допустимого значения, т.е. $I_1 = k_1 I$, $I_2 = k_2 I$ ($k_1 + k_2 = 1$), и уравнение, связывающее угол поворота указателя α и взаимную индуктивность катушек M_{12} , принимает вид

$$\alpha = \frac{1}{W} k_1 k_2 I^2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}.$$

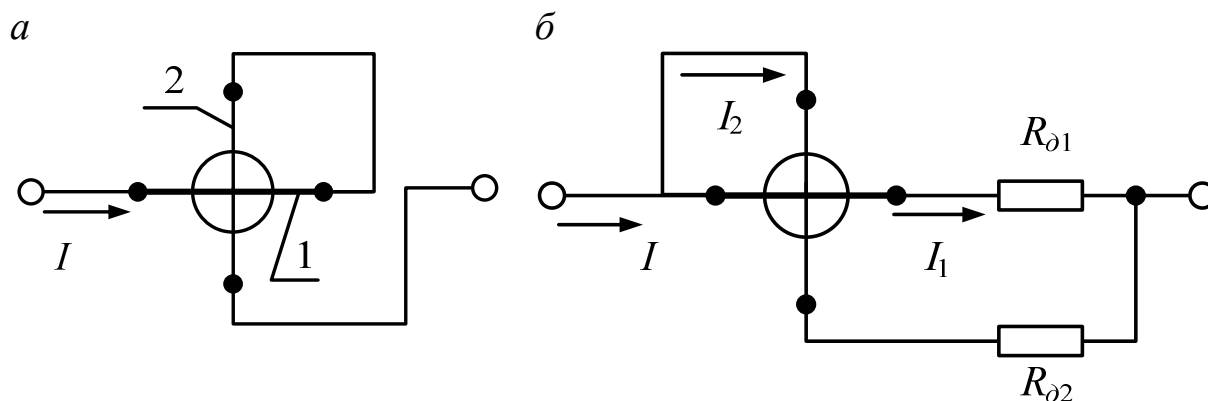


Рис. 5.7. Принципиальные схемы электродинамических амперметров: *а* – последовательная для миллиамперметров; *б* – параллельная для амперметров от 0,5 А и выше)

Следовательно, у механизмов амперметров угол отклонения подвижной части зависит от квадрата измеряемого тока I^2 и производной $dM_{12}/d\alpha$.

Для создания двухпредельного амперметра неподвижная катушка делается из двух одинаковых секций, переключая которые с последовательного соединения на параллельное получают пределы измерения с соотношением токов 1:2. Комбинируя величины $R_{\partial 1}$ и $R_{\partial 2}$, можно получить любой желаемый предел измерения.

5.2. Измерение напряжения

5.2.1. Расширение пределов измерений напряжения

Расширение пределов измерений вольтметров осуществляется путем подсоединения к вольтметру последовательно *дополнительного сопротивления* (иначе называемого добавочным или балластным).

Добавочные резисторы являются измерительными преобразователями напряжения в ток, а на значение тока непосредственно реагируют измерительные механизмы стрелочных вольтметров всех систем, за исключением электростатической и электронной. Добавочные резисторы служат для расширения пределов измерения по напряжению вольтметров различных систем и других приборов, имеющих параллельные цепи, подключаемые к источнику напряжения. Сюда относятся, например, ваттметры, счетчики энергии, фазометры и т.д.

Добавочный резистор включают последовательно с измерительным механизмом (рис. 5.8). Ток I_0 в цепи, состоящей из измерительного механизма с сопротивлением R_0 и добавочного резистора с сопротивлением $R_{доп}$, составит

$$I_0 = U_m / (R_0 + R_{доп}),$$

где U_m – измеряемое напряжение (магистральное).

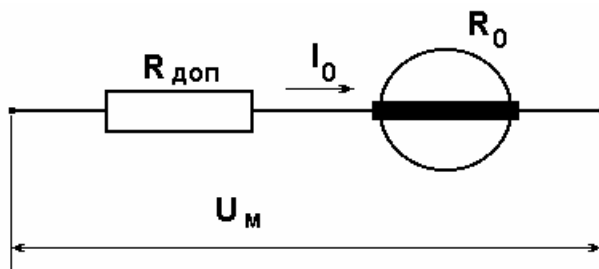


Рис. 5.8. Схема подключения дополнительного сопротивления к вольтметру

Расчет дополнительного сопротивления производится на основе закона Ома.

$$U_m = I_0(R_{доп} + R_0) = I_0 R_0 \left(\frac{R_{доп}}{R_0} + 1 \right).$$

$$U_0 = I_0 R_0.$$

$$\frac{U_m}{U_0} = \frac{R_{доп}}{R_0} + 1,$$

где U_0 – предельное значение показаний измерительного прибора (падение напряжения на рамке прибора).

Таким образом, если вольтметр имеет предел измерения U_0 , сопротивление измерительного механизма R_0 и при помощи добавочного резистора $R_{доп}$ надо расширить предел измерения в n раз, то, учитывая постоянство тока I_0 , протекающего через измерительный механизм вольтметра, можно записать

$$U_0 / R_0 = n U_0 / (R_0 + R_{доп}),$$

откуда

$$R_{доп} = R_0(n - 1).$$

Добавочные резисторы изготавливаются обычно из изолированной манганиновой проволоки, намотанной на изолированный каркас. При применении добавочных резисторов не только расширяются пределы измерения вольтметров, но и уменьшается их температурная погрешность.

Добавочные резисторы бывают внутренними и наружными. Последние выполняются в виде отдельных блоков и подразделяются на индивидуальные и калиброванные. *Индивидуальный* резистор применяется только с тем прибором, который с ним градуировался. *Калиброванный* резистор может применяться с любым прибором, номинальный ток которого равен номинальному току добавочного резистора. Калиброванные добавочные резисторы делятся на классы точности 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0. Они выполняются на номинальные токи от 0,5 до 30 мА. Добавочные резисторы применяются для преобразования напряжений до 30 кВ. Многопредельные вольтметры имеют несколько соединенных в секции резисторов (рис. 5.9).

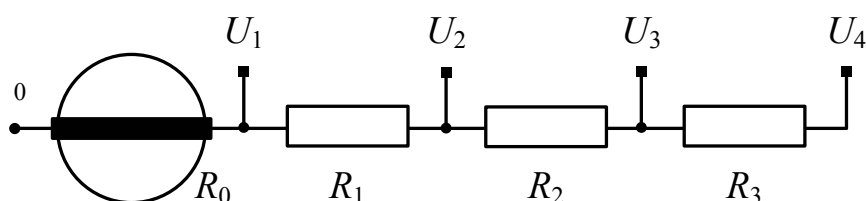


Рис. 5.9. Схема многопредельного вольтметра

Для расширения пределов измерения вольтметров электромагнитной, электродинамической и электростатической систем применяются *измерительные трансформаторы напряжения*. Они преобразуют высокое напряжение U_1 , подводимое к первичной обмотке, в низкое U_2 , снимаемое со вторичной. Коэффициент трансформации $K_U = U_1/U_2$ приблизительно равен отношению числа витков первичной обмотки ω_1 к числу витков вторичной обмотки, т.е. $K_U \approx \omega_1/\omega_2$ (рис. 5.10).

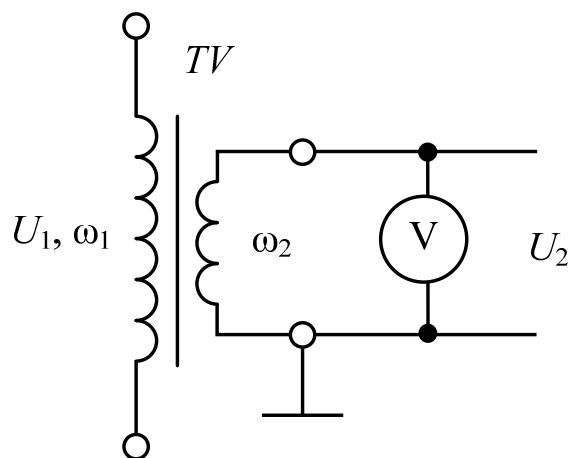


Рис. 5.10. Схема включения вольтметра с трансформатором напряжения TV

Значение измеряемого напряжения U_1 определяется по формуле $U_1 = K_U U_2$.

Классы точности лабораторных трансформаторов напряжения: 0,05; 0,1; 0,2; стационарных: 0,2; 0,5; 1,0; 3,0.

5.3. Измерение сопротивлений

5.3.1. Токовый метод (последовательный)

Наиболее простыми в реализации являются последовательный и параллельный методы измерения сопротивлений.

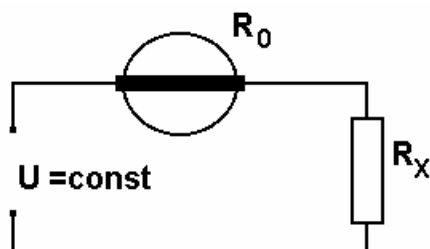


Рис. 5.11. Схема измерения величины сопротивления токовым методом

Обязательным условием измерения является постоянство напряжения источника питания.

$$R_{\text{общ}} = U / I_A = R_x + R_0.$$

При использовании токового метода следует учитывать, что:

- 1) результат измерения отличается от истинного на величину R_0 ;
- 2) погрешность определяется по формуле

$$\delta = (R_0 / R_x) 100\%.$$

Относительная погрешность тем меньше, чем больше измеряемое сопротивление, поэтому данный метод применяется для измерения сопротивлений относительно большой величины.

5.3.2. Метод напряжения (параллельный)

При использовании этого метода измеряемое сопротивление подключается параллельно измерительному механизму (рис. 5.12).

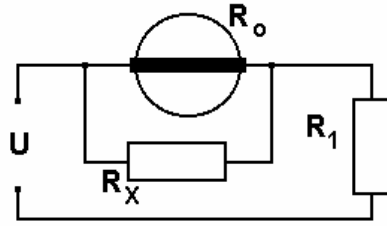


Рис. 5.12. Схема измерения величины сопротивления параллельным методом

Для получения выражения для тока, протекающего через прибор проведем следующие вычисления

$$\begin{aligned}
 U_0 &= U_x; \\
 R_x I_x &= R_0 I_0; \\
 I_1 &= I_x + I_0; \\
 I_1 &= \frac{U}{\frac{R_0 R_x}{R_0 + R_x} + R_1}; \\
 I_x &= I_0 \frac{R_0}{R_x}; \quad I_1 = I_0 \left(\frac{R_0}{R_x} + 1 \right); \\
 I_0 &= U \frac{R_x}{R_0 R_x + R_1 (R_0 + R_x)} = U \frac{1}{(R_0 + R_1) + \frac{R_1 R_0}{R_x}}.
 \end{aligned}$$

Сравнивая токовый метод и метод напряжения, можно сделать следующие выводы:

1. В параллельном методе выражение для погрешности представляет собой сложную функцию.
2. Шкалы приборов, используемые в токовом методе и методе напряжения, исключительно нелинейные.
3. При применении обоих методов предъявляются высокие требования к стабильности источника напряжения.
4. Омметры с последовательным включением, как правило, используются для измерения больших сопротивлений, а с параллельным включением – малых.

5.3.3. Омметр с линейной шкалой

Для достижения линейности шкалы используются более сложные схемы включения измеряемого сопротивления. В этом случае

прибор построен на основе электродинамического механизма (рис. 5.13).

Зависимость угла поворота стрелки представляет собой отношение токов двух подвижных катушек и рассчитывается следующим образом

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_0};$$

$$I_2 = \frac{U}{R_x + R_2 + R_0};$$

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = k \frac{R_x + R_2 + R_0}{R_1 + R_0}.$$

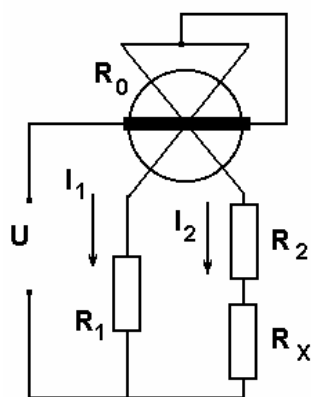


Рис. 5.13. Схема измерения величины электрического сопротивления на основе электродинамического механизма

Шкала прибора линейная.

Классическая схема омметра на основе магнитоэлектрического логометра изображена на рис. 5.14.

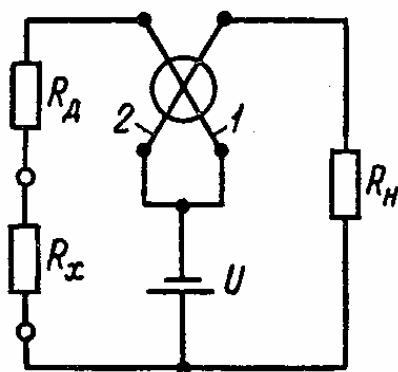


Рис. 5.14. Омметр на основе магнитоэлектрического логометра:
1 и 2 – катушки логометра, обладающие сопротивлениями R_1 и R_2

Для указанной схемы $\alpha = F [(R_2 + R_0 + R_x)/(R_1 + R_n)]$, т.е. угол отклонения определяется значением R_x и не зависит от напряжения питания. В подобных схемах измеряемое сопротивление может быть включено последовательно относительно рамки измерительного механизма при измерении средних и больших сопротивлений и параллельно – при измерении малых сопротивлений.

5.4. Специальные измерения

5.4.1. Измерение фазы

К основным параметрам электрических колебаний, определяющим состояние колебательного процесса в любой заданный момент времени, относится фаза (рис. 5.15).

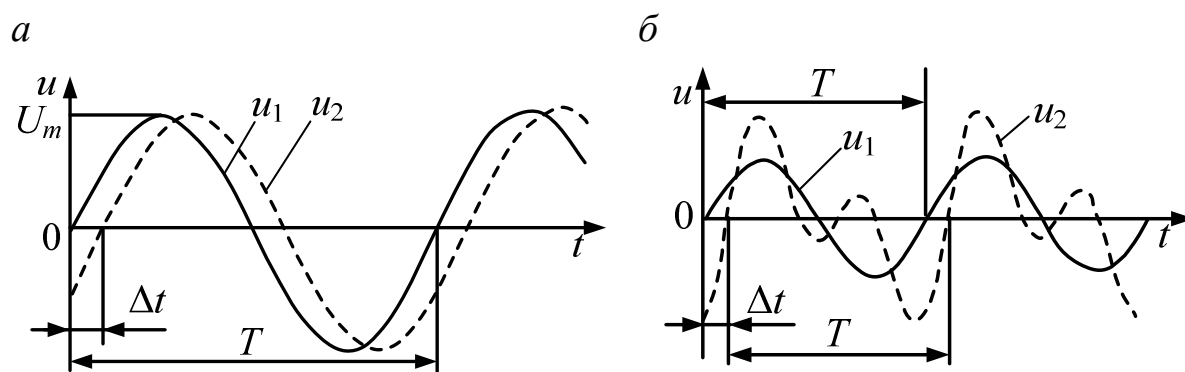


Рис. 5.15. Графики двух сигналов с одинаковыми периодами:
 а – синусоидальных; б – синусоидального и несинусоидального

Наряду с фазой одного колебания представляет интерес соотношение фаз двух колебаний. Необходимость в измерениях этих параметров возникает при исследовании усилителей, фильтров линейных цепей, градуировке фазовращателей, снятии фазочастотных характеристик различных радиотехнических устройств. Так как фаза и время связаны линейной зависимостью, то фазовый сдвиг используют для количественной оценки времени запаздывания прохождения сигнала через электрическую цепь.

На практике обычно решают задачу измерения разности фаз двух гармонических (синусоидальных) колебаний с равными частото-

тами. При этом фазовый сдвиг удобно представить в виде зависимости *от сдвига сигналов во времени Δt* , соответствующего их идентичным фазам. Так, например, для гармонических сигналов $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и $u_2(t) = U_m \sin \omega(t - \Delta t)$, имеющих одинаковый период $T = \frac{2\pi}{\omega}$, фазовый сдвиг в радианах (см. рис. 5.15, а) составляет

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = \frac{2\pi\Delta t}{T}.$$

Измерив временные отрезки Δt и T (см. рис. 5.15), вычисляют фазовый сдвиг сигналов в радианах по указанной выше формуле или в градусах по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ\Delta t}{T}.$$

Два сигнала называются *синфазными*, *противофазными* и *находящимися в квадратуре*, если фазовый сдвиг между ними равен 0 , π и $\pi/2$ соответственно. Применительно к периодическим синусоидальному и несинусоидальному сигналам (см. рис. 5.15, б) и к двум несинусоидальным сигналам с одинаковым периодом T используется понятие их *сдвига* (задержки) во времени Δt .

Для измерения фазового сдвига используют приборы, называемые фазометрами, а в качестве мер сдвига – *фазовращатели*, т. е. линейные четырехполюсники, у которых выходной сигнал задержан по фазе относительно входного. Существуют регулируемые и нерегулируемые фазовращатели.

К методам измерения фазового сдвига относятся: осциллографические, компенсационный, преобразования фазового сдвига во временной интервал, цифровой (дискретного счета), по геометрической сумме и разности напряжений, с преобразованием частоты.

В исследовательской и производственной практике часто встречаются следующие задачи: измерение фазового сдвига между напряжением и током нагрузки на промышленной частоте; между двумя гармоническими напряжениями (например, между входным и выходным напряжениями четырехполюсника, усилителя) в зависимости от частоты; между двумя периодическими напряжениями одинаковой частоты любой формы. Методы измерения и принципы построения приборов зависят от диапазона частот сигнала и его формы, мощности источников сигналов, требуемой точности измерения.

Электродинамические и ферродинамические логометры используются для построения фазометров (показывающих и самопишущих) и предназначены для измерения фазового сдвига между напряжением и током в нагрузке и коэффициента мощности. Электрическая схема прибора и соответствующая векторная диаграмма показаны на рис. 5.16.

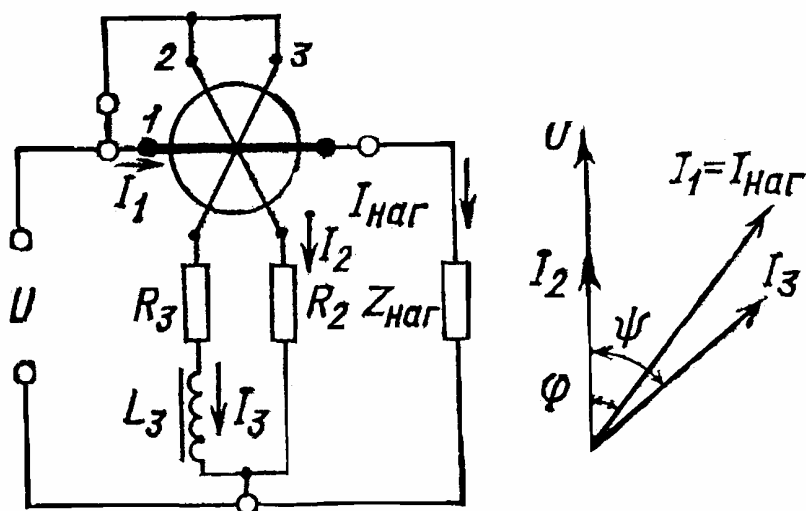


Рис. 5.16. Схема электродинамического фазометра

Подвижная часть механизма представляет собой жестко скрепленные между собой под углом 60° рамки и крепится на осях и опорах. Механический противодействующий момент в механизме отсутствует.

Взаимодействие тока I_1 ($I_1 = I_{наг}$), протекающего по неподвижной катушке прибора 1, с током I_2 , протекающим по обмотке рамки 2, угол между плоскостью которой и плоскостью неподвижной катушки равен 150° при $\alpha = 0$, создает вращающий момент

$$M_1 = c_1 I_1 I_2 \cos(I_1 \wedge I_2) \sin(150^\circ - \alpha).$$

Взаимодействие тока I_1 с током I_3 создает вращающий момент M_2 , который действует навстречу моменту M_1 :

$$M_2 = c_2 I_1 I_3 \cos(I_1 \wedge I_3) \sin(150^\circ - 60^\circ - \alpha).$$

Из векторной диаграммы следует, что $\cos(I_1 \wedge I_2) = \cos \varphi$.

Фазовый сдвиг между U (или I_2) и током I_3 выполняется равным $\psi = 60^\circ$ за счет включения в цепь обмотки рамки 3 катушки индуктивности L_3 и резистора R_3 . Следовательно, $\cos(I_1 \wedge I_3) = \cos(60^\circ - \varphi)$.

В установившемся режиме подвижная часть прибора займет положение, при котором $M_1 = M_2$, поэтому

$$c_1 I_1 I_2 \cos \varphi (I_1 \wedge I_2) \cos (60^\circ - \alpha) = c_2 I_1 I_3 \cos (60^\circ - \varphi) \cos \alpha.$$

Если выполняется условие $c_1 I_2 = c_2 I_3$, то последнее равенство будет выполняться при $\alpha = \varphi$. Таким образом, угол поворота подвижной части равен фазовому сдвигу между напряжением и током в нагрузке.

Прибор имеет линейную шкалу. Его показания практически не зависят от нестабильности напряжения на нагрузке (в пределах 10–20%). Недостатками таких фазометров являются сравнительно большая потребляемая мощность от источника сигнала (5–10 В·А) и зависимость показаний от частоты.

Шкала рассмотренного фазометра может быть проградуирована также в значениях коэффициента мощности, т.е. в значениях $\cos \varphi$. На основе электродинамических механизмов возможно построение фазометра для измерения $\cos \varphi$ и в трехфазных цепях переменного тока. По принципу действия он подобен однофазному фазометру, но необходимые фазовые сдвиги между токами в обмотках рамок подвижной части прибора можно получить более просто, используя 120-градусные сдвиги между напряжением и токами трехфазной цепи.

Рассмотренные электромеханические фазометры работают в узкой полосе частот, и их показания зависят от близости формы сигнала к синусоидальной, точность их невелика. Такие недостатки преодолеваются с помощью метода дискретного счета (более точно – *цифрового метода измерения фазового сдвига*), используемого в цифровых фазометрах (см. гл. 7). Он включает две операции:

- преобразование фазового сдвига в интервал времени;
- измерение интервала времени методом дискретного счета.

Рассмотрим реализацию метода дискретного счета в простейшем цифровом фазометре (рис. 5.17, а), структурная схема которого содержит преобразователь искомого фазового сдвига $\Delta\varphi$ в интервал времени Δt ($\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$), временной селектор (ВС), формирователь счетных импульсов (f/nf), счетчик (СЧ) и цифровое отсчетное устройство (ЦОУ).

Временной селектор представляет собой ключевую логическую схему. Формирователь счетных импульсов построен на базе умножителя частоты входного сигнала и схемы формирования выходных импульсов.

Цифровой фазометр работает следующим образом. Преобразователь $\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$ из подаваемых на его входы синусоидальных сигналов u_1 и u_2 с фазовым сдвигом $\Delta\varphi$ формирует последовательность прямоугольных импульсов u_3 (рис. 5.17, б), имеющих длительность Δt и период повторения T , равные соответственно сдвигу во времени и периоду сигналов u_1 и u_2 . Импульсы u_3 , а также счетные импульсы u_4 , вырабатываемые формирователем счетных импульсов, подаются на входы временного селектора.

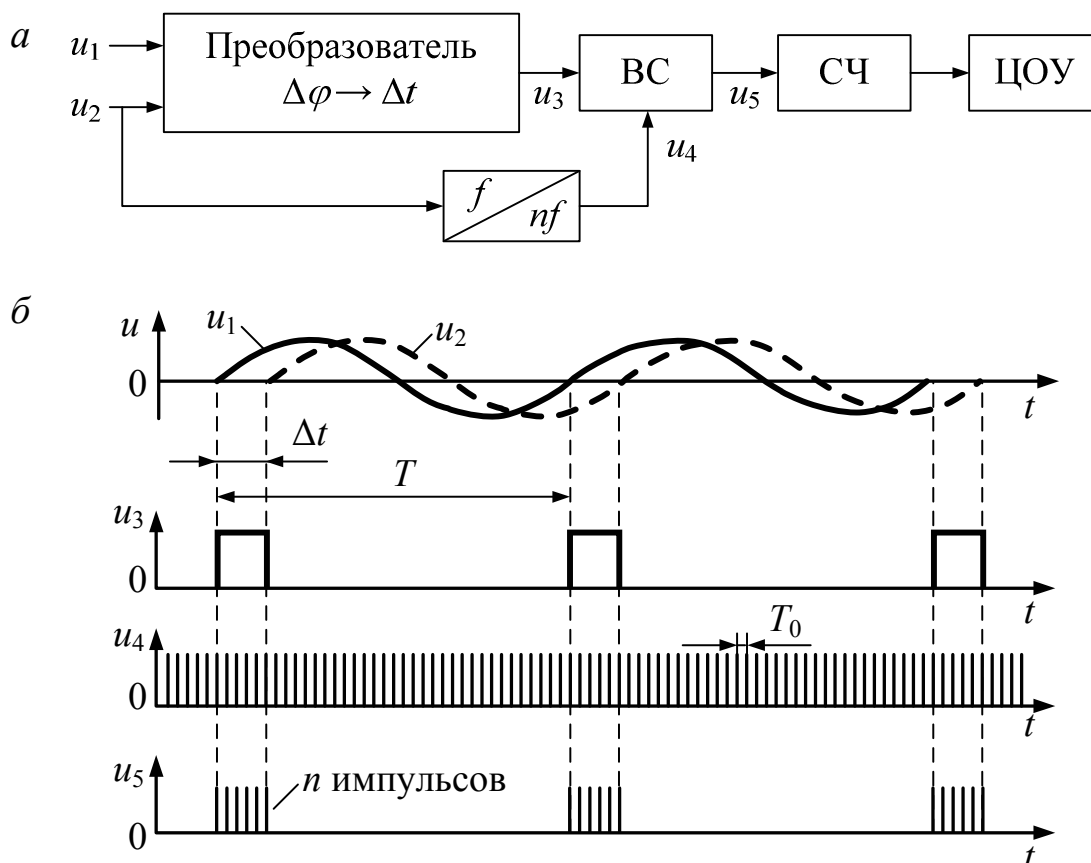


Рис. 5.17. Цифровой метод измерения фазового сдвига:
а – структурная схема; б – временные диаграммы

Селектор открывается на время, равное длительности Δt импульсов u_3 , и в течение этого интервала пропускает на вход счетчика импульсы u_4 . На выходе селектора регулируются пакеты импульсов u_5 , следующие с периодом T . Измерение проводится за один период T сигналов u_1 и u_2 (схема управления, обеспечивающая такой режим измерения, на рис. 5.17 не приведена). При этом на счетчик с выхода селектора поступает количество импульсов, содержащееся в одном пакете и равное

$$n = \Delta t / T_0,$$

где $T_0 = T / (36 \cdot 10^m)$ – период следования счетных импульсов формирователя f / nf , $m = (1, 2, 3 \dots)$.

Выражение для измеряемого фазового сдвига сигналов u_1 и u_2 можно записать в виде

$$\Delta\varphi = \frac{n}{10^{m-1}}.$$

Из приведенного выражения следует, что фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ пропорционален числу счетных импульсов n , поступивших на счетчик. Кодовый сигнал со счетчика, пропорциональный фазовому сдвигу $\Delta\varphi$, подается на ЦОУ, показания которого выдаются в градусах при $m = 1$ с учетом десятых долей градуса при $m = 2$ и т.д.

Погрешность данного цифрового фазометра определяется погрешностями дискретности и аппаратуры. Погрешность дискретности связана с тем, что интервал времени можно измерить с точностью до одного периода счетных импульсов. Аппаратурная погрешность определяется отклонением длительности от Δt , нестабильностью преобразователя $\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$ и пр.

5.4.2. Измерение частоты

Основными измерительными приборами и средствами частотно-временных измерений являются:

- осциллографы;
- приемники сигналов эталонных частот и компараторы;
- преобразователи частоты сигналов;
- частотомеры резонансные;
- частотомеры на основе метода заряда-разряда конденсатора;
- частотомеры цифровые;
- цифровые измерители частоты и интервалов времени.

Измерение частоты в электро- и радиотехнике производится в диапазоне от 0 до 10^{11} Гц. На низких частотах (от 20 до 2500 Гц, но особенно в окрестности 50 и 400 Гц) используются электромеханические приборы: резонансные электромагнитные частотомеры и частотомеры на основе электромагнитных и электродинамических (ферродинамических) логометров. Их схемы приведены на рис. 5.18. Принцип работы логометрических частотомеров основан на зависимости разности вращающих моментов, воздействующих на скрепленные между собой подвижные катушки 1 и 2 с токами I_1 и I_2 , как от частоты

ты, так и от положения катушек. Сопротивление, емкость и индуктивность в цепи прибора подбирают таким образом, что частота резонанса напряжений близка к средней частоте диапазона измерения f_{cp} .

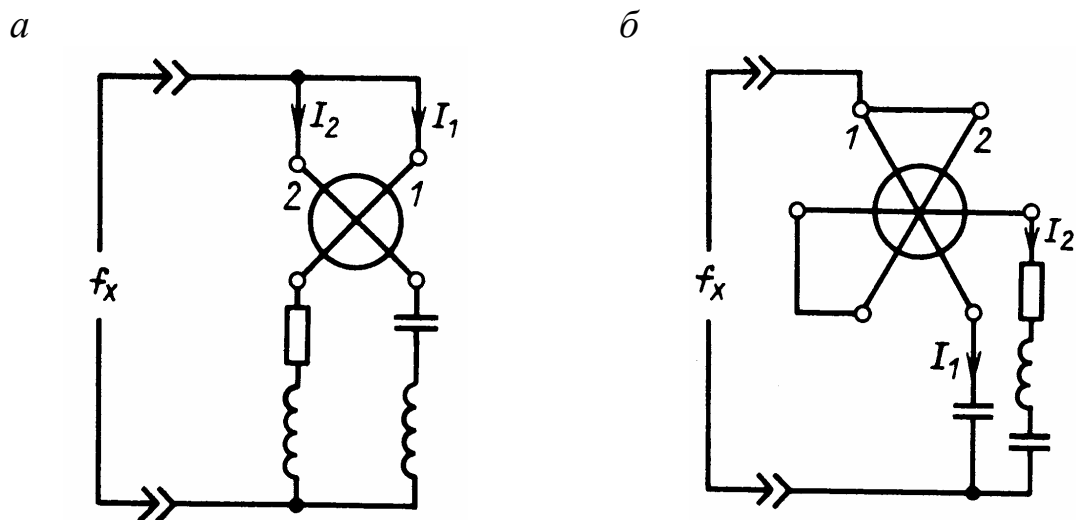


Рис. 5.18. Частотомеры на основе электромагнитного (а) и электродинамического (б) логометров

При средней частоте диапазона f_{cp} токи в рамках равны, а следовательно, вращающие моменты, действующие на подвижную систему логометра, также равны между собой, и стрелка прибора занимает среднее положение. При отклонении частоты от средней величины меняется соотношение токов в подвижных катушках, и прибор будет показывать изменение частоты в ту или иную сторону. Такие частотомеры просты по устройству и позволяют настраивать резонансный контур на различные частоты. Основная погрешность электромеханических аналоговых частотомеров составляет 1,0–2,5%. Они имеют узкие диапазоны измерения и используются в качестве щитовых приборов.

В лабораторных условиях нередко для измерения частоты используют осциллографы. Это оправданно, если к точности измерения не предъявляется жестких требований. Получение фигур Лиссажу, использование круговой развертки с модуляцией яркости, определение частоты исходя из измеренного значения периода напряжения – наиболее распространенные способы осциллографических измерений частоты.

Цифровой (дискретного счета) метод измерения частоты реализован в цифровых частотомерах. Принцип действия цифрового частото-

томера основан на измерении частоты в соответствии с ее определением, т.е. на счете числа импульсов за интервал времени. Данные приборы удобны в эксплуатации, имеют широкий диапазон измеряемых частот (от нескольких герц до сотен мегагерц) и позволяют получить результат измерения с высокой точностью (относительная погрешность измерения частоты $10^{-6} \dots 10^{-9}$).

Поскольку цифровые частотомеры являются многофункциональными измерительными приборами, то в зависимости от режима их работы можно проводить измерение не только частоты и отношения двух частот, но и интервалов времени (периода следования периодических сигналов и интервала, заданного временным положением двух импульсов).

Принцип измерения частоты гармонического сигнала цифровым методом поясняет рис. 5.19, где приведены структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения частоты и временные диаграммы его работы.

Исследуемый гармонический сигнал частоты f_x подается на входное устройство (ВУ), усиливающее или ослабляющее его до значения, требуемого для работы последующего устройства частотомера (см. рис. 5.19, а). Снимаемый с выхода ВУ гармонический сигнал u_1 (см. рис. 5.19, б) поступает на формирователь пульсов (ФИ), преобразующий его в последовательность коротких однополярных импульсов u_2 , следующих с периодом $T_x = 1/f_x$ и называемых *счетными*. Причем передние фронты этих импульсов практически совпадают с моментами перехода сигнала u_1 через нулевое значение на оси времени при его возрастании. Схемотехнически формирователь ФИ состоит из усилителя-ограничителя и компаратора (триггера Шмитта).

Счетные импульсы u_2 поступают на один из входов временного селектора (ВС), на второй вход которого от устройства формирования и управления (УФУ) подается *строб-импульс* u_3 *прямоугольной формы и калиброванной длительности* $T_0 > T_x$. Интервал времени T_0 называют *временем счета*.

Временной селектор открывается строб-импульсом u_3 и в течение его длительности пропускает группу (пакет) из N_x импульсов u_2 на вход счетчика (СЧ). В результате с временного селектора на счетчик поступает пакет из N_x импульсов u_4 .

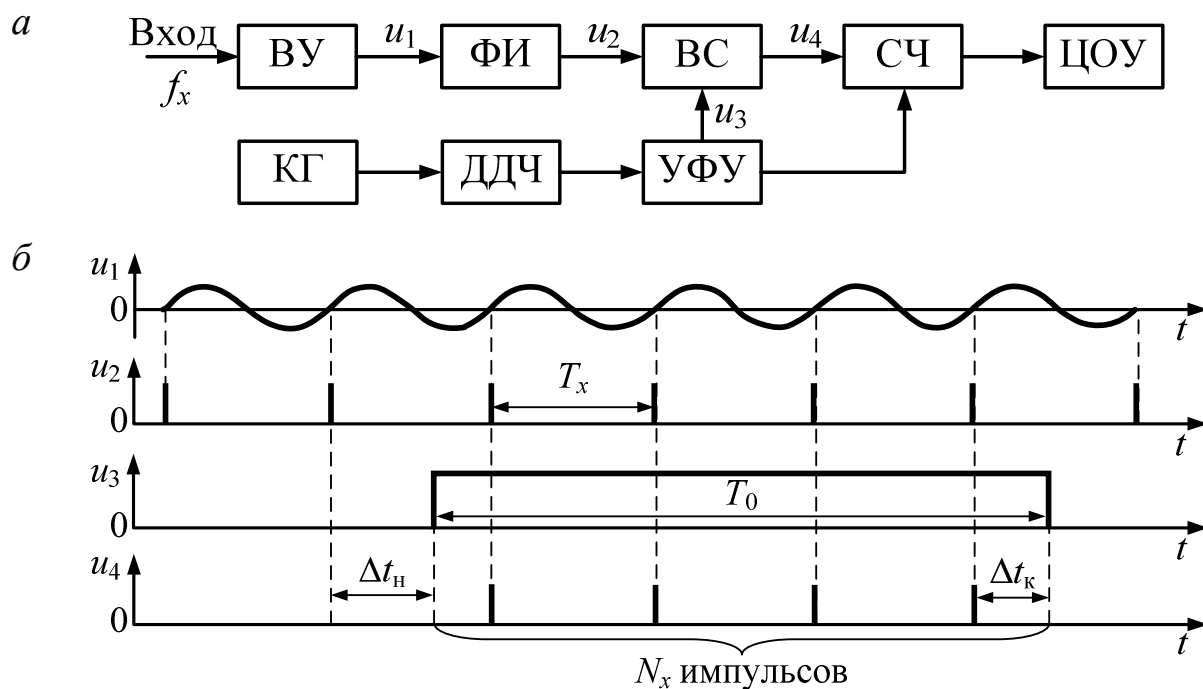


Рис. 5.19. Цифровой частотомер:
a – структурная схема; *б* – временные диаграммы

Первый счетный импульс, попавший во временные ворота T_0 строб-импульса (см. рис. 5.19, *б*), опережает его передний фронт на время Δt_n , а срез ворот и последний счетный импульс, появившийся до среза, разделяет интервал Δt_k . Из рис. 5.19, *б* следует, что

$$T_0 = N_x T_x - \Delta t_n + \Delta t_k = N_x T_x - \Delta t_\delta,$$

где Δt_n и Δt_k – абсолютные погрешности дискретизации начала и конца интервала T_0 , вызванные случайным положением строб-импульса относительно счетных импульсов u_2 ; $\Delta t_\delta = \Delta t_n - \Delta t_k$ – общая абсолютная погрешность дискретизации.

Пренебрегая в вычислениях погрешностью Δt_δ , получаем, что число импульсов в пакете $N_x = T_0 / T_x = T f_x$ и, следовательно, измеряемая частота пропорциональна числу счетных импульсов, поступающих на счетчик:

$$f_x = N_x / T_0.$$

Для формирования строб-импульса на УФУ поступают короткие импульсы с периодом T_0 (на рисунке для упрощения не показаны) от схемы, включающей кварцевый генератор (КГ) образцовой частоты $f_{кв}$ и декадный делитель частоты (ДДЧ) следования импульсов с коэффициентом деления K_δ (каждая декада уменьшает частоту $f_{кв}$ в десять раз). Период импульсов на выходе декадного делителя частоты и дли-

тельность строб-импульса равны периоду сигнала на выходе делителя частоты, т.е. $T_0 = K_\partial / f_{кв}$. Таким образом, $f_x = N_x f_{кв} / K_\partial$. Отношение $f_{кв} / K_\partial$ можно дискретно изменять вариацией K_∂ , т.е. за счет изменения числа декад декадного делителя частоты. Счетчик подсчитывает число импульсов N_x и выдает соответствующий код в цифровое отсчетное устройство (ЦОУ). Отношение $f_{кв} / K_\partial$ выбирается равным 10^n Гц, где n – целое число. При этом ЦОУ отображает число N_x , соответствующее измеряемой частоте f_x в выбранных единицах. Например, если за счет изменения K_∂ выбран коэффициент $n = 6$, то число N_x , отображаемое на ЦОУ, соответствует частоте f_x , выраженной в мегагерцах. Перед началом измерений УФУ сбрасывает показания счетчика в нуль.

Диапазон измеряемых частот цифровых частотомеров ограничен снизу погрешностью дискретизации, а сверху – конечным быстродействием используемых счетчиков и делителей частоты. Верхний предел измерения частоты достигает 500 МГц, и его расширяют способом гетеродинного преобразования (переноса) измеряемой частоты в область более низких частот. *Гетеродинирование* – это процесс нелинейного взаимодействия двух напряжений, в результате которого кроме исходных частот ω_1 и ω_2 возникают комбинационные частоты $|n\omega_1 \pm m\omega_2|$, где n и m – целые числа.

В современных цифровых частотомерах широко применяются кварцевые синтезаторы частот, создающие сигналы с дискретной сеткой частот. Цифровые частотомеры с программно-управляемыми синтезаторами частот и микропроцессорами являются перспективными измерительными приборами благодаря высокой точности, широкому диапазону измеряемых частот, надежности и удобству включения в автоматизированные измерительные системы.

5.5. Измерение мощности

К измерению мощности в практической электротехнике и радиотехнике прибегают во всем частотном диапазоне – от постоянного тока до миллиметровых и более коротких волн. Измерять уровни мощности приходится в очень широких пределах (например, мощность постоянного и однофазного переменного тока измеряют в диапазоне от 10^{-18} до 10^{10} Вт). В настоящее время необходимо измерять мощность и энергию постоянного тока, активную мощность и энер-

гию однофазного и трехфазного переменного тока, реактивную мощность и энергию трехфазного переменного тока, мгновенное значение мощности, а также количество электричества в очень широких пределах.

Требуемая точность измерения мощности постоянного и переменного тока различна для разных частотных диапазонов. Для постоянного и переменного однофазного и трехфазного тока промышленной частоты погрешность должна находиться в пределах $\pm(0,01-0,1)\%$; при сверхвысоких частотах погрешность может быть выше $\pm(1-5)\%$.

Измерение реактивной мощности имеет практическое значение лишь у крупных потребителей электроэнергии, которые всегда питаются трехфазным переменным током. Нижний предел измерения реактивной мощности трехфазного переменного тока находится на уровне нескольких вар, а верхний предел примерно 10^6 вар. Погрешность измерения реактивной мощности должна находиться в пределах $\pm(0,1-0,5)\%$.

Измерение реактивной энергии необходимо только для промышленных трехфазных цепей. Поэтому нижний предел диапазона измерения тока в этом случае находится на уровне 1 А, а напряжения – 100 В. Верхний предел диапазона измерения тока при непосредственном измерении энергии равен 50 А, напряжения – 380 В. Допускаемая погрешность измерения реактивной энергии должна находиться на уровне $\pm(1-2,5)\%$.

Для измерения мощности в цепях постоянного и переменного однофазного тока применяют электродинамические и ферродинамические ваттметры. Для точных измерений мощности постоянного и переменного тока на промышленной и повышенной частоте (до 5000 Гц) выпускают электродинамические ваттметры в виде переносных приборов классов точности 0,1–0,5.

Для измерений мощности в производственных условиях в цепях переменного тока промышленной или более высоких фиксированных частот (400, 500 Гц) используют щитовые ферродинамические ваттметры классов точности 1,5–2,5.

Для измерений мощности на высоких частотах применяют термоэлектрические и электронные ваттметры.

В последние годы при измерениях наряду с абсолютными (ватт, милливатт и т.д.) широко используют относительные (логарифмиче-

ские) единицы мощности – децибелы. Относительные единицы измерения имеют ряд существенных преимуществ и применяются для оценки мощности источников сигналов, степени их усиления или ослабления, чувствительности приемных устройств, погрешности измерений и др.

*Децибел*¹ – способ представления соотношения двух одноименных параметров (уровней сигнала) в виде логарифма их отношения (например, отношение уровней сигнала на выходе и на входе усилителя $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$). Децибел – безразмерная величина, как и коэффициент усиления.

Пример. $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = 6 \text{ В} / 0,5 \text{ В} = 12$.

Чтобы анализировать схемы (например, многокаскадный усилитель) с помощью простого сложения и вычитания вместо умножения и деления, полезно использовать отношение величин. Прологарифмируем это отношение по основанию 10, а затем умножим на некоторый масштабный коэффициент (обычно 10 для тока или напряжения и 20 – для мощности).

Для приведенного выше примера с усилением напряжения имеем

$$\begin{aligned} \text{дБ} &= 20 \lg (U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}); \\ \text{дБ} &= 20 \lg (U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}) = 20 \lg (6/0,5) = 20 \lg 12 = 21,6. \end{aligned}$$

Из приведенного выражения легко видеть, что в случае усиления сигнала величина будет иметь положительный знак, в случае ослабления сигнала – отрицательный. Это представление весьма наглядно. Преимущество представления в децибелах состоит в том, что коэффициенты усиления и ослабления системы можно складывать и вычитать, а не умножать и делить.

Как физическая величина электрическая мощность определяется работой, совершенной источником электромагнитного поля в единицу времени. Размерность электрической мощности записывается следующим образом: джоуль/с = ватт.

Измерение мощности в различных частотных диапазонах имеет определенные особенности. Измерители электрической мощности промышленной частоты наряду со счетчиками энергии являются ос-

¹ Децибел – одна десятая часть единицы, называемой белом (по имени Александра Грехема Белла – изобретателя телефона), которая оказалась слишком большой для выражения обычно используемых величин.

новой действующей системы учета потребления электрической энергии в народном хозяйстве. Измерение мощности на постоянном токе, а также в диапазоне звуковых и высоких частот имеет ограниченное значение, поскольку на частотах до нескольких десятков мегагерц часто удобнее измерять напряжения, токи и фазовые сдвиги, а мощность определять расчетным путем. На частотах свыше 300 МГц вследствие волнового характера процессов значения напряжения и токов теряют однозначность и результаты измерений начинают зависеть от места подключения прибора. Вместе с тем поток мощности через любое поперечное сечение линии передачи всегда остается неизменным.

Активная мощность (поглощаемая электрической цепью) однофазного переменного тока определяется как

$$P = UI \cos \varphi,$$

где U , I – средние квадратические значения напряжения и тока; φ – сдвиг фазы между мгновенными значениями напряжения и тока.

Если нагрузка R_n в электрической цепи чисто активная ($\varphi = 0$), то мощность переменного тока

$$P = UI = I^2 R_n = U^2 / R_n.$$

Для сигнала произвольной формы, имеющего периодическую структуру, электрическую мощность можно оценить с помощью ряда Фурье:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n,$$

где U_0 , I_0 – постоянные составляющие; U_n , I_n – средние квадратические значения гармоник напряжения и тока; φ_n – фазовый сдвиг между гармониками напряжения U_n и тока I_n .

Электрическую мощность переменного тока можно измерять непосредственно с помощью специальных приборов – *ваттметров* – или косвенно путем измерения величин, входящих в приведенные соотношения. Принцип действия ваттметров основан на реализации операции умножения. Применяют устройства прямого и косвенного перемножения. Примерами устройств прямого перемножения являются измерительные механизмы ваттметров электродинамической системы. Прямое перемножение напряжения и тока можно обеспечить с помощью преобразователей Холла или специальных схем на полевых транзисторах и т.д. В устройствах косвенного перемножения произведение величин находят в результате использования таких математических операций, как сложение (вычитание), возведение в сте-

пень, логарифмирование, интегрирование и пр. Для этих целей служат аналоговые интегральные перемножители. Современные ваттметры на частоты 1...10 МГц строятся на основе интегральных перемножителей с использованием термопреобразователей.

5.5.1. Измерение мощности однофазной цепи

Из выражения $P=UI$ нетрудно видеть, что мощность может быть определена косвенно путем проведения двух прямых измерений: напряжения на нагрузке U с помощью вольтметра и тока в нагрузке I с помощью амперметра. Несмотря на кажущуюся простоту и доступность, метод амперметра и вольтметра для измерения мощности на практике применяется крайне редко. Наиболее просто и с необходимой точностью измерение мощности производится с помощью одного одноэлементного электродинамического ваттметра. Включение такого ваттметра в цепь постоянного тока должно осуществляться с соблюдением правильности соединения генераторных зажимов обмотки цепи тока и напряжения. При измерении мощности в цепях постоянного тока генераторный зажим токовой обмотки ваттметра (обозначенный звездочкой) всегда включается в сторону источника питания (рис. 5.20). В целях уменьшения методической погрешности генераторный зажим обмотки напряжения при большом сопротивлении нагрузки включается в сторону источника питания (см. рис. 5.20, а), при относительно малом сопротивлении нагрузки – в сторону нагрузки (см. рис. 5.20, б).

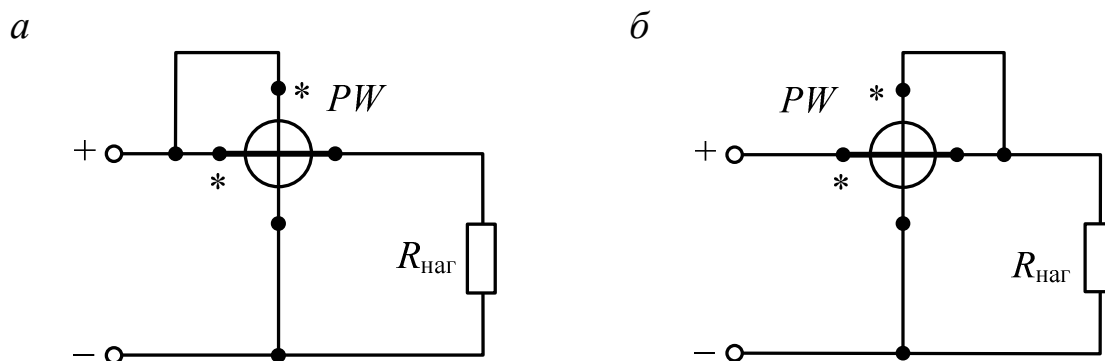


Рис. 5.20. Схемы включения ваттметра в цепь постоянного тока: а – сопротивление нагрузки относительно большое; б – сопротивление нагрузки относительно малое

В последнем случае имеется в виду, что сопротивление нагрузки соизмеримо с сопротивлением токовой цепи. Значение сопротивления токовой цепи всегда указывается на циферблате прибора. В большинстве случаев включения ваттметров сопротивление нагрузки много больше сопротивления последовательной токовой цепи ваттметра, поэтому чаще используется схема, показанная на рис. 5.20, а.

Электродинамические ваттметры могут использоваться при прямых измерениях в диапазонах частот до нескольких (1... 10) килогерц. Принцип действия электродинамического ваттметра основан на том, что угол поворота α рамки (со стрелкой) электродинамического прибора пропорционален произведению токов, умноженному на косинус угла φ между ними:

$$\alpha = k I_1 I_2 U \cos \varphi,$$

где k – постоянный для данного прибора коэффициент.

Пусть требуется измерить активную мощность, потребляемую нагрузкой Z_n , к которой приложено действующее значение напряжения U_n . Через нее протекает гармонический ток со средним квадратическим значением I_n и сдвинутый по фазе на угол φ по отношению к напряжению.

Схема включения катушек ваттметра показана на рис. 5.21, где $R_{доб}$ – добавочное сопротивление.

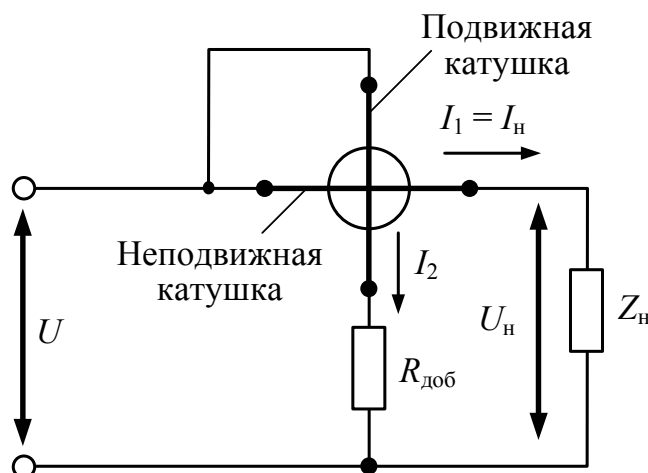


Рис. 5.21. Схема электродинамического ваттметра

Если параметры ваттметра выбраны так, что $R_{доб} \gg Z_n$, то ток в неподвижной катушке $I_1 \approx I_n$, а в подвижной – $I_2 \approx U_n / R_{доб}$. Поэтому угол отклонения стрелки α ваттметра с учетом приведенного выше

выражения для угла поворота рамки будет пропорционален активной мощности в нагрузке P :

$$\alpha \approx (kI_n U_n / R_{\text{добр}}) \cos \varphi \approx kP,$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Ваттметры электродинамической системы могут применяться для измерения электрической мощности в цепях как постоянного, так и переменного тока, но наиболее широко используют их для измерения мощности промышленной частоты.

5.5.2. Измерение мощности в трехфазных цепях

В трехфазной системе независимо от схемы соединения нагрузки (треугольником или звездой) мгновенное значение мощности p системы равняется сумме мгновенных значений мощности отдельных фаз:

$$p = p_1 + p_2 + p_3.$$

Активная мощность за интервал времени Δt определяется выражением

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = P_1 + P_2 + P_3 = U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 + U_{2\phi} I_{2\phi} \cos \varphi_2 + U_{3\phi} I_{3\phi} \cos \varphi_3,$$

где $U_{i\phi}$, $I_{i\phi}$ – фазные напряжения и токи; $\cos \varphi_i$ – косинус угла фазового сдвига между током и напряжением в фазах нагрузки; T – период изменения переменного напряжения.

Для *симметричной* трехфазной системы, в которой все фазные и линейные напряжения, токи и углы фазового сдвига между напряжениями и токами равны между собой, уравнение примет вид

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi,$$

где $U_{\text{л}}$, $I_{\text{л}}$ – линейные напряжения и токи; $\cos \varphi$ – косинус угла фазового сдвига между током и напряжением в фазе нагрузки.

При соединении нагрузки звездой (рис. 5.22, а) мгновенная мощность $p = u_{AN} i_A + u_{BN} i_B + u_{CN} i_C$, где u_{AN} , u_{BN} , u_{CN} – мгновенные значения фазных напряжений; i_A , i_B , i_C – мгновенные значения фазных токов.

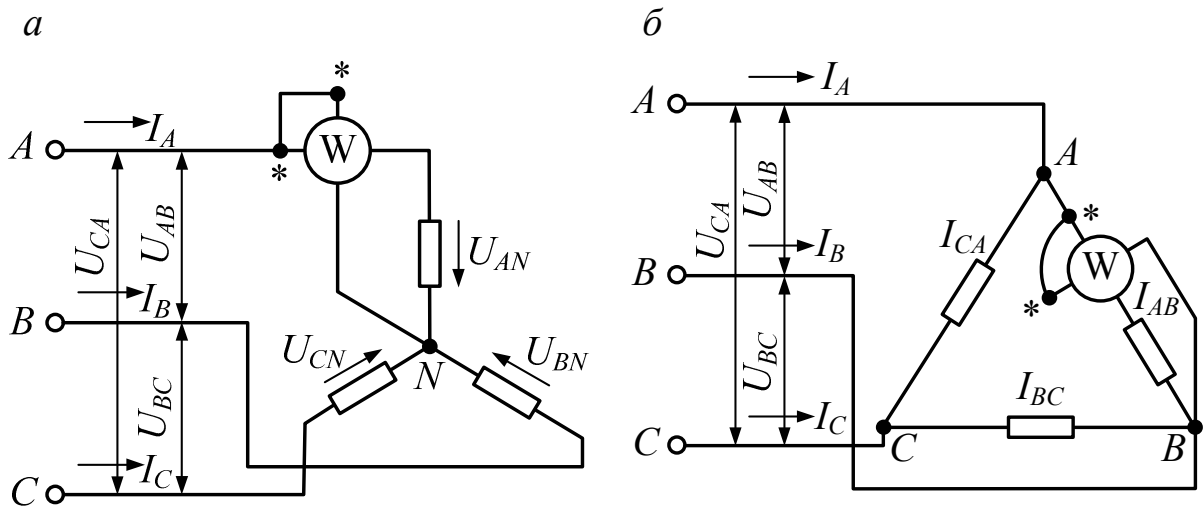


Рис. 5.22. Схема измерения активной мощности в трехфазной цепи одним ваттметром при включении нагрузки звездой (а) и треугольником (б)

Учитывая, что $i_A + i_B + i_C = 0$, $u_{BC} = u_{BN} - u_{CN}$, $u_{AB} = u_{AN} - u_{BN}$, $u_{CA} = u_{CN} - u_{AN}$, уравнение для мгновенного значения мощности трехфазной системы можно представить в трех формах: $p = u_{AC}i_A + u_{BC}i_B$; $p = u_{AB}i_A + u_{CB}i_C$; $p = u_{BA}i_B + u_{CA}i_C$.

К таким же выводам можно прийти и при включении нагрузки треугольником. Переходя от мгновенных к средним значениям, получаем выражения для активной мощности:

$$P = U_{AC}I_A \cos \beta_1 + U_{BC}I_B \cos \beta_2;$$

$$P = U_{AB}I_A \cos \beta_3 + U_{CB}I_C \cos \beta_4;$$

$$P = U_{BA}I_B \cos \beta_5 + U_{CA}I_C \cos \beta_6,$$

где U_{AC} , U_{AB} и т.д., I_A , I_B , I_C – действующие значения линейных напряжений и токов; β_1 , β_2 и т.д. – углы фазового сдвига между соответствующими токами и напряжениями.

Из приведенных уравнений видно, что для измерения мощности, а следовательно, и энергии трехфазной системы могут быть применены один, два или три прибора.

1. Метод *одного прибора* применяется в *симметричных* трехфазных системах. Если фазы нагрузки соединены звездой с доступной нулевой точкой, то однофазный ваттметр включают по схеме, изображенной на рис. 5.22, а, и измеряют мощность одной фазы. Для получения мощности всей системы показания ваттметра утраивают. Аналогично поступают в случае соединения треугольником (рис. 5.22, б).

2. Метод *двух приборов* применяется в *асимметричной* трехпроводной системе, в которой значения токов, напряжений и углов фазового сдвига неодинаковы. Существуют три варианта схемы включения двух приборов (рис. 5.23, а–в). Анализ работы ваттметров показывает, что в зависимости от характера нагрузки фаз знак показаний каждого из ваттметров может меняться. Активная мощность трехфазной системы в этом случае должна определяться как алгебраическая сумма показаний обоих ваттметров.

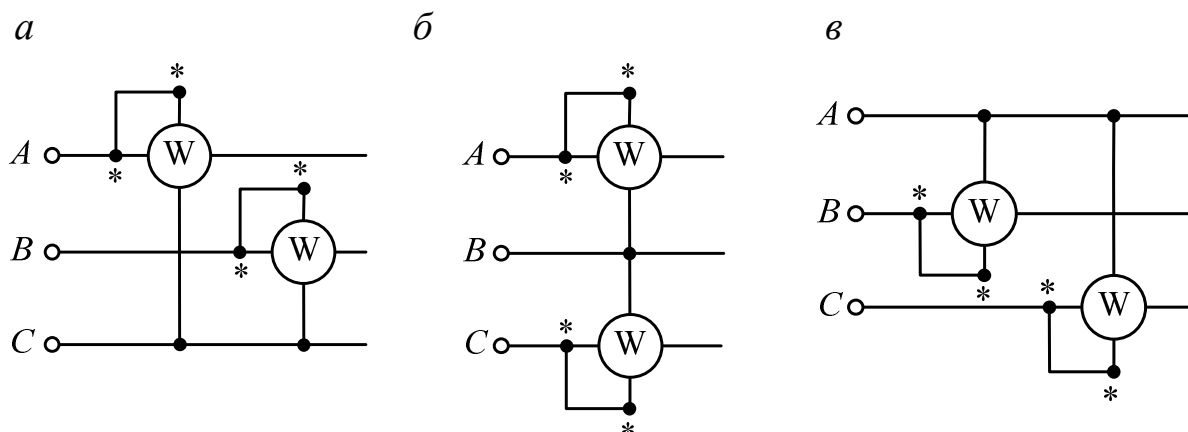


Рис. 5.23. Схемы включения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной сети

3. Метод *трех приборов* применяется в самом общем случае, в том числе в четырехпроводной асимметричной системе, т.е. когда мы имеем дело с несимметричной нагрузкой, включенной звездой с нулевым проводом. При таком включении каждый из ваттметров измеряет мощность одной фазы. Полная мощность системы определяется как арифметическая сумма показаний ваттметров (рис. 5.24).

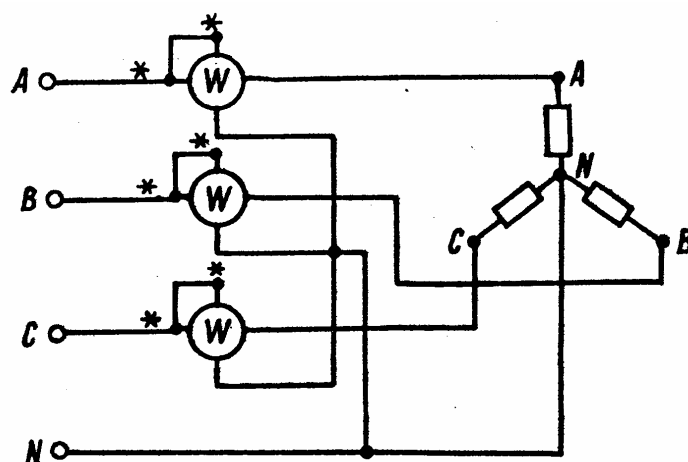


Рис. 5.24. Схема измерения активной мощности тремя ваттметрами

Перечисленные методы применяют главным образом в лабораторной практике. В промышленных условиях используются двух- и трехфазные ваттметры и счетчики, которые представляют собой сочетание в одном приборе двух (двухэлементные) или трех (трехэлементные) однофазных измерительных механизмов, имеющих общую подвижную часть, на которую действует суммарный вращающий момент всех элементов.

5.5.3. Цифровые ваттметры

Повсеместно внедряемая в последние годы в измерительной технике автоматизация процесса измерения распространилась и на средства измерения мощности. Необходимость в автоматизации средств измерения мощности возникла, во-первых, вследствие развития автоматических систем контроля и, во-вторых, по причине сложности управления работой, связанной с балансировкой мостовых схем, которые являются основным элементом любого терморезисторного ваттметра.

В цифровых ваттметрах применяют различные типы преобразователей мощности, в том числе и терморезисторные.

Упрощенная структурная схема цифрового ваттметра приведена на рис. 5.25.

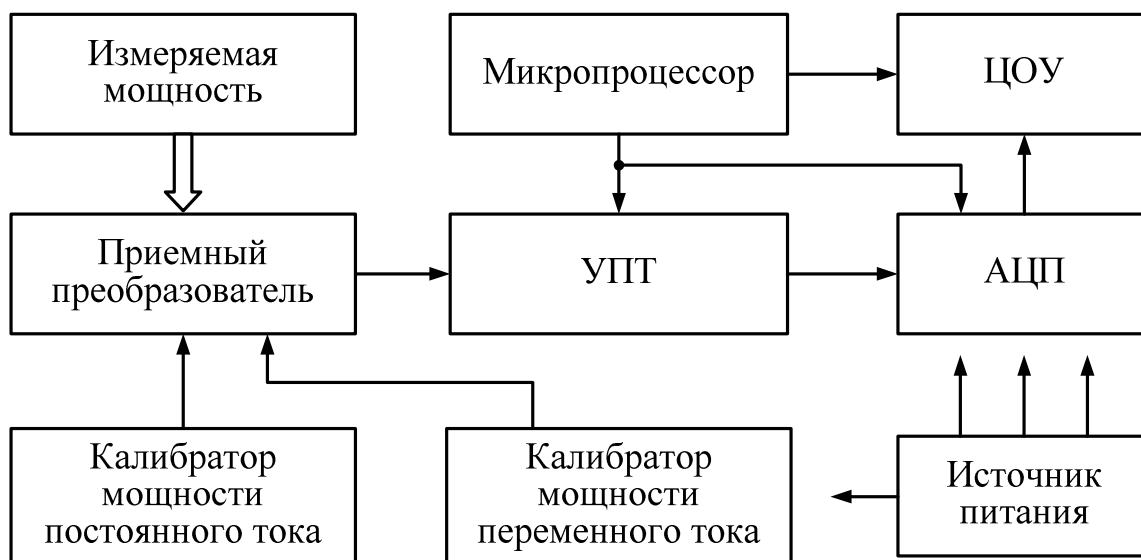


Рис. 5.25. Упрощенная структурная схема цифрового ваттметра

Основным элементом схемы ваттметра является микропроцессор. Усилитель постоянного тока (УПТ) усиливает выходное напряжение термоэлектрического приемного преобразователя до значения, обеспечивающего устойчивую работу блока АЦП. Напряжение, пропорциональное значению измеряемой мощности, преобразуется с помощью времяимпульсного преобразователя (на схеме не показан) в интервал времени, который заполняется импульсами опорной частоты. Число импульсов, пропорциональное измеряемой мощности, отображается на цифровом отсчетном устройстве (ЦОУ) или может вводиться в специализированное устройство обработки измерительной информации.

Микропроцессор ваттметра содержит элементы автоматического управления режимами работы и дистанционного переключения пределов измерения, индикации условного обозначения измеряемой величины. Калибратор мощности переменного тока используется для самокалибровки ваттметра. Калибратор мощности постоянного тока применяется для калибровки цифрового ваттметра, работающего с преобразователями на средних и больших уровнях мощности. Все узлы ваттметра запитываются от встроенного источника питания постоянного тока.

Приемный преобразователь состоит из отрезка коаксиальной линии (или волновода) со стандартным высокочастотным разъемом, поглощающего элемента, термоэлектрического модуля, «образца сравнения». Поглощающий элемент представляет собой тонкопленочный резистор на теплопроводящей (бериллиевой) керамике. Центральным проводником коаксиального тракта является тонкостенная трубка из нержавеющей стали, исключая тепловое влияние внешней среды на поглощающий элемент. Для уменьшения потерь на СВЧ трубка покрывается медью и серебром. Поглощающий элемент за счет плотной посадки имеет электрический контакт с центральным проводником, другой его конец впаян в согласующий медный экран с серебряным покрытием. В согласующем экране предусмотрено ступенчатое изменение диаметра, что обеспечивает согласование поглощающего элемента с трактом во всем диапазоне частот.

Термоэлектрический модуль представляет собой диск с отверстием и расположен так, что горячий спай имеет тепловой контакт с внешней поверхностью согласующего экрана в месте пайки поглощающего элемента, а холодный спай – с «образцом сравнения». К вы-

водам термоэлектрического модуля припаиваются провода соединительного кабеля. Для защиты модуля от случайных внешних тепловых воздействий используются внутренний и внешний экраны. На внешнем экране укреплены ребра, образующие вместе с экраном радиатор. Применение радиатора позволяет увеличить мощность рассеяния преобразователя.

В цифровом ваттметре благодаря применению микропроцессора осуществляется ряд автоматизированных операций: автоматический выбор пределов измерений, автоматическая установка нуля и самокалибровка; кроме того, предусматривается выход информации на канал общего пользования при его включении в состав информационно-измерительной системы.

5.6. Измерения методом сравнения с мерой

Все описанные выше электромеханические измерительные механизмы используют *косвенное* сравнение: возникающие электромагнитные моменты сравниваются с механическим моментом пружины. Более точные результаты можно ожидать при *прямом* сравнении, например: напряжения – с эталонной ЭДС, сопротивления – с эталонным сопротивлением, емкости – с эталонной емкостью и т.п. Такие измерения возможны только при сравнительных измерениях, или измерениях методом сравнения с мерой.

Методы сравнения с мерой – методы, при которых производится сравнение измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой (например, измерение объема жидкости мерным сосудом, измерение массы рычажными весами и т.п.). Сравнение может быть непосредственным или опосредованным через другие величины, однозначно связанные с первыми. Отличительной чертой методов сравнения является непосредственное участие в процессе измерения меры известной величины, однородной с измеряемой. К методам сравнения с мерой относятся следующие: нулевой, дифференциальный, замещения, совпадения.

При использовании *нулевого метода* измерения разность измеряемой и известной величин или разность эффектов, производимых измеряемой и известной величинами, сводится в процессе измерения к нулю, что фиксируется высокочувствительным прибором – нуль-индикатором. При высокой точности мер, воспроизводящих извест-

ную величину, и высокой чувствительности нуль-индикатора может быть достигнута высокая точность измерений. Примером применения нулевого метода является измерение сопротивления резистора с помощью четырехплечего моста, в котором падение напряжения на резисторе с неизвестным сопротивлением уравнивается падением напряжения на резисторе известного сопротивления.

При использовании *дифференциального метода* разность измеряемой величины и величины известной, воспроизводимой мерой, находится с помощью измерительного прибора. Неизвестная величина определяется по известной величине и измеренной разности. В этом случае уравнивание измеряемой величины известной величиной производится не полностью, и в этом заключается отличие дифференциального метода от нулевого. Дифференциальный метод также может обеспечить высокую точность измерения, если известная величина воспроизводится с высокой точностью и разность между ней и неизвестной величиной мала.

Примером измерения с использованием этого метода является измерение напряжения постоянного тока с помощью дискретного делителя напряжения и вольтметра. Неизвестное напряжение равно $U_x = U_0 + \Delta M_x$, где U_0 – известное напряжение; ΔM_x – измеренная разность напряжений.

При применении *метода замещения* производится поочередное подключение на вход прибора измеряемой и известной величины и по двум показаниям прибора оценивается значение неизвестной величины. Наименьшая погрешность измерения получается в том случае, когда в результате подбора известной величины прибор дает тот же выходной сигнал, что и при неизвестной величине. Этот метод позволяет получить высокую точность измерения при высокой точности меры известной величины и высокой чувствительности прибора. Примером использования этого метода является точное измерение малого напряжения с помощью высокочувствительного гальванометра, к которому сначала подключают источник неизвестного напряжения и определяют отклонение указателя, а затем с помощью регулируемого источника известного напряжения добиваются того же отклонения указателя. При этом известное напряжение равно неизвестному.

При помощи *метода совпадения* определяют разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. При-

мером использования этого метода является измерение частоты вращения детали с помощью мигающей лампы стробоскопа: наблюдая положение метки на вращающейся детали в моменты вспышек лампы, по частоте вспышек и смещению метки определяют частоту вращения детали.

5.6.1. Разновременный метод сравнения

Самый простой метод сравнения – замена меры на измеряемую величину (рис. 5.26).

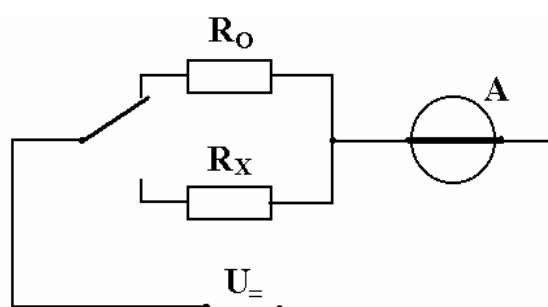


Рис. 5.26. Схема замены меры на измеряемую величину

Производится измерение тока, протекающего через сопротивление неизвестной величины: $I_x = U / R_x$. После переключения ключа измеряется ток, протекающий через сопротивление известной величины: $I_0 = U / R_0$. И наконец, вычисляется величина неизвестного сопротивления: $R_x = R_0 (I_0 / I_x)$.

5.6.2. Теория мостовых схем

Мосты широко используют для измерения сопротивления, индуктивности, емкости, добротности и угла потерь. На основе мостовых схем выпускают приборы для измерения неэлектрических величин (температуры, перемещений и др.) и различные устройства автоматики. Широкое применение мостов объясняется возможностью получения высокой точности результатов измерений, высокой чувствительностью и возможностью измерения различных величин.

Мостовые цепи обладают одним важным свойством: при определенном соотношении сопротивлений плеч моста напряжение и ток в диагонали нагрузки полностью отсутствуют при любых значениях $U_{пит}$.

В зависимости от характера сопротивлений плеч, образующих мост, и рода тока, питающего его, выделяют *мосты постоянного тока* и *мосты переменного тока*. Мосты постоянного тока применяются для измерения сопротивления электрической цепи постоянному току, а также для преобразования сопротивления в ток или напряжение. Мосты переменного тока применяются для измерения или преобразования в электрический сигнал *комплексных сопротивлений*, а также в качестве фильтров.

В зависимости от вида схемы (числа плеч) мосты постоянного тока бывают *четырёхплечие* (одинарные) и *шестиплечие* (двойные). В мостах постоянного тока измеряемая величина представляет собой сопротивление электрической цепи постоянному току и выражается действительным числом. Для уравнивания такой цепи требуется только один регулируемый элемент. Мосты выпускаются с ручным и автоматическим уравниванием.

Схема одинарного моста переменного тока приведена на рис. 5.27. Плечи моста $a - б$, $б - в$, $a - г$ и $г - в$ содержат в общем случае комплексные сопротивления $Z_1 - Z_4$. В диагональ $б - г$, называемую *выходной*, включается нагрузка (в частном случае прибор – нуль-индикатор) с сопротивлением Z_0 .

Зависимость тока I_0 в нагрузке от параметров моста и напряжения питания U можно найти, например, с помощью законов Кирхгофа:

$$I_0 = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{Z_0 (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4) + Z_1 Z_2 (Z_3 + Z_4) + Z_3 Z_4 (Z_1 + Z_2)}.$$

Равновесие моста имеет место при таком подборе параметров плеч, чтобы ток в диагонали моста $I_0 = 0$, а значит, при

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3,$$

т.е. условие (или уравнение) равновесия моста таково: *произведения сопротивлений противолежащих плеч моста равны*. Если заданы сопротивления любых трех плеч моста, всегда можно определить четвертое сопротивление.

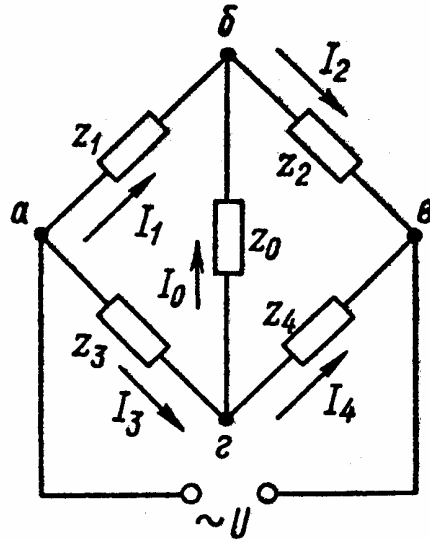


Рис. 5.27. Схема одинарного моста

В развернутой форме выражения полных сопротивлений плеч имеют вид $Z_1 = R_1 + jX_1$; $Z_2 = R_2 + jX_2$; $Z_3 = R_3 + jX_3$; $Z_4 = R_4 + jX_4$. Подставив значения $Z_1 - Z_4$ в выражение для равновесия моста, получим равенства для мнимых и вещественных членов:

$$\begin{aligned} R_1R_4 - X_1X_4 &= R_2R_3 - X_2X_3; \\ R_1X_4 - R_4X_1 &= R_2X_3 - R_3X_2. \end{aligned}$$

Наличие двух уравнений равновесия означает необходимость регулировки не менее двух параметров моста переменного тока для достижения равновесия. Для мостов переменного тока имеет значение сходимостью моста. Под *сходимостью моста* понимают возможность достижения состояния равновесия определенным числом поочередных переходов от регулировки одного параметра к регулировке другого.

Условия равновесия моста могут быть выражены иным способом. Учитывая, что

$$Z_1 = z_1 e^{j\varphi_1}; \quad Z_2 = z_2 e^{j\varphi_2}; \quad Z_3 = z_3 e^{j\varphi_3}; \quad Z_4 = z_4 e^{j\varphi_4},$$

где $z_1 - z_4$ — модули полных сопротивлений плеч; $\varphi_1 - \varphi_4$ — углы фазового сдвига тока относительно напряжения в соответствующих плечах, условие равновесия можно представить так:

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

Отсюда

$$z_1 z_4 = z_2 z_3; \quad \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Условие $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$ указывает, при каком расположении плеч в зависимости от характера их сопротивлений можно уравновесить мост. Если смежные плечи, например третье и четвертое, имеют чисто активные сопротивления R_3 и R_4 , т.е. $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$, то сопротивления двух других смежных плеч могут иметь или индуктивный, или емкостный характер. Если противоположные плечи имеют чисто активные сопротивления, то одно из двух других должно быть индуктивным, а второе – емкостным, т.е. производится уравнивание как действительной, так и мнимой частей тока в диагонали моста. Иными словами, в мостах переменного тока измеряемая величина выражается комплексным числом, поэтому в данном случае требуются два уравнивающих элемента – соответственно для модуля и аргумента, или активной и реактивной составляющих измеряемого сопротивления. Существуют мостовые цепи, которые уравниваются только по одной из этих составляющих. Такие цепи называют *полууравновешенными* или *квазиуравновешенными*.

Если в уравнение равновесия моста входит частота питающего мост напряжения, то такой мост называют *частотно-зависимым*, в противном случае – *частотно-независимым*. Частотно-зависимые мосты применяются в качестве фильтров и для измерения частоты питающего мост напряжения, частотно-независимые – для измерения параметров электрической цепи или их преобразования в ток и напряжение.

В мостах переменного тока часто применяют электронные нуль-индикаторы, входное сопротивление которых приближенно можно считать равным бесконечности. Для этого случая напряжение между точками \bar{b} и \bar{z} можно определить по формуле

$$\dot{U}_{\bar{b}-\bar{z}} = \dot{U} \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}.$$

Если в уравновешенном мосте какое-нибудь плечо, например Z_1 , получит малое приращение ΔZ_1 , то, пренебрегая этим приращением в знаменателе, имеем

$$\dot{U}_{\bar{b}-\bar{z}} \approx \dot{U} \frac{\Delta Z_1 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}.$$

Мосты, в которых измеряемую величину определяют из условия равновесия $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$, называют *уравновешенными*. Иногда

измеряемую величину можно определять по значению тока или напряжения выходной диагонали моста. Такие мосты называются *неуравновешенными*.

Схема моста постоянного тока не отличается от рассмотренной схемы (см. рис. 5.27). Плечи моста постоянного тока $a - \bar{b}$, $\bar{b} - \bar{в}$, $a - \bar{г}$ и $\bar{г} - \bar{в}$ имеют соответственно активные сопротивления $R_1 - R_4$, а в диагональ $\bar{b} - \bar{г}$ включают нуль-индикатор постоянного тока, например магнитоэлектрический гальванометр с сопротивлением $R_{Г}$.

Ток в цепи гальванометра для моста постоянного тока равен

$$I_0 = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_{Г}(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}.$$

Если мост уравновешен, ток в диагонали $\bar{b} - \bar{г}$ равен нулю; для этого необходимо, чтобы

$$R_1 R_4 = R_2 R_3.$$

Приведенное равенство показывает возможность подключения объекта в любое плечо моста и определения его сопротивления через сопротивления трех других плеч.

Процесс измерения с помощью моста заключается в том, что в одно из плеч моста (например, $a - \bar{b}$) включают объект с неизвестным сопротивлением R_x и, изменяя одно или несколько сопротивлений плеч, добиваются отсутствия тока в цепи гальванометра (нуль-индикатора). Тогда на основании соотношения $R_1 R_4 = R_2 R_3$

$$R_x = R_2 R_3 / R_4.$$

Принято R_2 и R_4 называть *плечами отношения*, а R_3 — *плечом сравнения*.

Важной характеристикой моста является его *чувствительность*.

Выходной величиной моста может быть ток, напряжение или мощность. Входной величиной является измеряемая величина (сопротивление, индуктивность, емкость и др.). В соответствии с этим различают чувствительность мостовой схемы по току, напряжению или мощности. Приблизительно чувствительность моста определяют как отношение конечных приращений выходной величины и измеряемой величины вблизи равновесия:

$$\dot{S}_m \approx \Delta y / \Delta x.$$

В мостах переменного тока обычно используют нуль-индикаторы, чувствительные к напряжению и имеющие практически бесконечное сопротивление. Поэтому, как правило, определяют чув-

ствительность мостов переменного тока по напряжению. Относительная чувствительность мостовой схемы переменного тока по напряжению

$$\dot{S}_{mU} = \dot{U}_{\sigma-2} / \dot{\varepsilon},$$

где $\dot{\varepsilon} = \Delta Z_1 / Z_1$.

Чем выше чувствительность собственно моста S_m , тем грубее может быть измерительный прибор, установленный в диагонали моста $S_{\text{приб}}$.

Чувствительность по переменному току – комплексная величина и зависит от фазового угла, поэтому при настройке равновесия моста переменного тока необходима постоянная компенсация фазы.

Для оптимальной конструкции моста необходимо соблюдение следующих условий:

1. Поскольку чувствительность пропорциональна напряжению питания моста, следует максимально увеличить напряжение питания в пределах допустимых мощностей рассеяния плеч моста.

2. Максимальная чувствительность достигается при условии $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$.

5.6.3. Компенсаторы (потенциометры) постоянного тока

Рассмотренные ранее приборы электромеханической группы являются приборами непосредственной оценки измеряемого параметра и все (в большей или меньшей степени) потребляют мощность из измерительной цепи, что может приводить к нарушению работы исследуемого объекта. Измерение тока и напряжения аналоговыми электромеханическими приборами возможно в лучшем случае с погрешностью 0,1% (класс точности прибора 0,1). Более точные измерения можно выполнить методом сравнения с мерой. Средства измерений, использующие метод сравнения, называются *компенсаторами* или *потенциометрами*.

Компенсаторы – приборы, в которых измерение производится методом сравнения измеряемой величины с эталонной величиной. Принцип действия компенсатора основан на уравнивании (компенсации) измеряемого напряжения известным падением напряжения на образцовом резисторе. Момент полной компенсации фиксируется индикаторным прибором (нуль-индикатором). Разработаны компен-

саторы переменного и постоянного тока. Компенсационный метод применяется также в цифровых измерительных приборах.

Компенсаторы используются для измерения ЭДС, U , I , R путем сравнения измеряемой величины с эталоном по калиброванной шкале. Они также применяются для измерения других величин при использовании измерительных преобразователей и косвенного способа измерений. Компенсаторы дают возможность получать результаты с высокой точностью, они обладают высокой чувствительностью. Приборостроительная промышленность выпускает компенсаторы как с ручным, так и с автоматическим уравниванием.

Пример простейшего компенсатора на основе дискретного делителя напряжения R_n представлен на рис. 5.28. Здесь использован дифференциальный метод сравнения с мерой. При передвижении движка потенциометра фиксируется момент компенсации ($I=0$), и на градуированной шкале отмечается величина измеряемого напряжения.

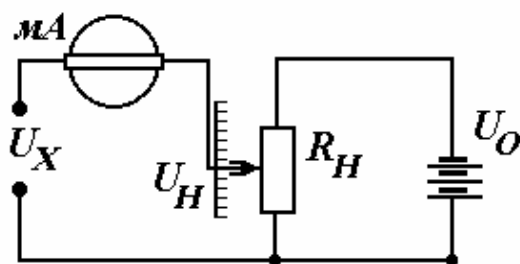


Рис. 5.28. Схема компенсатора, предназначенного для измерения напряжения

При сравнении напряжения или ЭДС с напряжением нормального элемента (мерой ЭДС), имеющим малую мощность, используют мостовые схемы компенсаторов (рис. 5.29). Здесь $E_{н.э}$ – нормальный элемент, ЭДС которого известна с точностью до 5-го знака и равна 1,0186 В; U_x – измеряемая ЭДС; R_y – постоянный высокостабильный резистор (*установочный*, *образцовый*); R_u – резистор с точно известным регулируемым сопротивлением, например магазин сопротивлений (*измерительный*); $R_{рег}$ – переменный резистор (*регулируемый*); E_0 – источник постоянного напряжения. Как правило, R_u представляет собой калиброванный высокоточный (0,01%) магазин сопротивлений, R – его сопротивление при уравновешенном мосте. Прибор

НИ на схеме – это нуль-индикатор, реагирующий на очень малые постоянные токи (чувствительность по току порядка 10^{-10} дел/А).

Относительная погрешность нормального элемента может быть в пределах от 0,02 до 0,0002%. Источник постоянного напряжения E_0 обеспечивает протекание рабочего тока I_p по цепи, состоящей из последовательно включенных резисторов R_u , R_y и $R_{рег}$.

Методика измерения заключается в следующем:

1. С помощью переключателя нуль-индикатор вначале включается в цепь установочного сопротивления R_y (положение переключателя 1). При этом регулировочным сопротивлением $R_{рег}$ добиваются отсутствия тока в цепи нуль-индикатора. Это означает, что $I_p R_y = E_{н.э.}$, откуда значение рабочего тока определяется через соотношение $I_p = E_{н.э.} / R_y = 10^{-n}$ А (для каждого типа компенсаторов величина n – число индивидуальное и неизменное, что обеспечивается постоянством $E_{н.э.}$ и R_y).

2. Затем нуль-индикатор переключается в измерительную цепь (положение переключателя 2) и регулированием измерительного сопротивления R_u добиваются нулевого тока, а значит выполнения равенства $U_x = I_p R = E_{н.э.} R / R_y$. Шкала резистора R_u может быть проградуирована непосредственно в единицах напряжения постоянного тока.

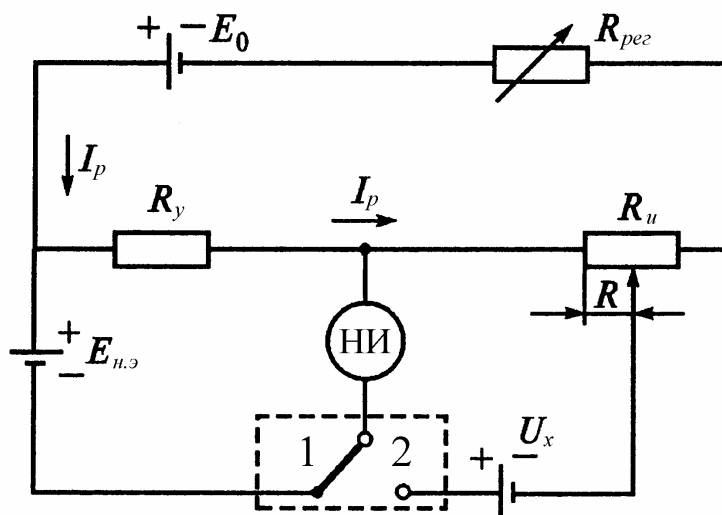


Рис. 5.29. Упрощенная схема компенсатора постоянного тока для измерения напряжения U_x

Итак, измеряемое напряжение определяется с достаточно высокой точностью и без нарушения работы измерительной цепи, так как в момент измерения (равновесия) ток через индикатор не протекает.

Поэтому можно считать, что входное сопротивление $R_{вх}$ компенсатора (со стороны измеряемого напряжения) равно бесконечности. Отсюда следует одно из основных достоинств компенсатора – отсутствие потребления мощности от объекта измерения, т.е. возможность измерения ЭДС.

В современных конструкциях компенсаторов вместо нормального элемента часто применяются эталонные (в частности, стабилизированные) источники напряжения с более высоким значением коэффициента стабилизации, что позволяет расширить верхний предел измерения компенсатора до нескольких десятков вольт.

Погрешность компенсатора постоянного тока определяется погрешностью резисторов R_u , R_v , ЭДС нормального элемента $E_{н.э}$, а также чувствительностью нуль-индикатора. Современные потенциометры постоянного тока имеют класс точности от 0,0005 до 0,2. Верхний предел измерения составляет до 1...2,5 В. При достаточной чувствительности нуль-индикатора нижний предел измерения может составлять единицы нановольт. Компенсационные методы используются также для измерений и на переменном токе.

Контрольные вопросы

1. Что такое шунт? В каких случаях он применяется?
2. Объясните принцип действия измерительных трансформаторов тока и напряжения.
3. Объясните назначение и порядок расчета дополнительного сопротивления в схеме вольтметра.
4. Какие методы измерения сопротивлений существуют? Приведите существенные отличия методов.
5. Объясните принцип действия цифрового фазометра.
6. Дайте краткое описание существующих методов измерения частоты.
7. Какие параметры электрической мощности измеряются в практической электротехнике? Каковы требуемые точностные характеристики измерения мощности?
8. Объясните смысл и преимущества измерения мощности в относительных единицах – децибелах.
9. Приведите правила измерения мощности в однофазных цепях с помощью электродинамических ваттметров.

10. Какими способами измеряется мощность в трехфазных цепях?
11. Объясните принцип действия цифрового ваттметра.
12. Объясните сущность метода сравнения с мерой. Какие методы сравнения с мерой вам известны?
13. На чем основан принцип мостового метода измерения электрических величин?
14. Приведите схему одинарного моста и объясните его работу.
15. Напишите уравнение равновесия моста.
16. Объясните принцип действия компенсатора постоянного тока.

Глава 6. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Электронные аналоговые приборы представляют собой средства измерения, в которых преобразование сигналов измерительной информации осуществляется с помощью аналоговых электронных устройств (создаваемых, например, на основе операционных усилителей). Выходной сигнал таких средств является непрерывной функцией измеряемой величины. Отображение производится обычно электромеханическими механизмами. Электронные приборы и преобразователи применяют при измерении практически всех электрических величин: напряжения, тока, частоты, мощности, сопротивления и т.д. Благодаря использованию электронных устройств удается расширить функциональные возможности средств измерений и обеспечить высокий уровень их метрологических характеристик.

Достоинства аналоговых электронных приборов:

1. Возможность с их помощью преобразовывать измеряемые переменные напряжения с различной формой сигнала в постоянный ток, который регистрируется, как правило, магнитоэлектрическим механизмом.
2. Высокая чувствительность за счет применения усилительных схем.
3. Широкий диапазон измеряемых напряжений (от 0,1 мкВ до 10 кВ).
4. Высокое входное сопротивление (до 10 МОм).
5. Малая потребляемая мощность от измеряемой цепи.
6. Широкий частотный диапазон (от постоянного тока $f = 0$ Гц до 100 МГц).

В настоящее время широкое признание получили такие аналоговые электронные приборы, как электронно-лучевые осциллографы, электронные вольтметры, омметры, анализаторы спектра и др. В то же время некоторые аналоговые приборы, например частотомеры и фазометры, вытесняются соответствующими цифровыми приборами, что обусловлено относительной простотой преобразования этих параметров в кодовый сигнал.

6.1. Вольтметры постоянного тока

Напряжение в радиоэлектронной технике практически всегда измеряется электронными вольтметрами. В электронных вольтметрах, снабженных усилительными устройствами, потребление мощности из измерительной цепи ничтожно мало. К достоинствам электронных вольтметров относятся: широкие пределы измерения и частотный диапазон (от 20 Гц до 1000 МГц), высокая чувствительность, хорошая перегрузочная способность.

Классифицировать электронные вольтметры можно по нескольким признакам:

- по назначению: вольтметры постоянного, импульсного, переменного напряжений; фазочувствительные, селективные, универсальные;
- по способу измерения: приборы непосредственной оценки и приборы сравнения;
- по характеру измеряемого значения напряжения: амплитудные (пиковые), действующего значения, средневыпрямленного значения;
- по частотному диапазону: низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные.

Кроме того, все электронные приборы можно разделить на две большие группы: аналоговые электронные со стрелочным отсчетом и приборы дискретного типа с цифровым отсчетом.

Упрощенная структурная схема вольтметра постоянного тока представлена на рис. 6.1.



Рис. 6.1. Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока:

ВД – входной делитель напряжения; *УПТ* – усилитель постоянного тока;
ИМ – магнитоэлектрический измерительный механизм

Угол отклонения указателя измерительного механизма равен

$$\alpha = k_{ВД} k_{УПТ} S_U U_X = k_V U_X,$$

где $k_{ВД}$, $k_{УПТ}$ – коэффициенты преобразования (усиления) соответственно ВД и УПТ; S_U – чувствительность по напряжению измеритель-

ного механизма; k_V – коэффициент преобразования электронного вольтметра; U_x – измеряемое напряжение.

Последовательное соединение делителя напряжения и усилителя является характерной особенностью построения всех электронных вольтметров. Такая структура позволяет делать вольтметры высокочувствительными и многопредельными за счет изменения в широких пределах их общего коэффициента преобразования.

Недостатком прибора является нестабильность работы УПТ при больших коэффициентах усиления (дрейф «нуля» – самопроизвольное изменение выходного сигнала усилителя). Поэтому коэффициент усиления делают обычно равным единице, а основным назначением УПТ становится обеспечение большого входного сопротивления вольтметра.

6.2. Вольтметры переменного тока

Вольтметры переменного тока состоят из преобразователя переменного напряжения в постоянное, усилителя и магнитоэлектрического измерительного механизма. Возможны две обобщенные структурные схемы вольтметров переменного тока (рис. 6.2, 6.3), различающиеся своими характеристиками.

В вольтметре, схема которого изображена на рис. 6.2, измеряемое напряжение u_x сначала преобразуется в постоянное напряжение, которое затем подается на УПТ и ИМ, являющиеся, по существу, вольтметром постоянного тока.



Рис. 6.2. Структурная схема вольтметра переменного тока:

Пр – преобразователь; *УПТ* – усилитель постоянного тока;

ИМ – измерительный механизм

Преобразователь *Пр* представляет собой малоинерционное нелинейное звено, поэтому вольтметры с такой структурой могут работать в широком частотном диапазоне (от десятков герц до 10^3 МГц). Для уменьшения влияния распределенных емкостей и индуктивностей входного кабеля и входной цепи прибора преобразователи обычно выполняют в виде выносных узлов-пробников. В то же время ука-

занные недостатки УПТ и особенности работы нелинейных элементов при малых напряжениях не позволяют делать такие вольтметры высокочувствительными. Обычно их верхний предел измерений при максимальной чувствительности составляет десятки – единицы милливольт.

В вольтметрах, выполненных по схеме, показанной на рис. 6.3, благодаря предварительному усилению удастся повысить чувствительность.



Рис. 6.3. Структурная схема вольтметра переменного тока с предварительным усилением

Однако создание усилителей переменного тока с большим коэффициентом усиления, работающих в широком диапазоне частот, – достаточно трудная техническая задача. Поэтому такие вольтметры имеют относительно низкий частотный диапазон (1 – 10 МГц); верхний предел измерений при максимальной чувствительности составляет десятки или сотни микровольт.

В зависимости от вида преобразователя переменного напряжения в постоянное отклонения указателя измерительного механизма вольтметров могут быть пропорциональны амплитудному (пиковому), среднему (средневыпрямленному) или действующему значениям измеряемого напряжения. В связи с этим вольтметры называют соответственно вольтметрами амплитудного, среднего или действующего значения. Однако независимо от вида преобразователя шкалу вольтметров переменного тока, как правило, градуируют в действующих значениях напряжения синусоидальной формы.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные достоинства электронных аналоговых приборов.
2. Назовите величины, которые способны измерять современные аналоговые приборы.
3. Приведите структурную схему электронного вольтметра.

Глава 7. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

7.1. Общие сведения

Цифровым измерительным прибором (ЦИП) называется средство измерения, автоматически вырабатывающее дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

В отличие от аналоговых приборов в каждом ЦИП обязательно автоматически выполняются следующие операции:

- квантование измеряемой непрерывной величины по уровню;
- дискретизация ее во времени;
- кодирование (оцифровка) информации в соответствии с размером измеряемой величины;
- представление значения измеренной величины в цифровой форме на отсчетном устройстве в соответствии с кодом.

Непрерывная величина $x(t)$ – величина, которая может иметь в заданном интервале времени при бесконечном большом числе моментов времени бесконечное число значений (рис. 7.1).

Квантование по уровню непрерывной по уровню величины $x(t)$ – процесс ее преобразования в прерывную (ступенчатую, дискретную, квантованную) величину путем замены ее мгновенных значений ближайшими фиксированными значениями $x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}$, совокупность которых образована по определенному закону. Фиксированные значения квантованной величины называют *уровнями квантования*. Число возможных уровней квантования определяется конструкцией ЦИП.

При квантовании теряется часть информации, но получаемое в результате квантования значение величины известно с погрешностью, определяемой *ступенью квантования*. Понятно, что погрешность от замены действительного значения квантованным может быть снижена за счет уменьшения шага квантования.

Ступень квантования (шаг квантования, квант Δx) – разность между двумя ближайшими детерминированными уровнями квантования x_n и x_{n+1} . Шаг квантования равен выходному сигналу, создаваемому младшим значащим битом двоичного входного слова.

Дискретизация непрерывной во времени величины $x(t)$ – операция ее преобразования в прерывную во времени, т.е. величину, значе-

ния которой отличны от нуля и совпадают с соответствующими значениями $x(t)$ только в определенные моменты времени.

При дискретизации теряется часть информации, однако каждое значение дискретной величины строго связано с определенным моментом времени. Дискретный сигнал, в отличие от непрерывного, может иметь только конечное число значений в определенном промежутке времени.

Шаг дискретизации – промежуток времени Δt между двумя ближайшими моментами дискретизации t_n и t_{n+1} . Шаг дискретизации может быть постоянным или переменным.

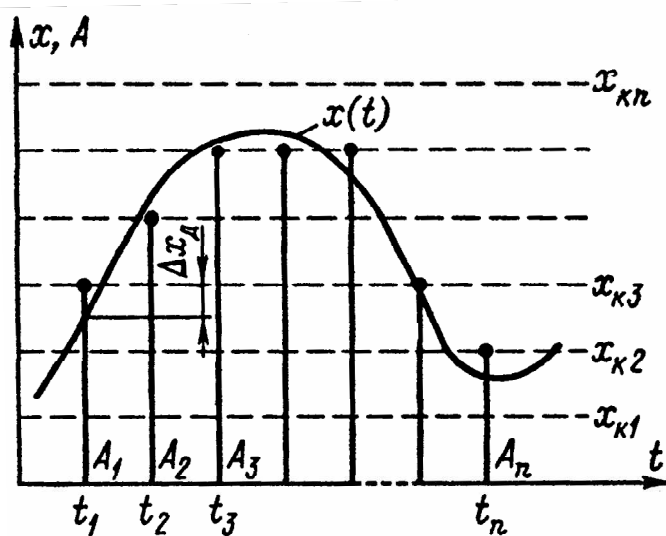


Рис. 7.1. Квантование по уровню и дискретизация во времени непрерывной измеряемой величины

На рис. 7.1 обозначена величина Δx_d – разность между значением кодовой комбинации ЦИП и размером измеряемой величины в момент измерения, *погрешность дискретности (квантования по уровню)*. Это есть абсолютная погрешность. Она обусловлена тем, что бесконечное множество значений измеряемой величины отражается лишь ограниченным числом кодовых комбинаций ЦИП. Погрешность дискретности не является препятствием для увеличения точности ЦИП, так как соответствующим выбором числа уровней квантования погрешность дискретности можно сделать достаточно малой. Иногда возникает необходимость восстанавливать все значения непрерывной измеряемой величины по ряду мгновенных значений. Практически это удается сделать всегда с погрешностью, носящей название *погрешности аппроксимации*.

Исходной предпосылкой возможности построения цифровых измерительных приборов, в частности АЦП и ЦАП, служит известная в радиотехнике *теорема Котельникова* (теорема отсчетов), которая гласит, что если непрерывный сигнал $u(t)$ имеет спектр, ограниченный некоторой верхней частотой f_{\max} , то он может быть однозначно и без потерь восстановлен по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой $f_{\text{дискр}} = 2f_{\max}$, или, иначе, по отсчетам, взятым с периодом дискретизации

$$T_{\text{дискр}} = \frac{1}{2f_{\max}}.$$

К обязательным узлам ЦИП относятся:

- 1) *аналого-цифровой преобразователь*, выдающий код, соответствующий мгновенному значению измеряемой величины;
- 2) *цифровое отсчетное устройство*, преобразующее код АЦП в десятичное значение, отображаемое на дисплее;
- 3) *устройство управления*, которое реализует выполнение алгоритма преобразования и отсчета измеряемой величины.

Современные цифровые измерительные приборы многопределны, универсальны, предназначены для измерения постоянного и переменного токов, частоты, фазы, сопротивления, емкости, отношения напряжений и других электрических величин.

К преимуществам ЦИП перед аналоговыми приборами следует отнести:

- удобство и наглядность отсчета;
- высокую точность результатов измерений, практически недостижимую для аналоговых приборов;
- большой динамический диапазон при высокой разрешающей способности;
- высокое быстродействие;
- возможность автоматизации процесса измерений, автоматический выбор полярности и диапазона измерений;
- высокую устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям;
- возможность использования в составе информационно-измерительных систем через подключение их портов к шинам данных;
- возможность использования новейших достижений цифровой электроники.

К недостаткам ЦИП следует отнести их схемную сложность и относительно высокую стоимость. В последние годы в связи с существенными успехами микроэлектроники указанные недостатки постепенно теряют значение.

7.2. Цифровое кодирование

Кодирование в ЦИП производится по определенному правилу, например с использованием *системы счисления*.

Цифровой код представляет собой последовательность цифр, подчиняющихся определенному закону, с помощью которого условно отображают численное значение измеряемой величины. В привычной для нас десятичной системе счисления любое целое число N может быть представлено в виде

$$N = \sum_{i=1}^{i=n} k_i \cdot 10^{i-1},$$

где n – число разрядов; k_i – коэффициент, принимающий значения 0, 1, 2, ..., 9 (используется 10 различных символов).

Например, число 902 можно представить в виде суммы: $902_{10} = 9 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0$.

Положение коэффициента определяет его принадлежность к определенному разряду, т.е. «вес разряда».

Любое число N можно также выразить в двоичной системе:

$$N = \sum_{i=1}^{i=n} k_i \cdot 2^{i-1}.$$

Например, число 902 в двоичной системе выглядит следующим образом: $1 \cdot 2^9 + 1 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 1110000110_2$.

Находят применение комбинации систем счисления. Например, двоично-десятичная система строится на сочетании признаков двоичной и десятичной систем. Расположение десятичных разрядов сохраняется, но цифра каждого десятичного разряда изображается в двоичной системе. Число 902 в двоично-десятичной системе имеет вид 1001 0000 0010.

7.2.1. Позиционные коды

Простой единичный код представляет собой последовательность импульсных сигналов постоянного тока, количество которых равно числовому значению измеряемой величины (рис. 7.2).

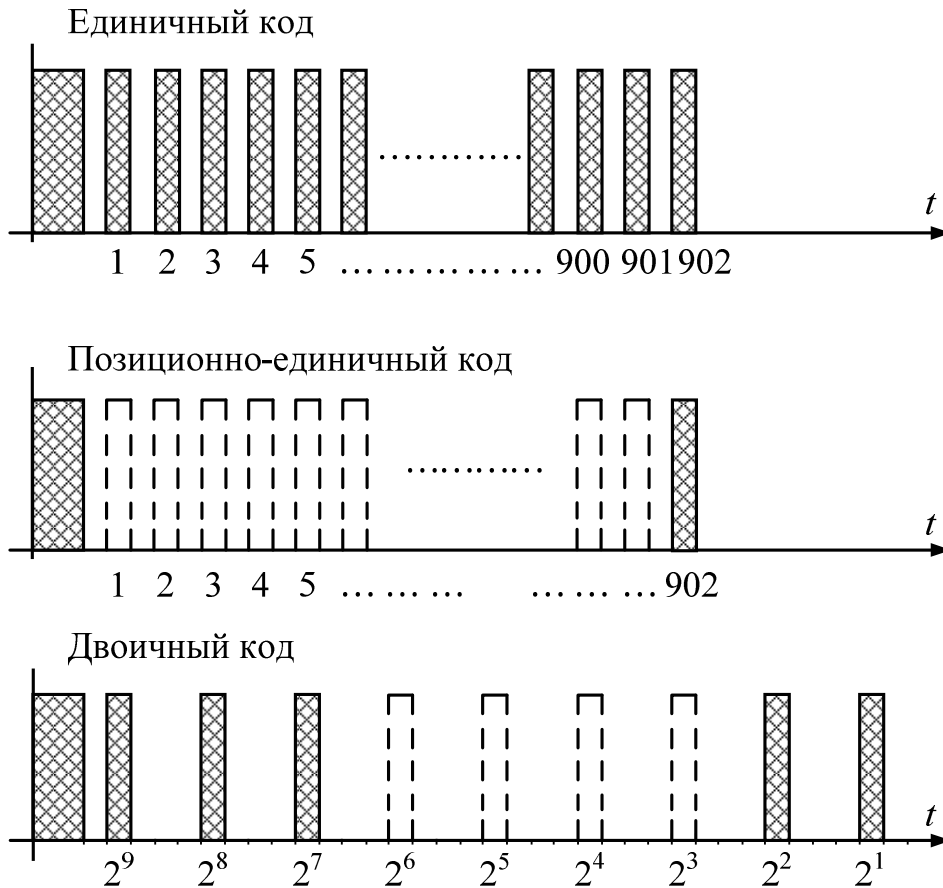



Рис. 7.2. Диаграмма представления числа 902_{10} различными типами позиционных кодов:

 – синхросигнал и импульсные сигналы преобразования, соответствующие заданному числу

Позиционно-единичный код – промежуток времени от синхросигнала до определенной позиции на оси времени, занимаемой импульсным сигналом, которая соответствует числовому значению измеряемой величины.

Позиционно-двоичный код представляет собой последовательность импульсов, позиция каждого из которых на оси времени соответствует определенному разряду двоичного числа.

7.2.2. Комбинированные коды

Комбинированные коды представляют собой набор групп позиционированных импульсных сигналов, причем в каждой из групп сигналы могут быть расположены в определенной последовательности. Рассмотрим два наиболее распространенных кода.

Единично-десятичный код представляет собой набор из десяти последовательных импульсов, который повторяется в соответствии с числом десятичных разрядов (рис. 7.3).

Двоично-десятичный код представляет собой последовательность групп импульсных сигналов. При этом число групп равно количеству десятичных разрядов, а число импульсных сигналов в каждой группе равно четырем ($2^4 = 16$), для того чтобы сформировать в каждой группе двоичное представление чисел от 0 до 9.

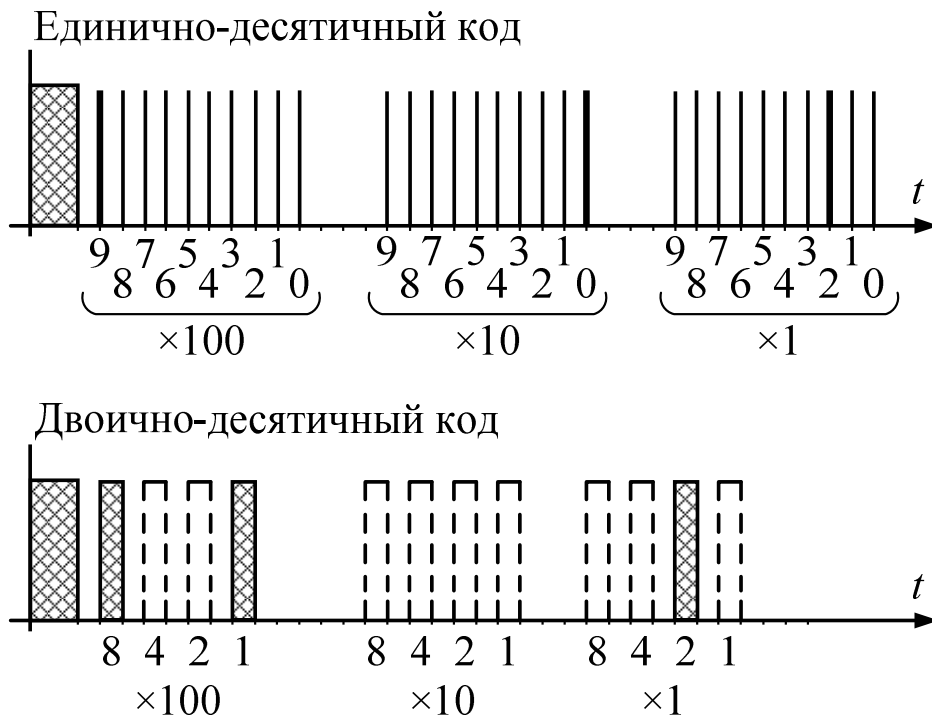


Рис. 7.3. Диаграмма представления числа 902_{10} различными типами комбинированных кодов

При сравнении диаграмм, приведенных на рис. 7.2. и 7.3, видно, что комбинированные коды обладают более сложной структурой, а это предопределяет более сложную обработку цифровых сигналов.

7.3. Основные методы преобразования непрерывных измеряемых величин в коды

При аналого-цифровом преобразовании входной сигнал связан с выходным следующей зависимостью:

$$U_A \approx U_R(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + b_3 2^{-3} + \dots + b_n 2^{-n}),$$

где U_A – напряжение на аналоговом входе; U_R – опорное напряжение; b_1, b_2, b_n – цифровые выходы, n – число цифровых выходов. Все выходы и составляют двоичное слово, соответствующее величине аналогового сигнала¹. Так как выходной сигнал преобразователя растет ступенчато, то вышеприведенное уравнение имеет знак нестрогого равенства.

Поскольку квантованный сигнал может меняться только ступенчато, то возникает погрешность АЦП, называемая *погрешностью квантования*, которая изменяется в диапазоне плюс-минус половина интервала квантования Q , т.е. $\pm 0,5Q$. Погрешность квантования может рассматриваться как шум, добавленный к аналоговому напряжению, поэтому ее иногда также называют *шумом квантования* (рис. 7.4). Погрешность квантования, или шум квантования, может быть уменьшена при использовании преобразователя, работающего с большим количеством разрядов.

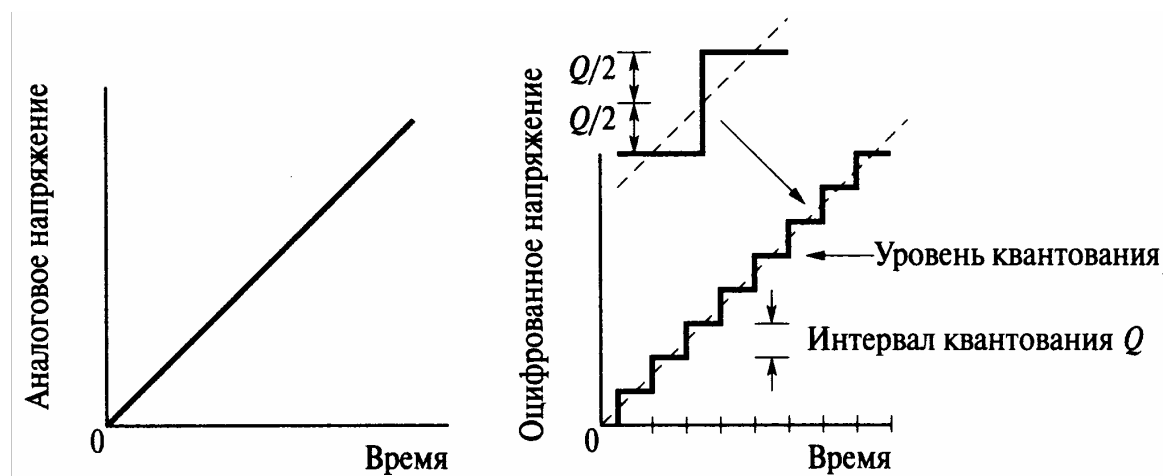


Рис. 7.4. Аналоговый сигнал и его цифровой эквивалент

¹ Аналого-цифровое преобразование состоит из трех процедур: *дискретизации по времени, квантования по уровню и кодирования.*

Длина двоичного слова определяется *дискретностью* (разрешением) элемента, т.е. самым маленьким изменением сигнала U_A , которое приведет к изменению выходного сигнала. Если аналого-цифровой преобразователь работает с длиной слова, равной n разрядам, то изменение от 0 до 1 в разряде b_n и есть минимальное изменение выходного сигнала, следовательно, дискретность может быть определена как $U_R 2^{-n}$.

Максимальное значение (U_A) аналогового напряжения, или *полный диапазон шкалы*, определяется словом, у которого все разряды установлены в «1», т.е.

$$U_A = U_R(1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3} + \dots + 1 \cdot 2^{-n}).$$

Значение выражения в скобках равно $(1 - 2^{-n})$, следовательно:

$$U_A = U_R(1 - 2^{-n}).$$

Для слова длиной более четырех разрядов выражение в скобках имеет значение, очень близкое к единице, поэтому максимальное значение аналогового напряжения практически определяется величиной опорного напряжения.

Время преобразования аналого-цифрового преобразователя — это время, которое необходимо преобразователю для создания на выходе двоичного слова после того, как на его вход поступил аналоговый сигнал.

7.3.1. Метод линейно возрастающего напряжения

Такой метод называется еще *методом одностадийного интегрирования* и заключается в преобразовании сигнала напряжения во временной сигнал. В начале процесса измерения преобразователь начинает вырабатывать линейно возрастающее напряжение $L(t)$, которое постоянно сравнивается с входным напряжением X (рис. 7.5).

Одновременно вырабатывается стартовый импульс, открывающий логическую схему, которая позволяет временным импульсам поступать на вход счетчика. Линейное напряжение будет расти до тех пор, пока оно не станет равным входному напряжению. В момент равенства напряжений вырабатывается еще один управляющий импульс, закрывающий доступ временных импульсов на вход счетчика. Таким образом, счетчик подсчитывает количество временных импульсов от начала измерений до момента равенства линейного напряжения и входного сигнала.

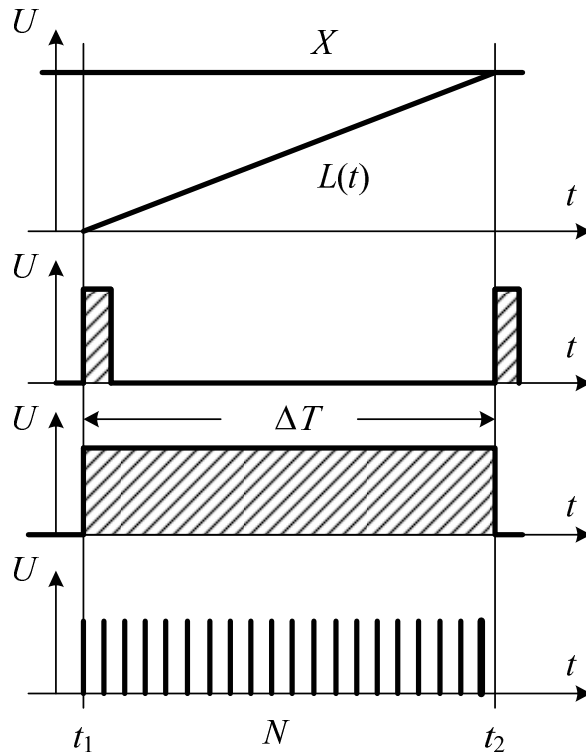


Рис. 7.5. Диаграммы работы АЦП, использующего метод линейно возрастающего напряжения

Подсчитанное количество импульсов N и есть мера величины входного напряжения.

7.3.2. Метод последовательного счета

При использовании этого метода происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины x с известной квантованной величиной x_k , изменяющейся (возрастающей или убывающей) во времени скачками, причем каждый скачок соответствует шагу (ступени) квантования по уровню (рис. 7.6).

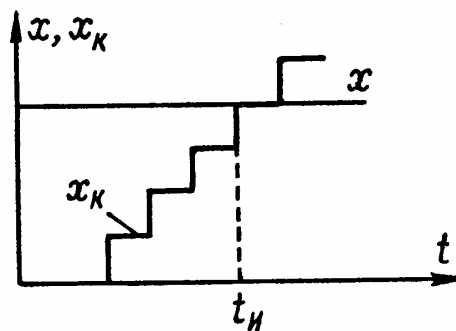


Рис. 7.6. Диаграмма преобразования непрерывного аналогового сигнала в позиционный код

Число ступеней, при котором наступает равенство $x_k(t_u)=x$ (с некоторой погрешностью), равно номеру отождествляемого уровня квантования. В процессе сравнения образуется единичный код, соответствующий номеру отождествляемого уровня квантования. Возможно инверсное преобразование, при котором известная постоянная величина сравнивается с равномерно квантуемой величиной, функционально связанной с измеряемой величиной.

7.3.3. Метод последовательного приближения

Данный метод иногда еще называют *методом поразрядного уравнивания* или *методом сравнения и вычитания*. В методе используется широко известный оптимальный алгоритм пошагового узнавания числа, который можно условно назвать «больше-меньше». В первом шаге измеряемая величина сравнивается с половинным значением всего диапазона измерений. В каждом последующем шаге остаток той части диапазона, в котором расположено значение измеряемой величины, опять делится пополам, и так до тех пор, пока значение измеряемой величины не сравняется с очередным пошаговым значением или не будет расположено между двумя квантованными уровнями преобразователя. При этом логическое «больше-меньше» отражается набором сигналов «ноль–единица». Превышение сигнала сравнения над измеряемым сигналом фиксируется индексом «0», и наоборот, превышение измеряемого сигнала над сигналом сравнения фиксируется индексом «1». Таким образом, в результате преобразования автоматически получается позиционный двоичный код. Алгоритм преобразования показан на временных диаграммах (рис. 7.7).

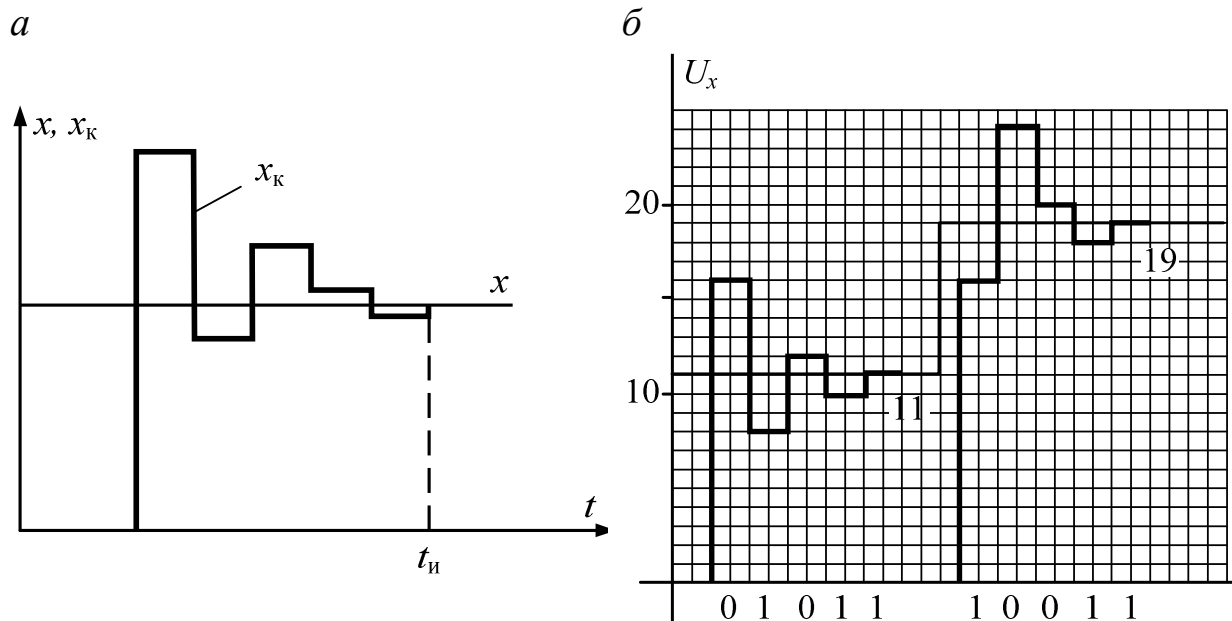


Рис. 7.7. Диаграммы реализации поразрядного уравнивания сигнала и преобразования его в двоичный код:
a – общий вид алгоритма преобразования; *б* – примеры преобразований напряжений 11 В и 19 В

Метод поразрядного уравнивания обладает большим быстродействием по сравнению с вышеописанными методами, однако требует более сложной схемной реализации. В настоящее время данный метод приобрел наиболее широкое распространение.

7.3.4. Метод считывания

Данный метод основан на одновременном сравнении входного аналогового сигнала с системой постоянных квантованных уровней. Результат измерения сигнала выделяется только на одном из уровней при условии, что входной сигнал больше этого уровня, но меньше следующего (рис. 7.8). Известная величина, равная измеряемой ($x_{n-3} = x_{kn}$), дает номер отождествляемого уровня квантования, в соответствии с которым образуется код.

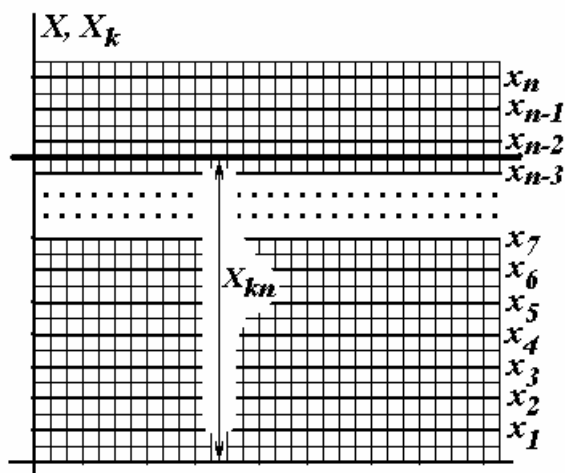


Рис. 7.8. Диаграмма работы преобразователя сигналов по методу считывания

Данная система преобразования сигнала отличается исключительным быстродействием, поскольку собственно на преобразование сигнала не требуется времени. Однако построение системы из большого количества высокостабильных уровней сравнения является сложной схемной задачей.

7.3.5. Классификация цифровых измерительных устройств

В зависимости от способа преобразования непрерывной величины в код выделяют несколько групп цифровых измерительных устройств.

ЦИУ последовательного счета основаны на использовании метода последовательного счета. Отличительный признак таких приборов состоит в том, что измеряемая величина сначала преобразуется в числоимпульсный код, который затем преобразуется в другие коды, удобные для управления отсчетным устройством и для выдачи кода в другие устройства.

ЦИУ последовательного приближения (поразрядного уравнивания, кодово-импульсные) основаны на использовании метода последовательного приближения.

ЦИУ считывания строятся с использованием метода считывания.

Известны ЦИУ, в которых применяется комбинация способов преобразования.

По измеряемой величине ЦИП разделяют на вольтметры, частотомеры, фазометры, омметры, вольтометры и т. д. В зависимости от наличия усреднения измеряемой величины ЦИУ делят на приборы, измеряющие мгновенное значение, и приборы, измеряющие среднее значение за определенный интервал времени (интегрирующие). Кроме того, все ЦИУ делят на группы по точности, быстродействию, надежности. По режиму работы ЦИУ разделяют на циклические и следящие.

В *циклических ЦИУ* весь процесс преобразования протекает всегда независимо от размера измеряемой величины по заданной программе от начала до конца. В *следящих ЦИУ* процесс преобразования начинается только при отклонении измеряемой величины от ранее измеренного размера на определенное приращение. Характер процесса преобразования зависит от приращения измеряемой величины.

7.4. Основные характеристики и погрешности цифровых измерительных устройств

7.4.1. Статическая характеристика преобразования и статические погрешности

На рис. 7.9 показана статическая характеристика преобразования *идеального ЦИУ*, где x – измеряемая величина; N – выходной код; x_{k1}, \dots, x_{k5} – уровни квантования; Δx_k – шаг квантования. Под идеальным ЦИУ понимают устройство, осуществляющее отождествление измеряемой величины с ближайшим уровнем квантования, имеющее идеальное расположение уровней квантования и идеальное сравнивающее устройство, точно устанавливающее момент равенства x_k и x .

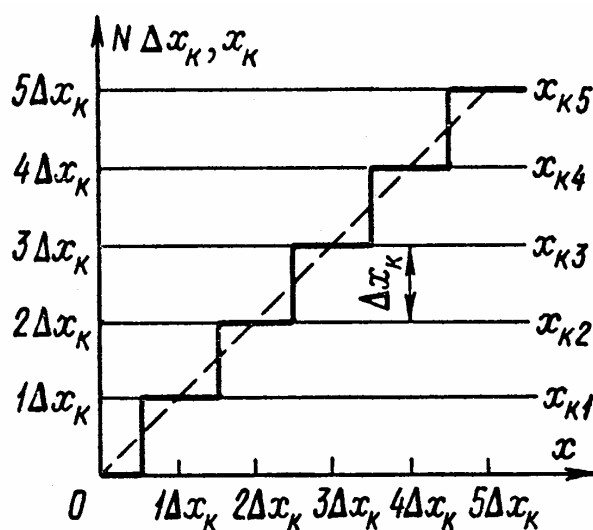


Рис. 7.9. Статическая характеристика преобразования идеального ЦИУ

Идеальное ЦИУ, как следует из рис. 7.9, имеет только погрешность дискретности. Изменение способа отождествления уровня квантования, отклонение реальных уровней квантования от идеального положения, применение реального сравнивающего устройства приводит к изменению статической характеристики, погрешности дискретности и к появлению инструментальных составляющих погрешности.

Рассмотрим *статические погрешности*. Основная погрешность ЦИУ складывается обычно из следующих четырех составляющих:

- погрешности дискретности Δx_0 ;
- погрешности реализации уровней квантования Δx_p , возникающей из-за того, что измеряемая величина квантуется в соответствии с реальными значениями уровней, а отсчет производится в соответствии с принятыми значениями (номерами);
- погрешности, обусловленные наличием порога чувствительности Δx_c сравнивающего устройства, возникающие при сравнении неизвестной величины с известной;
- погрешности Δx_n , вызванные действием помех на ЦИУ.

Составляющие Δx_p , Δx_c , Δx_n обусловлены несовершенством ЦИУ, и поэтому их называют составляющими инструментальной погрешности. Погрешность дискретности – методическая погрешность.

Погрешность дискретности обычно рассматривается при разных способах отождествления уровня квантования. Для упрощения анализа положим, что $\Delta x_p=0$, $\Delta x_u=0$, $\Delta x_n=0$.

Погрешность дискретности при отождествлении рассмотрим на примере ЦИУ последовательного счета, котором величина x сравнивается с известной величиной x_k , изменяющейся во времени скачками в один квант (рис. 7.10).

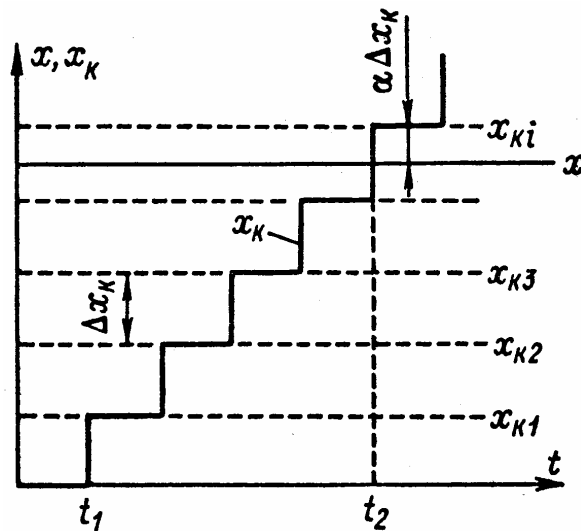


Рис. 7.10. Диаграмма сравнения неизвестной величины x и известной квантованной величины

Определение отождествляемого уровня происходит при установлении равенства x_k и x , или, точнее, при выполнении условия $x_k \geq x$. Выходной сигнал (показания) ЦИУ должен устанавливаться в соответствии с отождествляемым уровнем. Положим, что отождествление неизвестной величины x происходит с ближайшим большим или равным уровнем квантования, т.е. в данном случае (см. рис. 7.10) с уровнем x_{ki} . Следовательно, в момент времени t_2 установится соотношение $x_{ki} - x = \alpha \Delta x_k$, где α – коэффициент, значения которого могут быть в пределах от 0 до 1. Погрешность ЦИУ при этом $\Delta x = x_{ki} - x = \alpha \Delta x_k$. Эта погрешность есть погрешность дискретности ($\Delta x = \Delta x_d$), принимающая различные значения в пределах от 0 до Δx_k . Поскольку α зависит от измеряемой величины x , которая является случайной величиной, то погрешность дискретности также имеет случайный характер.

Погрешность реализации уровней квантования рассмотрим на примере первого способа отождествления при смещении всех уровней

квантования на $x_{см}$. Тогда в момент установления равенства x_k и x примем $(x_{ki} + x_{см}) - x = \alpha \Delta x_k$, откуда погрешность ЦИУ $\Delta x = x_{ki} - x = \alpha \Delta x_k - x_{см}$. В этом случае появляется составляющая погрешности, обусловленная смещением уровней, т.е. погрешность реализации уровней $\Delta x_p = x_{см}$. Если смещение уровней зависит от номера уровня, то погрешность Δx_p зависит от x . Так как $x_{см}$ может иметь систематическую и случайную составляющие, то погрешность Δx_p также может иметь систематическую и случайную составляющие.

Для определения влияния порога чувствительности $\Delta x_{ср}$ сравнивающего устройства (СУ) примем $\Delta x_p = 0$, $\Delta x_n = 0$ и будем считать, что величина x_k возрастает во времени скачками в один квант (рис. 7.11) и срабатывание СУ происходит при $x_k \geq x + x_{ср}$.

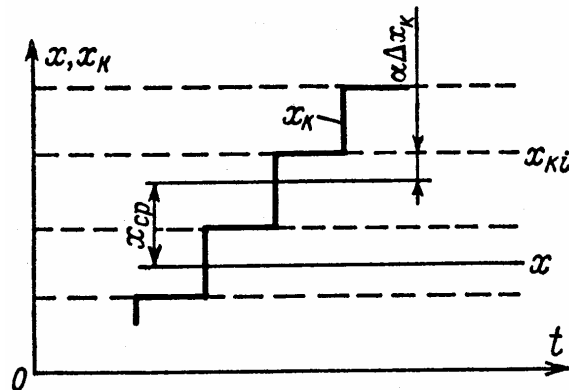


Рис. 7.11. Влияние порога чувствительности сравнивающего устройства (компаратора) на погрешность ЦИУ циклического действия

В этом случае погрешность ЦИУ $\Delta x = x_{ki} - x = \alpha \Delta x_k + x_{ср}$, где $\alpha = 0 \div 1$. Как видно, вторая составляющая — погрешность, вызванная наличием порога срабатывания СУ, т.е. $\Delta x_u = x_{ср}$. Погрешность Δx_u может иметь систематическую и случайную составляющие.

7.4.2. Погрешности квантования временного интервала

Рассмотрим погрешности, возникающие в ЦИУ при квантовании временного интервала. Данный вид погрешности наблюдается, например, в преобразователях, использующих времяимпульсное преобразование сигнала.

Временной интервал t_x измеряется путем счета квантовых импульсов стабильной частоты $f_0 = 1/T_0$, прошедших в счетчик импульсов за время t_x (рис. 7.12).

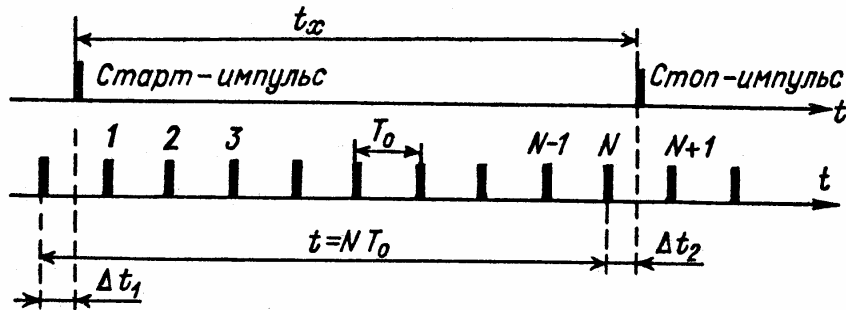


Рис. 7.12. Погрешности ЦИУ при квантовании временного интервала

В общем случае t_x не кратно T_0 , и поэтому возникает погрешность $\Delta t = t - t_x$, где $t = NT_0$ (N – число импульсов, зарегистрированных счетчиком импульсов). Эта погрешность зависит от временного сдвига старт- и стоп-импульсов относительно квантовых импульсов и выражается в виде двух составляющих: Δt_1 и Δt_2 , т.е. $\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2$.

Первая составляющая Δt_1 – погрешность, вызванная случайным расположением начала шкалы, или *погрешность синхронизации*. Она всегда находится в пределах от 0 до T_0 и имеет равномерный дифференциальный закон распределения, так как появление старт-импульса между квантовыми импульсами равновероятно. Вторая составляющая погрешности Δt_2 – погрешность, вызванная случайным расположением стоп-импульса относительно квантовых импульсов и соответствующая отождествлению с ближайшим меньшим или равным уровнем квантования. Дифференциальный закон распределения этой погрешности – равномерный в пределах от $-T_0$ до 0.

Результирующая предельная погрешность $\Delta t_m = \pm T_0$; относительная результирующая предельная погрешность

$$\delta_m = \pm T_0 / t_x \approx \pm T_0 / (NT_0) = \pm 1/N.$$

7.4.3. Характеристики цифровых измерительных устройств

Разрешающая способность. ЦИУ характеризуют видом кода, выдаваемого во внешние устройства, и числом разрядов кода. Предел измерений и число разрядов кода определяют значение одной единицы младшего разряда кода. Характеристикой ЦИУ является разрешающая способность, которую определяют равной числу уровней квантования или обратному числу уровней квантования. Например, для прибора с диапазоном измерения $U_N = 20$ В используется $N = 1000$ уровней квантования (три десятичных разряда кода). Тогда разрешающая способность прибора $\Delta R = U_N / 1000 = 0,02$ В = 20 мВ.

Входное сопротивление. Оно влияет на потребляемую от исследуемого объекта мощность и в конечном итоге на результат измерения. Чтобы влияние на объект было минимальным, например у вольтметров, входное сопротивление делают по возможности большим. Если δ – допускаемая относительная погрешность измерения из-за падения напряжения на внутренней цепи источника измеряемого напряжения, то соотношение между входным сопротивлением вольтметра $R_{вх}$ и внутренним сопротивлением источника сигнала R_i должно быть $R_{вх}/R_i \geq \delta$.

У современных цифровых вольтметров постоянного тока входное сопротивление достигает 10^{10} Ом и более, а при использовании входного делителя – $10^6 - 10^7$ Ом.

Входная цепь ЦИУ может являться источником тока. Поэтому для ЦИУ нормируют предельное значение входного тока.

Для ЦИУ переменного тока эквивалентную схему входной цепи принимают как параллельно включенные резистор и конденсатор, сопротивление и емкость которых указывают в паспорте прибора.

Динамические характеристики. Для ЦИУ, время реакции которых превышает интервал времени между двумя измерениями, соответствующими максимально возможной для данного типа средств измерений частоте (скорости) измерений, указывают полные динамические характеристики аналоговой части и частные динамические характеристики: максимальную частоту измерений и погрешность датирования отсчета.

Если время реакции не превышает интервал времени между двумя измерениями, то устанавливают частные динамические харак-

теристики: время реакции, максимальную частоту измерений и погрешность датирования отсчета.

Погрешность датирования отсчета ЦИУ – интервал времени, начинающийся в момент начала цикла преобразования (запуска) ЦИУ и заканчивающийся в момент, когда значение изменяющейся измеряемой величины и значение выходного цифрового сигнала на данном цикле преобразования оказались равными.

Динамические свойства ЦИУ и входная измеряемая величина определяют динамические погрешности. Различают динамические погрешности первого и второго рода. *Динамические погрешности первого рода*, как и в аналоговых средствах измерений, обусловлены инерционностью элементов измерительной части ЦИУ.

Динамические погрешности второго рода в ЦИУ циклического действия возникают из-за того, что измерение производится в один момент времени, предположим t_2 , а результат измерения приписывают обычно либо началу цикла преобразования t_1 , либо концу цикла преобразования t_3 . Это приводит к погрешностям Δx_1 или Δx_2 (рис. 7.13).

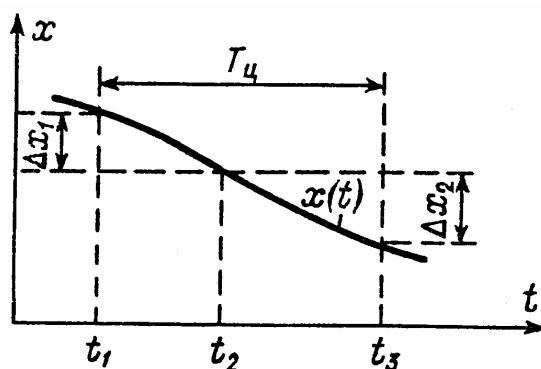


Рис. 7.13. Возникновение динамической погрешности второго рода в ЦИУ циклического действия

Максимальная приведенная динамическая погрешность второго рода равна $\gamma = \pm \Delta x / x_{\max} = x' T_u / x_{\max}$, где Δx – максимальное изменение измеряемой величины за цикл T_u ; x' – скорость изменения измеряемой величины; x_{\max} – максимальное значение измеряемой величины. При синусоидальном изменении измеряемой величины с частотой f максимальная динамическая погрешность второго рода $\gamma = 2\pi f T_u$.

Динамическая погрешность второго рода и погрешность датирования отсчета имеют одни и те же причины возникновения. Из полученных выражений следует, что динамическая погрешность второго рода, так же как и динамическая погрешность первого рода, ограничивает допустимую скорость (частоту) изменения измеряемой величины при заданном цикле $T_{ц}$.

К другим характеристикам ЦИУ относят *помехозащищенность* и *надежность*. Устанавливают следующие показатели надежности: безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

Цифровой вольтметр. Для обобщения рассмотренного материала по цифровым измерительным устройствам приведем упрощенную схему цифрового вольтметра, работа которого реализована на основе метода последовательного счета (рис. 7.14).

Основным элементом схемы вольтметра является аналого-цифровой преобразователь. В настоящее время существуют три различных метода построения схем АЦП: *последовательный*, *параллельный* и *последовательно-параллельный*.

Последовательный (последовательного счета) метод построения АЦП (рис. 7.14) основан на подсчете числа суммирований опорного напряжения младшего разряда, необходимого для получения напряжения, равного входному. При этом k -разрядный двоичный код одного отсчета определяется в схеме за 2^k интервалов дискретизации.

Начало преобразования входного непрерывного сигнала определяется временем поступления импульса запуска (на схеме – кнопка «Пуск»), который через RS -триггер T и электронный клапан, построенный на элементе $I-HE$ (&), подключает двоично-десятичный счетчик CT к выходу генератора тактовых (счетных) импульсов, который реализован на микросхеме $DD1$.

Одним из узлов АЦП является цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), в большинстве схемных решений он входит в АЦП. Четырехразрядный ЦАП в приведенной на рис. 7.14 схеме состоит из матрицы весовых сопротивлений, которые соединены с инвертирующим входом операционного усилителя OU , имеющим также резистор обратной связи $R_{o.c} = 21,6$ кОм. Так реализована схема преобразователя тока в напряжение.

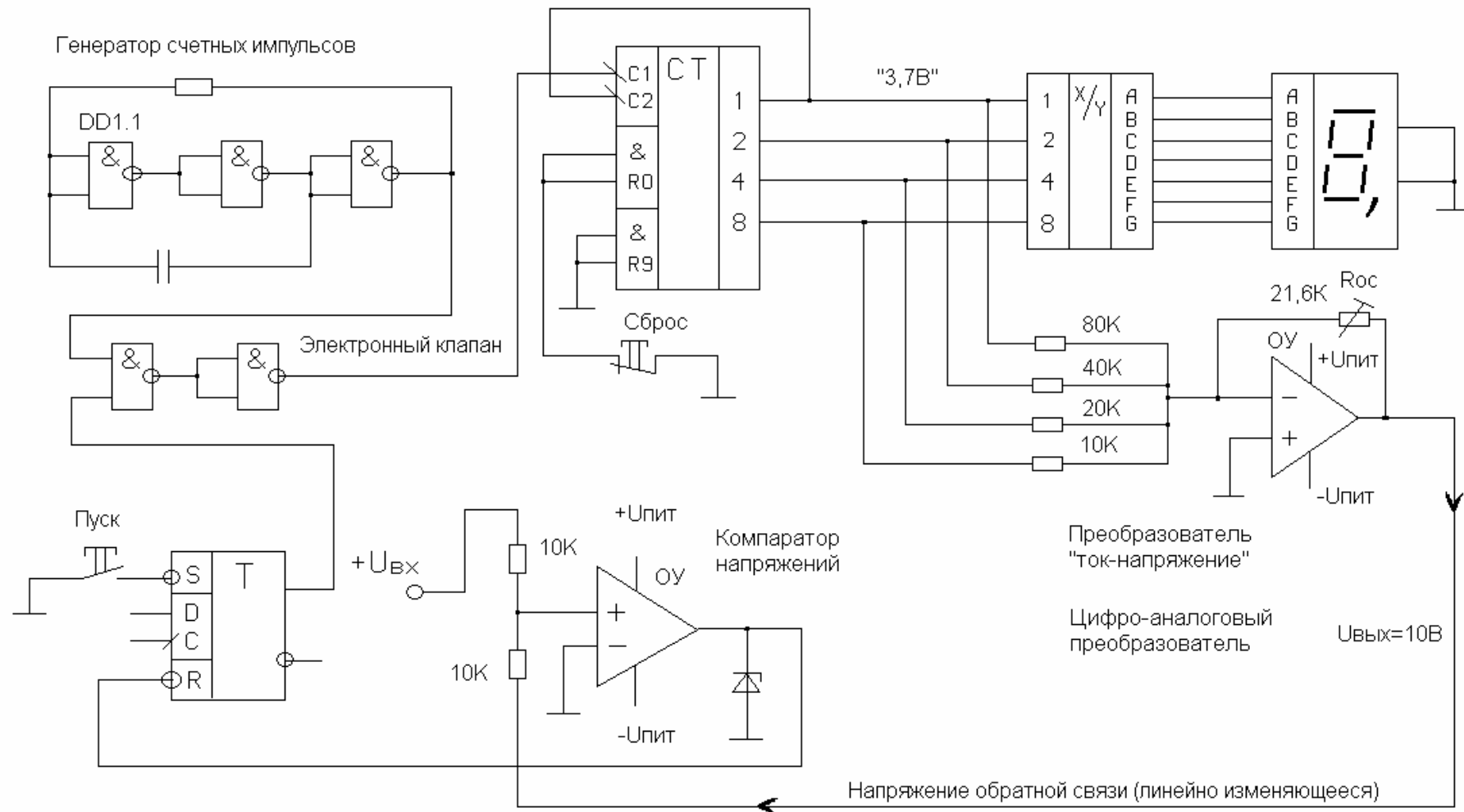


Рис. 7.14. Схема цифрового вольтметра

Для простоты будем считать, что напряжение логической «1» на выходах счетчика составляет 3,7 В, а логического «0» – 0 В. Эти напряжения, снимаемые с выходов счетчика в зависимости от кода, поступают на входы резисторов матрицы.

Таким образом, нарастающий от 0000 до 1001 двоичный цифровой код, поступающий на матрицу сопротивлений с выхода счетчика CT , формирует на выходе OY выходное напряжение (напряжение обратной связи), которое по цепи обратной связи подается на компаратор и сравнивается им с исследуемым входным напряжением $+U_{ex}$. Если $+U_{ex}$ больше напряжения обратной связи, то на выходе компаратора формируется логическая «1» и проход счетных импульсов с генератора на счетчик разрешен. При достижении равенства этих напряжений компаратор выдает логический «0» и через вход сброса R триггера T и электронный клапан на элементе И-НЕ (&) запрещает прохождение счетных импульсов с выхода генератора на счетный вход CI счетчика. Ни один тактовый импульс теперь не проходит к счетчику. В результате счет останавливается и на выходе счетчика получается четырехразрядный код, представляющий в момент окончания преобразования цифровой эквивалент выходного напряжения ЦАП.

Кодопреобразователь X/Y преобразует двоичный код, снимаемый с выхода счетчика, в код семисегментного индикатора и, таким образом, визуально отображает цифру, соответствующую измеренному прибором напряжению $+U_{ex}$.

Необходимо отметить, что для коэффициента усиления OY по напряжению в схеме ЦАП $K_u = R_{o.c}/R_{ex}$, где $R_{o.c} = 21,6$ кОм, а R_{ex} зависит от комбинации подключаемых к счетчику сопротивлений матрицы. Нетрудно видеть, что минимальное сопротивление матрицы (соответственно наибольший ток на входе OY) будет при максимальном коде на выходе счетчика. Умножая K_u на величину входного напряжения, получаем выходное напряжение $U_{вых} = K_u \cdot U_{ex}$. Поскольку величина напряжения, приложенного ко входу OY , всегда будет постоянной и равной напряжению логической «1» на выходе счетчика (в нашем случае 3,7 В), то расчет напряжения на выходе ЦАП для разных кодовых комбинаций сводится к расчету сопротивления матрицы и подбору резистора обратной связи $R_{o.c}$, так чтобы максимальное напряжение обратной связи было не больше напряжения питания микросхемы OY компаратора напряжений (другими словами, предела из-

меряемого входного напряжения $+U_{вх}$). Стабилитрон в схеме компаратора предназначен для фиксации уровней выходного напряжения вблизи 3,3 и 0 В. Без стабилитрона мы получили бы +9 В и –9 В. Напряжения +3,3 и 0 В более совместимы с логическими уровнями цифровых микросхем (в нашем случае – триггера).

Контрольные вопросы

1. Дайте определение цифрового измерительного прибора.
2. Какие две операции совершаются с непрерывной величиной при ее преобразовании в дискретную (цифровую) величину?
3. Перечислите основные узлы цифрового измерительного прибора.
4. Чем обусловлена погрешность квантования по уровню?
5. В чем основная суть теоремы Котельникова?
6. Перечислите основные достоинства цифровых измерительных приборов.
7. Объясните понятие системы счисления.
8. Перечислите виды кодов, используемых в цифровой технике.
9. Что такое погрешность квантования (шум квантования) и как она может быть уменьшена?
10. Как подразделяются АЦП по методу преобразования входного сигнала в цифровой код?
11. Какие специфические погрешности присущи цифровым устройствам?
12. Назовите характеристики ЦИУ.
13. Объясните принцип действия цифрового вольтметра, реализованного на основе метода последовательного счета.
14. Для каких целей в цифровых измерительных устройствах используются компараторы на операционных усилителях?

Глава 8. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

8.1. Общие сведения

Развитие научных исследований, разработка новых устройств и систем с использованием современных радиотехнологий, усложнение их производства, а также повышение требований к точности измерений и их быстродействию привели к необходимости измерять и контролировать одновременно от сотен до нескольких тысяч различных физических величин. Естественная физиологическая ограниченность возможностей человека в восприятии и обработке таких больших объемов измерительной информации стала главной причиной появления автоматизированных средств измерений и контроля.

Автоматизация процесса измерений дает значительный выигрыш во времени и в большинстве случаев существенно повышает точность измерений.

Современные средства измерений достигли достаточно высокого уровня развития: в основном они являются цифровыми и поэтому имеют наивысшие точности. Именно переход к построению цифровых средств измерений привел к созданию автоматизированных средств измерений. По уровню автоматизации все средства измерений делятся на три основные группы:

- *неавтоматические*, позволяющие непосредственно оператору провести измерения;
- *автоматизированные*, способные провести в автоматическом режиме одну измерительную операцию или ее часть;
- *автоматические*, производящие в автоматическом режиме измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов, регистрацией, передачей, хранением данных и выработкой управляющих сигналов.

В настоящее время все большее распространение получают автоматизированные и автоматические средства измерений. Это связано с широким использованием в средствах измерений электронной, микропроцессорной и компьютерной техники. Для названия этих средств часто применяют обобщенный термин «*автоматизированные средства измерений*». К автоматизированным средствам измерений отно-

сят автономные многофункциональные цифровые приборы на основе микропроцессоров и измерительные системы.

8.1.1. Автономные многофункциональные цифровые приборы

Автономные многофункциональные цифровые приборы содержат микропроцессор, работают по жесткой программе и предназначены для измерений заданных физических величин, а также параметров сигналов или цепей. Это цифровые приборы, в которых часть операций осуществляется автоматически.

В автономных микропроцессорных приборах отдельной магистрали нет и все элементы подключают к магистрали микропроцессора. В них может быть не предусмотрено программирование или перепрограммирование микропроцессора в процессе работы. Необходимые программы обработки хранятся в ПЗУ, по мере надобности оператор вызывает их с помощью клавиатуры.

Микропроцессор может выполнять сервисные и вычислительные функции, а также самодиагностику прибора в целом. К сервисным функциям относят выбор диапазона измерений, переключение диапазонов, определение полярности входного напряжения, коммутацию входных цепей. В частности, в осциллографах автоматически устанавливается длительность развертки, осуществляется ее синхронизация, выбор масштаба по оси ординат (оси напряжения). К сервисным функциям можно отнести и некоторые операции по коррекции погрешностей: калибровку прибора, коррекцию смещения нулевого уровня (так называемого «дрейфа нуля») в усилителе постоянного тока.

Вычислительные функции микропроцессора заключаются в статистической обработке результатов измерений: определении среднего значения и СКО. Возможно получение математических функций измеряемой величины: ее умножение и деление на константу, вычитание констант, что удобно при введении поправок, представлении измеряемой величины в логарифмическом масштабе. Часть сервисных функций можно реализовать и без микропроцессора на жесткой логике, однако вычислительные функции могут быть выполнены только с помощью микропроцессоров.

Автономные микропроцессорные приборы позволяют решать программным методом часть задач, решаемых в обычных приборах

аппаратными средствами. В частности, для измерений амплитудного, средневыпрямленного и среднеквадратического значений напряжения аппаратными методами необходимы соответствующие преобразователи. Ту же задачу можно решить с помощью микропроцессорного прибора, преобразовав аналоговый измеряемый сигнал в цифровой с помощью АЦП, и затем по соответствующим программам вычислить требуемые параметры сигнала. Возможности прибора можно расширить, нарастив программное обеспечение, например введя программы для спектрального анализа и статистической обработки. При этом аппаратная часть, содержащая АЦП, не усложняется, а меняется только программное обеспечение. Поэтому в ряде случаев микропроцессорные приборы можно делать многофункциональными, что позволит сократить парк средств измерений, необходимых для научных и производственных целей.

В качестве примера автономного цифрового прибора рассмотрим мультиметр со встроенным микропроцессором.

В измерительных приборах такого типа микропроцессоры (или программируемые микроконтроллеры) могут выполнять следующие операции: автокалибровку измерительного тракта, автоматическую установку пределов измерения, корректировку погрешностей, статистическую обработку данных, определение абсолютных и процентных отклонений от номинальных значений, арифметические операции; обработку данных по заданным алгоритмам, визуализацию и регистрацию данных, управление процессом измерения по заданной программе, диагностику функциональных узлов прибора, кодирование и передачу сигналов по каналу связи.

Применение микропроцессора существенно изменяет компоновку схемы прибора. При обычном варианте построения прибор нуждается в большом количестве логических схем для управления процессом измерения, выводом измерительной информации на цифровой индикатор, работой входных и выходных устройств и т.п.

Мультиметр, схема которого показана на рис. 8.1, является многофункциональным измерительным прибором, позволяющим измерять несколько параметров электрических сигналов и компонентов цепей.

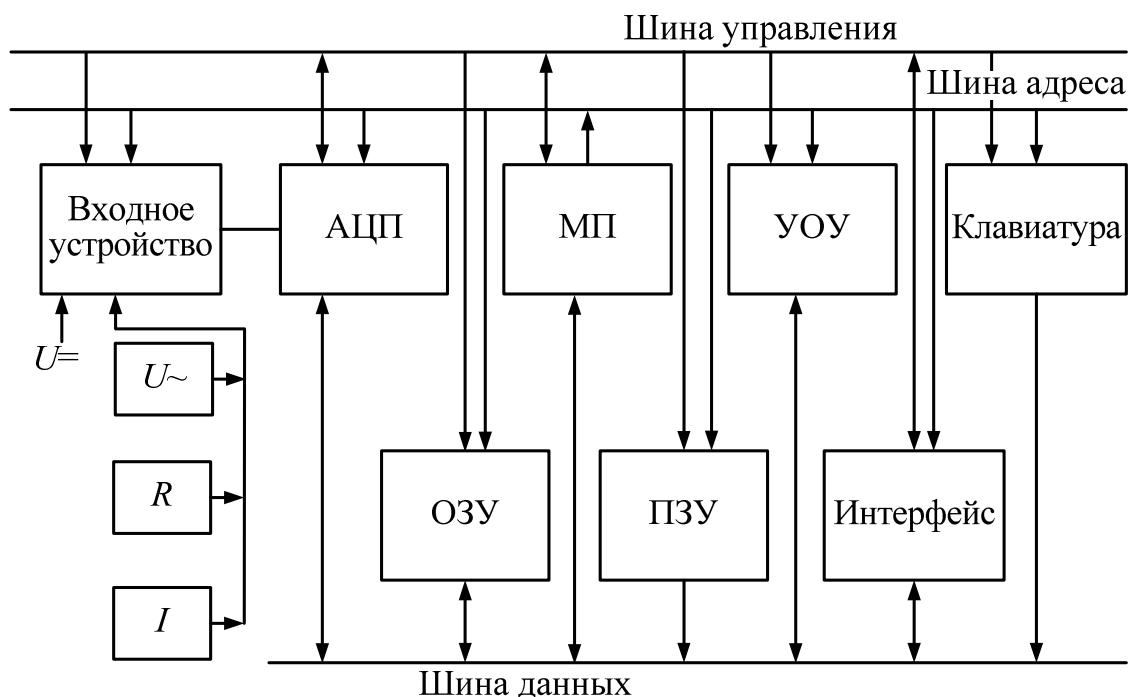


Рис. 8.1. Структурная схема цифрового мультиметра

Функциональные возможности мультиметра существенно шире, чем у обычных вольтметров или амперметров. Прибор построен на основе принципа магистральной связи между отдельными функциональными узлами. Поэтому в зависимости от назначения прибора может значительно изменяться набор преобразователей во входном устройстве и набор вычислительных и управляющих устройств в микропроцессорной части.

Программа работы мультиметра, как правило, вводится с клавиатуры на языке символьных обозначений. Обычно имеется достаточно широкий набор стандартных процедур:

- умножение на константу;
- вычисление отклонений от нормированной величины;
- вычисление отношения двух величин;
- вычисление статистических характеристик измерений;
- добавление или вычитание заданной величины;
- запоминание серии отсчетов и т.п.

Мультиметры со встроенным микропроцессором данного типа позволяют осуществлять автокалибровку. При этом вначале измеряются данные внутреннего эталона, а затем значения неизвестной величины и математическими методами исключается погрешность.

В режиме внутренней синхронизации цикл калибровки выполняется перед каждым измерением. Ошибки смещения нуля и усиления компенсируются путем измерения нулевого уровня сигнала (т.е. при замкнутном входе) и сравнения его с фиксированным эталонным сигналом. В мультиметре программным путем предусматривается автоматический контроль измерений. Генератор тактовых импульсов задает моменты начала и конца измерений, а также интервалы между ними, что позволяет проводить измерения без наблюдения оператора в течение определенного времени и заносить результаты измерений в память. Устройство отображения и индикации (УОИ) используется не только для цифровой индикации, но и для отображения букв и слов, поясняющих режимы работы и подсказывающих оператору, что необходимо делать, чтобы исключить ошибки в измерительных процедурах.

Мультиметры могут быть *автономного* и *системного* назначения. В состав мультиметров системного назначения входит интерфейс для передачи информации в двоичном или двоично-десятичном коде.

8.1.2. Измерительные системы

Измерительные системы (ИС) – это совокупность функционально объединенных средств измерений, компьютерной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления. Примерами могут служить системы, развернутые на крупных предприятиях и предназначенные для измерения большого количества параметров и контроля технологического процесса производства какого-либо изделия, например изделий микроэлектроники.

Назначение любой измерительной системы, необходимые функциональные возможности, технические параметры и характеристики в решающей степени определяются *объектом исследования*, для которого данная система создается. Структура современных ИС довольно разнообразна и быстро развивается, во многом зависит от решаемых задач. Приведем одну из возможных упрощенных классификаций, учитывающую специфику электро- и радиоизмерений (рис. 8.2).

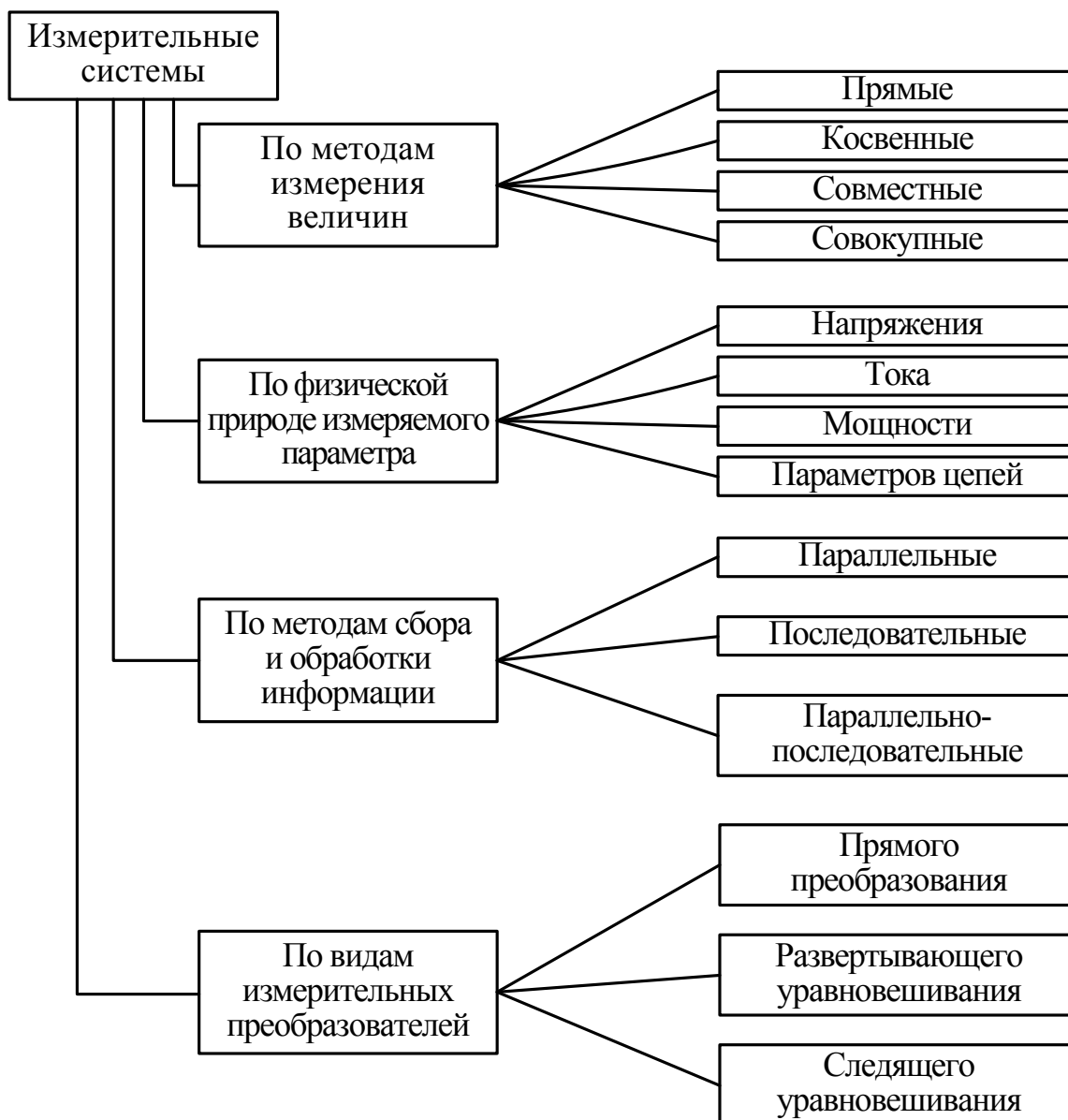


Рис. 8.2. Упрощенная классификация измерительных систем

В зависимости от выполняемых функций измерительные системы можно разделить на три основных вида: измерительные системы измерения и хранения информации (условно назовем их *прямыми измерительными системами*), контрольно-измерительные (автоматического контроля) и телеизмерительные системы. К ИС относятся также системы распознавания образов и системы технической диагностики. По числу измерительных каналов измерительные системы подразделяют на одно-, двух-, трех- и многоканальные (многомерные). Для совместных, совокупных измерений часто используют многоканальные, аппроксимирующие системы.

Наиболее бурно в настоящее время разрабатываются и внедряются прямые измерительные системы. Иногда их называют *гибкими измерительными системами*.

Основная особенность прямых измерительных систем – возможность программным способом перестраивать систему для измерений различных физических величин и менять режим измерений. Никаких изменений в аппаратной части при этом не требуется.

Прямые измерительные системы можно условно классифицировать следующим образом:

- информационно-измерительные системы (ИИС);
- измерительно-вычислительные комплексы (ИВК);
- компьютерно-измерительные системы (КИС).

Информационно-измерительные системы. Самым широким классом прямых измерительных систем являются информационно-измерительные системы (иногда их обозначают термином «измерительные информационные системы»).

ИИС предназначены для целенаправленного оптимального ведения измерительного процесса и обеспечения смежных систем высшего уровня достоверной информацией. Основные функции ИИС – получение измерительной информации от объекта исследования, ее обработка, передача, представление информации оператору или(и) компьютеру, запоминание, отображение и формирование управляющих воздействий.

Информационно-измерительная система должна управлять измерительным процессом или экспериментом в соответствии с принятым критерием функционирования; выполнять возложенные на нее функции в соответствии с назначением и целью; обладать требуемыми показателями и характеристиками точности, помехоустойчивости, быстродействия, надежности, пропускной способности, адаптивности, сложности и пр.; отвечать экономическим требованиям, предъявляемым к способам и форме представления информации, размещения технических средств; быть приспособленной к функционированию с измерительными информационными системами смежных уровней иерархии и другими ИИС, т.е. обладать свойствами технической, информационной и метрологической совместимости, а также допускать возможность дальнейшей модернизации и развития.

В процессе функционирования информационно-измерительной системы, как и любой другой технической системы, происходит целе-

направленное преобразование входной информации в выходную. Это преобразование выполняется либо автоматически с помощью аппаратуры технического обеспечения, либо совместно оперативным персоналом и аппаратурой технического обеспечения в сложных ИИС, ИВК и КИС.

Применение современных средств схемотехники (микросхем, микропроцессоров и т.д.) коренным образом меняет принципы построения ИИС. Кроме того, методы достаточно обоснованного определения информационных потоков дают возможность уменьшить их избыточность. Это позволяет ставить задачу о возможно максимальном переносе обработки измерительной информации к месту ее формирования, т.е. перейти к конвейерной обработке измерительной информации в распределенной ИИС. В целом такая система состоит из следующих основных частей: системы первичных преобразователей (датчиков), устройств сбора и первичной обработки информации, средств вторичной обработки информации, устройств управления и контроля, устройств связи с другими системами объекта, накопителей информации.

По организации *алгоритма функционирования* различают следующие виды информационно-измерительных систем:

- с заранее заданным алгоритмом работы, правила функционирования которых не меняются. Их можно использовать только для исследования объектов, работающих в постоянном режиме;
- программируемые, меняющие алгоритм работы по заданной программе, составляемой в соответствии с условиями функционирования объекта исследования;
- адаптивные, чей алгоритм работы, а часто и структура, изменяются, приспособляясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта;
- интеллектуальные, обладающие способностью к перенастройке в соответствии с изменяющимися условиями функционирования и способные выполнять все функции измерения и контроля в реальном масштабе времени.

Математическое, программное и информационное обеспечение входит в состав только ИИС с цифровыми вычислительными комплексами. Математическое обеспечение – это аналитические (математические) модели объекта исследования (измерения) и вычислительные алгоритмы.

Математическая модель объекта измерения включает в себя описание взаимодействия между переменными входа и выхода для установившегося и переходного состояний, т.е. модели статики и динамики, а также граничные условия и допустимое изменение переменных процесса. Форма записи математической модели может быть различна: алгебраические и трансцендентные уравнения, дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных. Могут использоваться переходные и передаточные функции, частотные и спектральные характеристики и пр. Различают три основных метода получения математических моделей исследования ИИС: аналитический, экспериментальный, экспериментально-аналитический.

В последние годы при создании большинства ИС часто используют математическое моделирование, реализующее цепочку: объект – модель – вычислительный алгоритм – программа для компьютера – расчет на компьютере – анализ результатов расчета – управление объектом исследования. Алгоритм измерения может быть представлен *программно, словесно, аналитически, графически* или сочетанием этих методов. Последовательность действий при этом не произвольна, а реализует тот или иной метод решения задачи. Во всех случаях она должна быть настолько точно сформулирована, чтобы не осталось места для различных двусмысленностей.

Программное обеспечение ИИС включает системное и общее прикладное программное обеспечение, в совокупности образующее математическое обеспечение, реализуется программной подсистемой. Системное программное обеспечение – это совокупность программного обеспечения компьютера, используемого в ИИС, и дополнительных программных средств, позволяющих работать в диалоговом режиме; управлять измерительными компонентами; обмениваться информацией внутри подсистем комплекса; автоматически проводить диагностику технического состояния.

По существу, программное обеспечение ИИС представляет собой взаимодополняющую, взаимодействующую совокупность подпрограмм, реализующих:

- типовые алгоритмы эффективного представления и обработки измерительной информации, планирования эксперимента и других измерительных процедур;

- метрологические функции комплекса (аттестацию, поверку, экспериментальное определение метрологических характеристик и т.п.);

- архивирование данных измерений.

Информационное обеспечение определяет способы и конкретные формы информационного отображения состояния объекта исследования в виде документов, диаграмм, графиков, сигналов для их представления обслуживающему персоналу и компьютеру для дальнейшего использования в управлении.

Измерительную систему в целом охватывает метрологическое обеспечение (рис. 8.3).

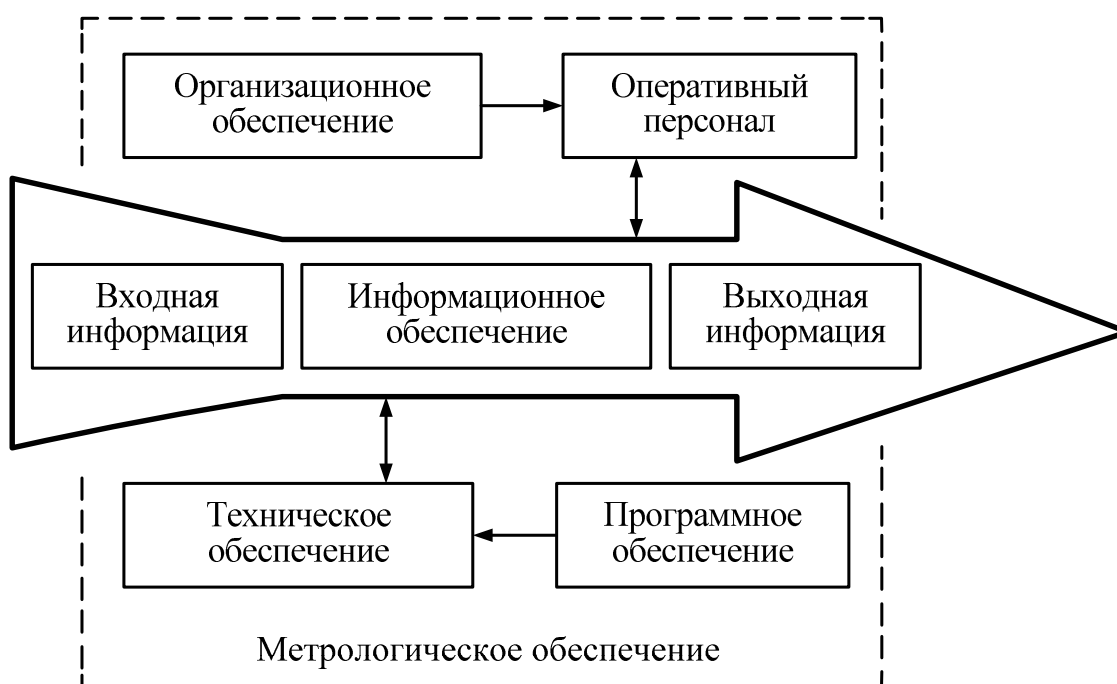


Рис. 8.3. Структура обеспечения ИИС

Структура технической подсистемы ИИС состоит из следующих элементов:

- блока первичных измерительных преобразователей (датчиков);
- средств вычислений электрических величин (измерительных компонентов);
- совокупности цифровых устройств и компьютерной техники (вычислительных компонентов);
- мер текущего времени и интервалов времени;

- устройств ввода-вывода аналоговых и цифровых сигналов с нормированными метрологическими характеристиками;
- блока вторичных измерительных преобразователей;
- совокупности элементов сравнения, мер и элементов описания – норм;
- блока преобразователей сигнала, цифровых табло, дисплеев, элементов памяти и др.;
- различных накопителей информации.

Кроме описанных, в систему может входить ряд устройств согласования со штатными системами объекта, с телеметрией и проч.

Важное значение имеет эргономическое, эффективное и наглядное построение форм дисплея и управляющих элементов, называемых *интерфейсом пользователя*, обеспечивающих взаимодействие оператора с компьютером. Эффективность интерфейса заключается в быстром, насколько это возможно, развитии у пользователя простой концептуальной модели взаимодействия с ИИС. Другими важными характеристиками интерфейса пользователя являются его наглядность и конкретность, что обеспечивается с помощью последовательно раскрываемых окон, раскрывающихся вложенных меню и командных строк с указанием функциональных «горячих» клавиш.

В истории развития информационно-измерительных систем можно выделить ряд поколений.

Первое поколение характеризуется формированием концепции ИИС и системной организацией совместной работы средств получения, обработки и передачи количественной информации. Это были в основном системы централизованного циклического получения измерительной информации с элементами вычислительной техники на базе дискретных полупроводниковых элементов. Данный период (конец 50-х – начало 60-х гг. прошлого столетия) называют периодом *детерминизма*, так как для анализа в ИИС использовался хорошо разработанный аппарат аналитической математики.

Второе поколение связано с использованием адресного сбора информации и ее обработки с помощью встроженных ЭВМ. Элементную базу таких систем представляют микроэлектронные схемы малой и средней степени интеграции. Этот период (1970-е гг.) характеризуется решением целого ряда вопросов теории систем в рамках теории случайных процессов и математической статистики, поэтому его принято называть периодом *стохастичности*.

Для *третьего поколения* характерно широкое введение в информационно-измерительные системы БИС, микропроцессоров, микроЭВМ и промышленных функциональных блоков, совместимых между собой по информационным, метрологическим, конструктивным, энергетическим и эксплуатационным характеристикам, а также создание распределенных и адаптивных ИИС.

Четвертое поколение отличается появлением гибких перестраиваемых программируемых ИИС, что связано с развитием вычислительной техники. В элементной базе резко возрастает доля микросхем большой и сверхбольшой степени интеграции.

Пятое поколение бурно развивается в настоящее время, и это дань появлению адаптивных, интеллектуальных и виртуальных измерительных информационных систем, построенных на базе персональных компьютеров и современного математического и программного обеспечения.

Измерительно-вычислительные комплексы. Одной из разновидностей ИИС являются *измерительно-вычислительные комплексы* – функционально объединенная с помощью специальной многоканальной магистрали система (совокупность) средств измерений, вычислительной техники, устройств отображения информации и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения конкретной измерительной задачи. Основным признаком принадлежности измерительной системы к ИВК является наличие компьютера; программного управления средствами измерений; нормированных метрологических характеристик; блочно-модульной структуры, состоящей из технической (аппаратной) и программной (алгоритмической) подсистем.

По назначению ИВК делят на типовые, проблемные и специализированные.

Типовые комплексы предназначены для решения широкого круга типовых задач автоматизации измерений, испытаний или исследований независимо от области применения.

Проблемные комплексы разрабатывают для решения специфичной задачи в конкретной области автоматизации измерений.

Специализированные комплексы используются для решения уникальных задач автоматизации измерений, для которых разработка типовых и специализированных комплексов экономически нецелесообразна.

ИВК предназначены:

- для осуществления прямых, косвенных, совместных или совокупных измерений физических величин;
- управления процессом измерений и воздействия на объект измерений;
- представления оператору результатов измерений в требуемом виде.

Чтобы реализовать эти функции, ИВК должен:

- эффективно воспринимать, преобразовывать и обрабатывать электрические сигналы от первичных измерительных преобразователей;
- управлять средствами измерений и другими техническими устройствами, входящими в его состав;
- вырабатывать нормированные сигналы, являющиеся входными для средств воздействия на объект;
- оценивать метрологические характеристики и представлять результаты измерений в установленной форме.

8.1.3. Компьютерно-измерительные системы

В настоящее время сформировалось новое направление в метрологии и радиоизмерительной технике, связанное с развитием *компьютерно-измерительных систем* и их разновидности – *виртуальных* (виртуальный – кажущийся) *измерительных приборов*. Компьютерно-измерительная система обязательно включает в себя компьютер, работающий в режиме реального масштаба времени или, как теперь принято говорить, в режиме «on-line».

В последние годы персональные компьютеры используются не только как вычислительные средства, но и как универсальные измерительные приборы. Компьютерно-измерительные системы на основе персонального компьютера заменяют стандартные измерительные приборы (вольтметры, осциллографы, анализаторы спектра, генераторы и пр.) системой виртуальных приборов. Причем ряд этих приборов может быть активизирован (воспроизведен) на одном персональном компьютере одновременно.

К отличительным особенностям и основным преимуществам компьютерно-измерительных систем по сравнению с микропроцессорными приборами относятся:

- обширный фонд стандартных прикладных компьютерных программ, доступных для оператора, который позволяет решать широкий круг прикладных задач измерений (исследование и обработка сигналов, сбор данных с датчиков, управление различными промышленными установками и т. д.);
- возможность оперативной передачи данных исследований и измерений по локальным и глобальным компьютерным сетям (например, сети Интернет);
- высокоразвитый графический интерфейс пользователя, обеспечивающий быстрое освоение взаимодействия с системой;
- возможность использования внутренней и внешней памяти большой емкости;
- возможность составления компьютерных программ для решения конкретных измерительных задач;
- возможность оперативного использования различных устройств документирования результатов измерений.

В самом общем случае КИС может быть построена двумя способами: с последовательной или параллельной архитектурой.

В КИС с *последовательной архитектурой* (ее иногда называют *централизованной системой*) части системы, преобразующие анализируемые сигналы, обрабатывают их в последовательном режиме. Поэтому вся соответствующая электроника размещается на слотах компьютера. Достоинства такой архитектуры построения КИС очевидны: благодаря использованию принципа разделения обработки по времени стоимость системы невелика.

В КИС с *параллельной архитектурой* содержится ряд параллельных каналов измерения, каждый из которых имеет собственные узлы преобразования анализируемых сигналов, и только процессор компьютера работает в режиме мультиплексирования (т.е. объединения сигналов). Подобный принцип построения КИС позволяет проводить оптимизацию обработки сигналов в каждом канале независимо. В такой системе преобразование сигналов можно выполнять локально в месте расположения источника исследуемого сигнала, что позволяет передавать сигналы от измеряемого объекта в цифровой форме.

На рис. 8.4 показана обобщенная структурная схема компьютерно-измерительной системы, отражающая как последовательную, так и параллельную архитектуру построения.

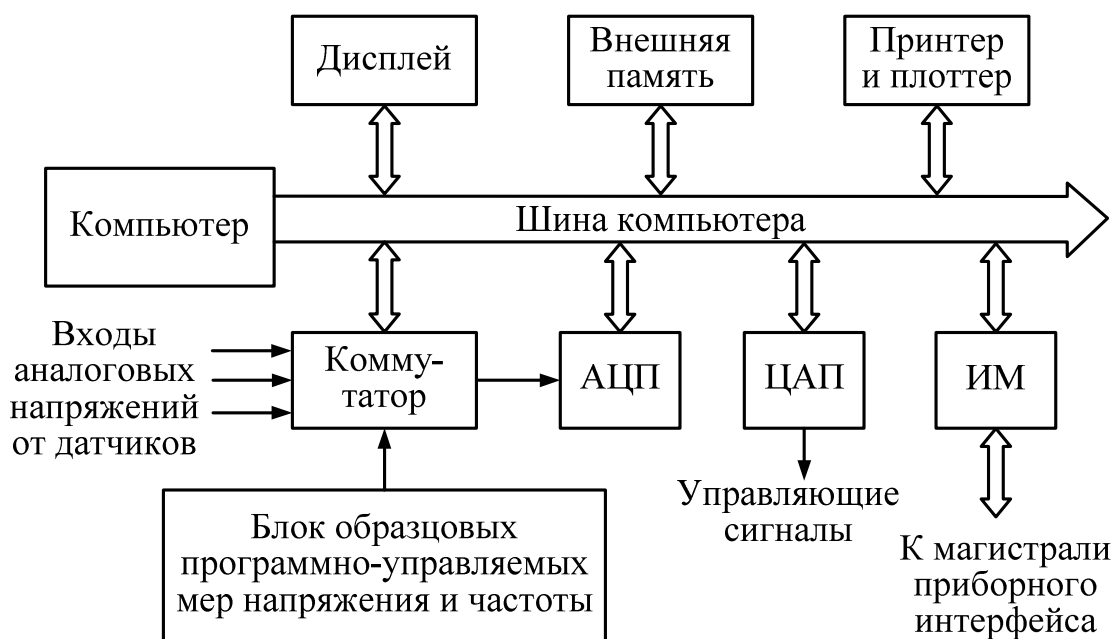


Рис. 8.4. Обобщенная структурная схема компьютерно-измерительной системы

Взаимодействие между отдельными элементами КИС осуществляется с помощью внутренней шины персонального компьютера, к которой подключены как его внешние устройства (дисплей, внешняя память, принтер, плоттер), так и измерительная схема, состоящая из коммутатора, АЦП и блока образцовых программно-управляемых мер напряжения и частоты.

С помощью ЦАП можно вырабатывать управляющие аналоговые сигналы; интерфейсный модуль (ИМ) подключает измерительный прибор к магистрали приборного интерфейса. Коммутатор устройства обеспечивает подачу аналоговых напряжений с внешних датчиков на узлы системы.

Достаточно простые узлы КИС можно разместить на одной плате персонального компьютера. Существуют и более сложные структуры КИС, в которых в соответствии с решаемой измерительной задачей по установленной программе коммутируются необходимые измерительные элементы, т.е. меняется архитектура построения системы.

Одним из элементов КИС является блок образцовых программно-управляемых мер напряжения и частоты. В качестве встроенных образцовых мер напряжения в КИС чаще всего применяются стабилитроны, температурный коэффициент напряжения кото-

рых составляет около $2,5 \cdot 10^{-5}$. Наиболее эффективным способом стабилизации опорного напряжения является термостатирование блока стабилитронов. Термостат поддерживает температуру элементов около $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ со стабильностью не менее $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Недостатками такой схемы являются достаточно длительный прогрев термостата (до 30 мин), а также большие скачки температуры при включении термостата. Температурные перепады ускоряют процесс старения стабилитронов, а следовательно, снижают их долговременную стабильность.

В настоящее время в КИС имеется возможность учитывать температурную нестабильность элементов программными методами. Для этого в блок стабилитронов вводят датчик температуры и экспериментально определяют зависимость опорного напряжения от температуры. Эту зависимость записывают в ПЗУ компьютера или во внешнюю память. В процессе эксплуатации прибора температура стабилитронов автоматически измеряется и по этой зависимости вводится поправка в величину образцового напряжения. При работе без дополнительного подогрева значительно возрастает долговременная стабильность стабилитронов. Аналогично измеряют и учитывают нестабильность частоты кварцевого генератора – меры частоты: сигналы с датчика температуры воздействуют на варикап, подстраивающий генератор на номинальную частоту. Нестабильность частоты кварцевого генератора может быть снижена до 10^{-7} . Кварцевый генератор можно использовать в качестве задающего, если в системе необходим синтезатор частоты с дискретной сеткой частот.

В последних разработках КИС предусмотрена возможность определения индивидуальных функций влияния температуры на различные параметры виртуального прибора: «дрейф нуля» УПТ, сопротивление переключателей, коэффициенты передачи различных структурных элементов. Непрерывный контроль температуры блоков позволяет автоматически корректировать возникающие погрешности измерения.

8.1.4. Виртуальные приборы

Наиболее перспективным направлением в развитии компьютерно-измерительных систем является разработка виртуальных приборов.

Виртуальный прибор состоит из современного быстродействующего персонального компьютера, наличие которого – необходимое условие высококачественных и точных измерений, и одной-двух *плат сбора данных* (ПСД). Плата устанавливается в компьютер (обычно в слот ISA или PCI) или во внешнее дополнительное устройство, подключаемое через LPT, USB-порт в комплексе с соответствующим программным обеспечением.

Важную роль в создании виртуальных приборов играет разработка платы сбора данных с необходимыми метрологическими характеристиками для данной измерительной задачи, такими как разрядность АЦП, быстродействие и динамические погрешности аналого-цифрового канала. При этом необходимы использование быстрых и эффективных алгоритмов обработки измеряемой информации, разработка удобной программы сбора и отображения данных под наиболее распространенные операционные системы Windows 98, 2000, NT, XP и т.д.

Пользователь виртуального прибора включает объект графической панели с помощью клавиатуры, «мыши» или специализированной прикладной программы. Виртуальные приборы сочетают широкие вычислительные и графические возможности персонального компьютера с высокой точностью и быстродействием АЦП и ЦАП, применяемых в ПСД. По существу, виртуальные приборы (как практически и все типы КИС) выполняют анализ амплитудных, частотных, временных характеристик различных радиоэлектронных цепей и измеряют параметры сигналов с точностью примененных АЦП и ЦАП, а также формируют сигналы как для процесса собственно измерений, так и для автоматизации измерительных систем.

Программная часть виртуального прибора может эмулировать (создать) на экране дисплея компьютера виртуальную переднюю управляющую панель стационарного измерительного прибора. Сама панель с виртуальными кнопками, ручками и переключателями, сформированная на экране дисплея, становится панелью управления виртуального прибора. В отличие от реальной панели управления стационарного измерительного прибора, виртуальная панель может быть многократно перестроена в процессе работы для адаптации к конкретным условиям эксперимента. В зависимости от используемой платы и программного обеспечения пользователь получает измерительный прибор под ту или иную метрологическую задачу.

Широкие вычислительные возможности виртуальных приборов позволяют реализовать программными методами многие способы повышения точности измерений, эффективности и быстродействия. Например, если полученная при измерениях гистограмма распределения физической величины, наблюдаемая экспериментатором на дисплее компьютера, имеет выпавшие результаты и сглаженную форму, то можно предположить существование выбросов и наличие дрейфа измеряемой величины или погрешности. Для устранения выбросов можно использовать одну из статистических программ.

Виртуальные приборы имеют большое преимущество перед микропроцессорными измерительными приборами, поскольку пользователь получает доступ к обширным объемам прикладных программ, может использовать внешнюю память большой емкости и различные устройства документирования результатов измерений. Сочетание платы сбора данных, измерительного устройства и персонального компьютера предоставляет оператору новые возможности, недостижимые автономными измерительными приборами. Теперь для проведения эксперимента и измерений необходимо только наличие компьютера, а все остальные программно-аппаратные средства подбираются исходя из технических требований проводимого эксперимента.

К преимуществам виртуальных приборов относится их экономическая эффективность: практически любая плата сбора данных и компьютерные программы обработки измерительной информации намного дешевле измерительного прибора. Многие метрологические, измерительные и исследовательские задачи в XXI в. будут решаться с помощью виртуальных приборов.

8.1.5. Интеллектуальные измерительные системы

Интеллектуальные измерительные системы – это системы, которые могут индивидуально программироваться на выполнение специфических задач, используя программируемый терминал (программатор) для ввода параметров конфигурирования. Такие системы имеют средства представления информации: дисплей для визуализации мнемонических символов команд, цифровые индикаторы, дающие оператору необходимую информацию, и клавиши переключения видов работы. Блок бесперебойного питания обеспечивает сохранность

программ при отключении питания на длительное время. Подобные измерительные системы способны выполнять все функции измерения и контроля в реальном масштабе времени. Это позволяет осуществлять функции измерения и контроля «высокого уровня» без применения больших компьютеров. При автономном функционировании такая ИС обеспечивает непрерывные измерения и контроль заданных параметров, сбор данных и обработку сигналов.

Интеллектуальные измерительные системы имеют существенные преимущества перед традиционными, а именно:

- высокое быстродействие контуров управления процессами измерения, а также высокую скорость сбора данных;
- универсальность (стандартные интерфейсы обеспечивают простое подключение к любым системам и оборудованию);
- высокую надежность на каждом системном уровне (применение универсальных методов обеспечивает безотказную работу);
- взаимозаменяемость (так как интеллектуальные системы являются стандартными устройствами, индивидуально программируемыми в расчете на их специфические функции, то каждое из них может быть заменено другим устройством того же функционального назначения; каждая система может рассматриваться как резервная для любого типа систем того же класса, что снижает число дополнительных резервных средств измерения, контроля и регулирования и сводит к минимуму аварийный период в маловероятном случае выхода из строя какого-либо элемента).

Принципы построения и структуры интеллектуальных ИС интегрируют в себе все лучшие стороны традиционных систем, но более насыщены микропроцессорной и компьютерной техникой. Интеллектуальные измерительные системы позволяют создать алгоритмы измерений, которые учитывают рабочую, вспомогательную и промежуточную информацию о свойствах объекта измерений и условиях измерений. Обладая способностью к перенастройке и перепрограммированию в соответствии с изменяющимися условиями функционирования, интеллектуальные алгоритмы позволяют повысить быстродействие и метрологический уровень измерений.¹

¹ См.: Метрология и радиоизмерения: Учеб. для вузов / В.И. Нефедов, В.И. Хакхин, В.К. Битюков и др. / Под ред. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С. 409–424.

8.1.6. Сетевые информационно-измерительные системы

Закономерным этапом в развитии средств измерений является их объединение в распределенные в пространстве системы, взаимодействие между элементами которых осуществляется по информационным каналам различного типа. Ниже рассмотрены особенности указанных систем применительно к энергоснабжению.

Сетевые информационно-измерительные системы служат для организации сбора информации об энергопотреблении с передачей ее по каналам фиксированной коммуникационной сети.

Система управляется оператором с центрального пункта управления, где показания автоматически считываются программным обеспечением системы, а затем отправляются на вычислительный сервер энергоснабжающей организации для последующей обработки и выставления счетов.

В сетевых информационно-измерительных системах могут использоваться следующие виды коммуникационной инфраструктуры для передачи информации об энергопотреблении:

- электрическая силовая распределительная сеть (технология PLC – Power Line Carrier);
- телефонная сеть (публичная, корпоративная, сотовая и т.д.);
- сеть приемопередающих радиостанций;
- частная кабельная сеть (выделенная линия, кабельное телевидение, волоконно-оптические каналы связи и т.д.).

Сетевые информационно-измерительные системы предназначены для тех энергоснабжающих организаций и крупных потребителей энергоресурсов, которые ставят задачу автоматизации сбора и передачи данных для повышения эффективности считывания и анализа информации об энергопотреблении. Применение систем снижает эксплуатационные затраты при одновременном повышении уровня обслуживания абонентов.

Инвестиции в сетевые информационно-измерительные системы дают возможность энергоснабжающим организациям получить непосредственный доступ к данным энергопотребления, позволяя передавать более подробную и глубокую информацию и обеспечивая такие дополнительные функциональные возможности, как работа в многотарифном режиме, дистанционное отключение абонента, индивиду-

альная работа с абонентом на основании заключенного контракта, выдача предупредительных сигналов, анализ собранных данных и т.д.

Система дистанционного контроля и управления энергопотреблением (MAPS PLC) фирмы «Schlumberger» основана на передаче показаний счетчиков и сигналов управления по существующей силовой сети (технология PLC). С помощью такой системы энергосбытовые компании могут дистанционно вести контрактные взаимоотношения с абонентами, реализовывать программы управления энергопотреблением абонентов, предоставлять им расширенный пакет услуг. Система MAPS PLC представляет собой законченную систему автоматизированного контроля энергопотребления и дистанционного считывания показаний и предназначена для работы с бытовыми, коммерческими и мелкомоторными абонентами. Она совместима с другими компонентами, используемыми в АСКУЭ энергоснабжающей организации, является открытой для дальнейшей модернизации и расширения.

Архитектура системы располагается на трех уровнях и позволяет подключать к главному терминалу управления системой множество подчиненных *концентраторов данных*, каждый из которых обеспечивает взаимодействие с определенной группой абонентов. Система предназначена для многопрофильных энергоснабжающих организаций и обеспечивает дистанционный контроль и считывание показаний потребителей электрической и тепловой энергии, а также газа и воды.

Главный терминал дистанционно управляет всей системой, двусторонний информационный поток содержит показания обслуживаемых счетчиков и команды управления, посылаемые с терминала группам абонентов.

Основные функции системы MAPS PLC:

- автоматическое считывание показаний приборов учета энергоресурсов (электричества, тепловой энергии, воды, газа), установленных у абонентов и в контрольных точках распределительной сети;
- сбор показаний по запросу оператора;
- применение комплексных тарифных схем;
- прямое управление энергопотреблением абонентов;
- автоматическое управление (сглаживание) общей нагрузки энергокомпании;

- удаленное отключение (подключение) абонента от подачи электроэнергии;
- коммуникационный обмен и интеграция системы в информационную структуру предприятия;
- оценка и обнаружение хищений энергии;
- дистанционное изменение параметров контракта с абонентом (смена периода выставления счетов, договорной мощности);
- анализ потребления энергии (построение графиков нагрузки на основе 15-, 30- или 60-минутного периода интеграции);
- дистанционная передача информации абонентам;
- прием и анализ информации об аварийных состояниях и сигналах тревоги, поступающих с мест установки счетчиков и дополнительных аварийных датчиков (например, противопожарных).

Архитектура системы представлена на рис. 8.5.

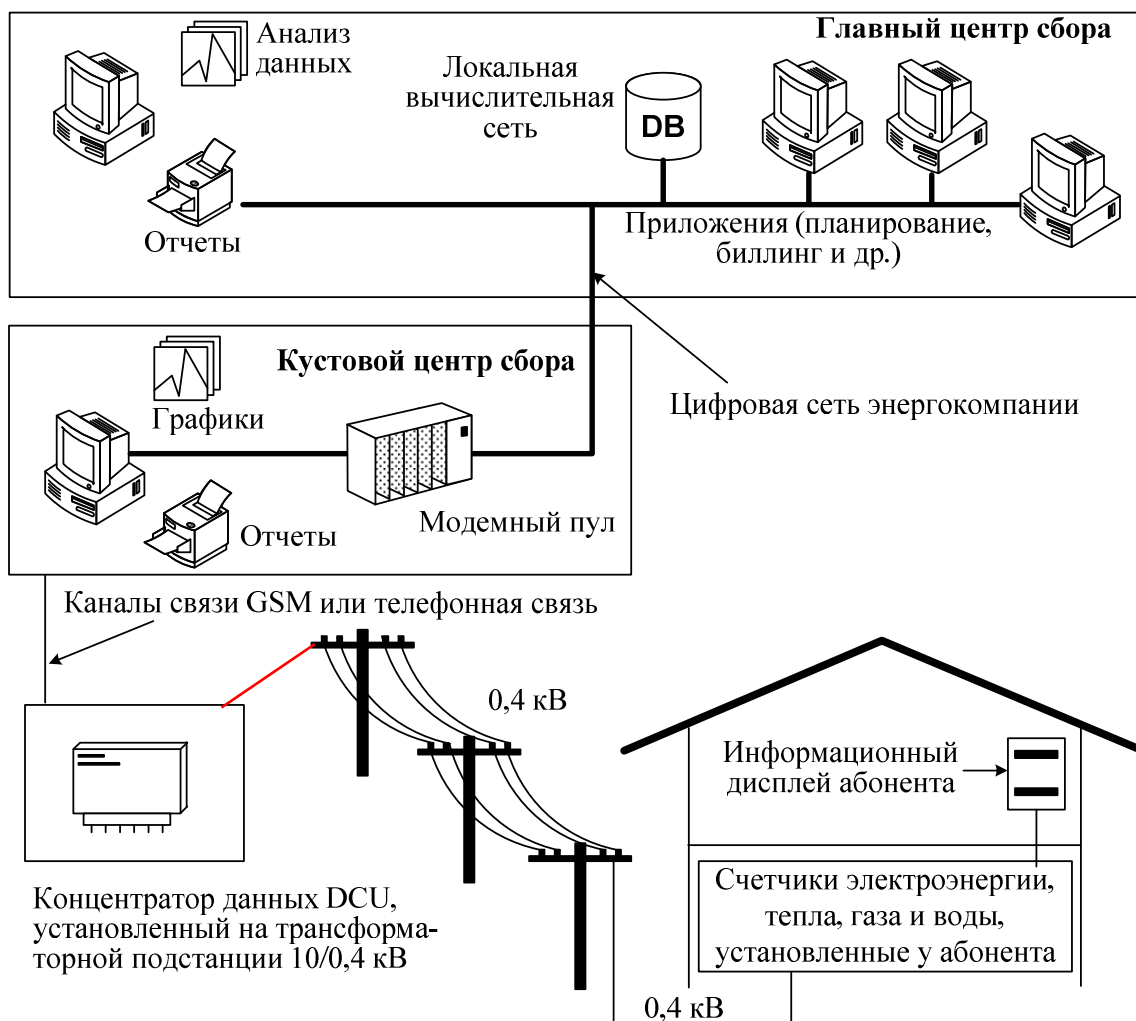


Рис. 8.5. Архитектура системы дистанционного считывания показаний и управления энергопотреблением по силовой сети

Топология системы упрощенно показана на рис. 8.6. Здесь представлены различные каналы передачи данных: силовая сеть, радиорелейная, сотовая сеть, проводная телефонная линия. Концентратор данных установлен на понижающей подстанции, которая питает бытовых потребителей по силовой кабельной линии.

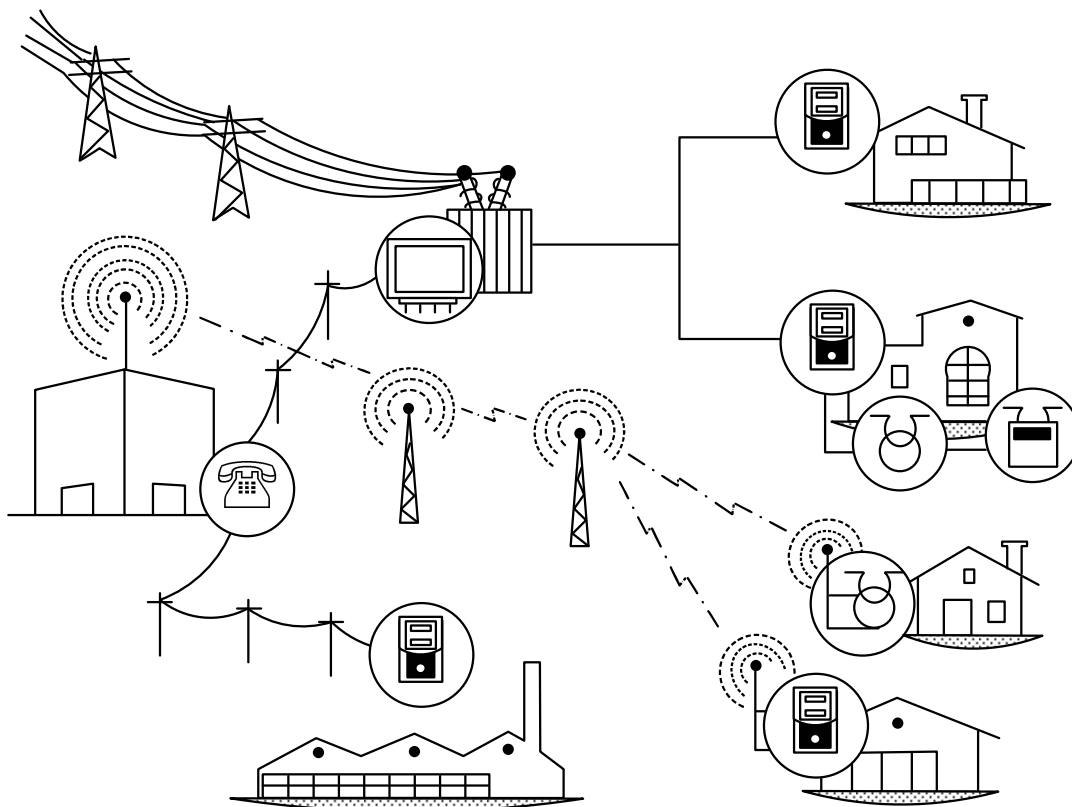


Рис. 8.6. Топология системы дистанционного считывания показаний и управления энергопотреблением по силовой сети

Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяется автоматизация измерений?
2. Что относят к автоматизированным средствам измерений?
3. Что имеют в своем составе автономные многофункциональные цифровые приборы?
4. Что представляют собой измерительные системы?
5. Для чего применяют информационно-измерительные системы?

6. Какие задачи решают измерительно-вычислительные комплексы?
7. На какие классы делятся ИВК по назначению?
8. Каково назначение компьютерно-измерительных систем?
9. Какие преимущества имеют компьютерно-измерительные системы перед другими ИС?
10. Что представляют собой виртуальные приборы, какие элементы включаются в их структуру?
11. Что представляют собой интеллектуальные измерительные системы?
12. Что представляют собой сетевые информационно-измерительные системы? Проиллюстрируйте на примере энергоснабжающей организации.
13. Какие каналы передачи информации могут использоваться в сетевых ИИС?
14. Назовите основные функции, реализуемые сетевыми ИИС.

Глава 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

9.1. Общие сведения

Большая часть физических величин относится к неэлектрическим (температура, влажность, освещенность, 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).



Рис. 9.1. Структурная схема преобразования неэлектрических величин

Структурная схема любого средства измерения неэлектрических величин электрическими методами содержит измерительный преобразователь.

Измерительные преобразователи классифицируют по роду измеряемой величины (ИП температуры, давления, влажности и др.) и по выходной величине (генераторные, параметрические).

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 (англ. sensor, gauge).

Измеряемая неэлектрическая величина может неоднократно преобразовываться для согласования пределов ее изменения с ИП, для получения более удобного для ИП вида входного воздействия и т.д. Для выполнения подобных преобразований в прибор вводят предварительные преобразователи неэлектрических величин в неэлектрические (например, мембраны, anerоидные трубки, пружины и т.п.).

При большом числе промежуточных преобразований в приборах прямого преобразования существенно возрастает суммарная погрешность. Для снижения погрешности применяют *дифференциальные измерительные преобразователи* (ДИП), которые имеют меньшую аддитивную погрешность, меньшую нелинейность функции преобразования и повышенную чувствительность по сравнению с аналогичными недифференциальными преобразователями. О них будет сказано ниже.

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 вносит составляющая, обусловленная погрешностью датчика. Это необходимо иметь в виду при выборе датчиков неэлектрических величин для решения конкретной измерительной задачи.

Причины широкого применения электроизмерительных приборов для измерения неэлектрических величин заключаются в следующем:

- 1) приборы позволяют осуществлять дистанционные измерения, при которых результат измерения может быть получен на значительном расстоянии от объекта исследования;
- 2) в приборах возможны автоматические преобразования как информативных параметров сигналов, так и результатов измерений с целью, например, введения поправок;
- 3) эти приборы более удобны, чем неэлектрические, для решения задач автоматического управления;

4) приборы дают возможность регистрировать как очень медленно меняющиеся величины, так и быстро меняющиеся (например, с помощью электронного осциллографа), могут иметь широкий диапазон измерений.

9.2. Генераторные измерительные преобразователи

Выходным сигналом *генераторных датчиков* является ЭДС, напряжение, ток или электрический заряд, функционально связанные с воздействующей на датчик измеряемой физической величиной. Основное их отличие в том, что эти датчики сами являются источниками энергии.

9.2.1. Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрические преобразователи основаны на термоэлектрическом эффекте, возникающем в цепи термопары.

При разности температур точек 1 и 2 соединения двух разнородных проводников A и B (рис. 9.2, *а*), образующих термопару, в цепи термопары возникает термо-ЭДС. При неизменной температуре, например, точки соединения 2 ($t_2 = \text{const}$) $E_{AB} = f(t_1) - C = f_1(t_1)$, где t_1 – температура точки соединения 1 ; $C = f(t_2)$. Эту зависимость используют в термоэлектрических преобразователях для измерения температуры.

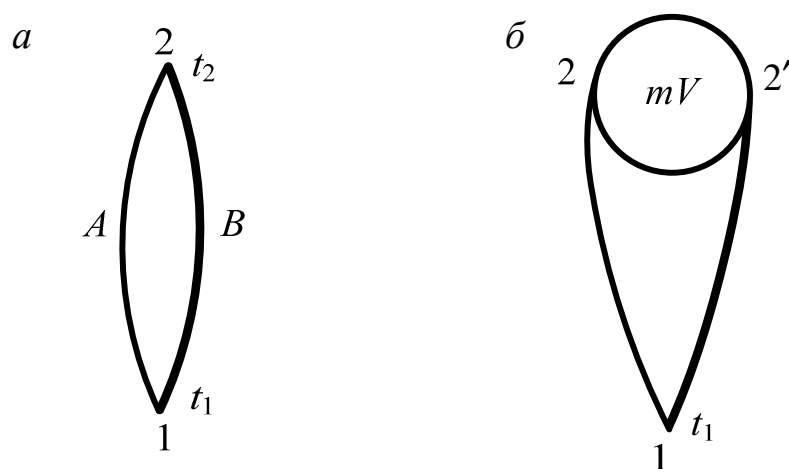


Рис. 9.2. Термопара (*а*) и способ включения прибора в цепь термопары (*б*)

Для измерения термо-ЭДС электроизмерительный прибор (милливольтметр, компенсатор) включают в цепь термопары (рис. 9.2, б). Точку соединения проводников (электродов) 1 называют рабочим (горячим) концом (спаем) термопары, точки 2 и $2'$ – свободными концами (холодными).

Чтобы термо-ЭДС в цепи термопары однозначно определялась температурой рабочего конца, необходимо температуру свободных концов термопары поддерживать одинаковой и неизменной. Градуировку термоэлектрических термометров – приборов, использующих термопары для измерения температуры, производят обычно при температуре свободных концов $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Градуировочные таблицы для стандартных термопар также составлены при условии равенства температуры свободных концов $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9.2.2. Пьезоэлектрические преобразователи

Такие преобразователи основаны на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта¹ (от греч. *piézo* – давлению), заключающегося в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварца, турмалина, сегнетовой соли и др.) под влиянием механических напряжений.

Из кристалла кварца вырезается пластинка, грани которой должны быть перпендикулярны оптической оси Oz , механической оси Oy и электрической оси Ox кристалла (рис. 9.3).

При воздействии на пластину усилия F_x вдоль электрической оси на гранях x появляются заряды $Q_x = kF_x$, где k – пьезоэлектрический коэффициент (модуль).

При воздействии на пластину усилия F_y вдоль механической оси на тех же гранях x возникают заряды $Q_y = kF_y a/b$, где a и b – размеры граней пластины.

¹ Впервые исследован Пьером Кюри в 1880 г. Пьезоэлектрический эффект обнаружен более чем у 1500 веществ.

Механическое воздействие на пластину вдоль оптической оси не вызывает появления зарядов.

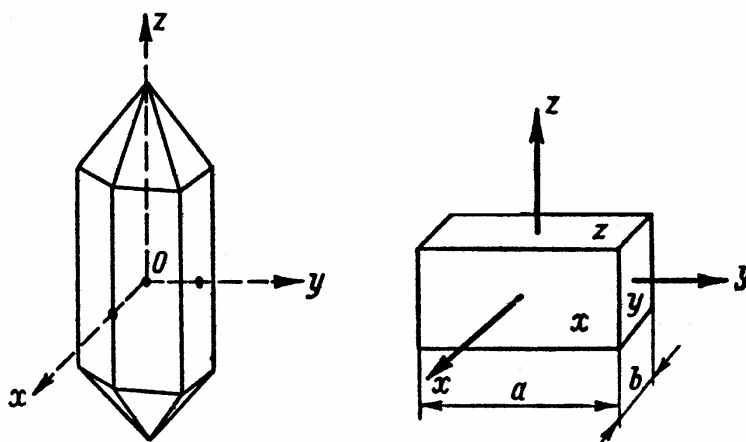


Рис. 9.3. Кристалл кварца и вырезанная из него пластинка

Пример. Рассмотрим устройство пьезоэлектрического преобразователя для измерения переменного давления газа (рис. 9.4).

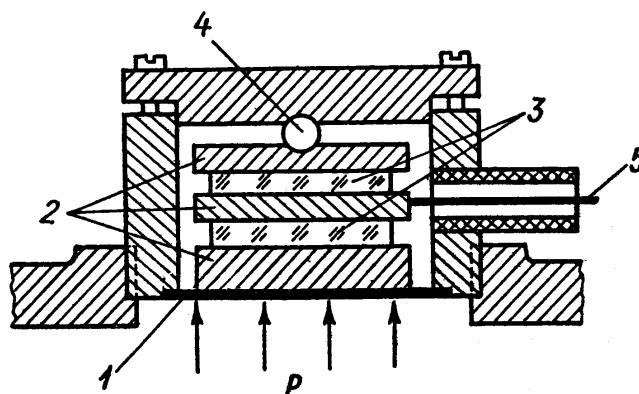


Рис. 9.4. Пьезоэлектрический преобразователь для измерения давления

Давление p через металлическую мембрану 1 передается на сжатые между металлическими прокладками 2 кварцевые пластинки 3 . Шарик 4 способствует равномерному распределению давления по поверхности кварцевых пластинок. Средняя прокладка соединена с выводом 5 , проходящим через втулку из хорошего изоляционного материала. При воздействии давления p между выводом 5 и корпусом преобразователя возникает разность потенциалов

$$U = 2Q / (C_n + C_0) = 2ksp / (C_n + C_0),$$

где Q – заряд, возникающий на пластинке кварца; C_n – емкость преобразователя; C_0 – емкость проводов и входной цепи прибора, измеряющего разность потенциалов; k – пьезоэлектрический модуль кварца; s – площадь поверхности мембраны, подверженная давлению. По разности потенциалов U судят о значении давления p .

В пьезоэлектрических преобразователях главным образом применяют кварц, у которого пьезоэлектрические свойства сочетаются с высокой механической прочностью и высокими изоляционными качествами, а также с независимостью пьезоэлектрической характеристики от температуры в широких пределах. Используют также поляризованную керамику из титаната бария, титаната и цирконата свинца.

Из-за «стекания» заряда с пьезоэлектрического преобразователя по изоляции и входной цепи измерительного прибора сопротивление такой цепи должно быть не менее 10^{12} – 10^{15} Ом. Проблема «стекания» заряда приводит к тому, что пьезоэлектрические преобразователи используют для измерения только быстроизменяющихся величин (переменных усилий, давлений, параметров вибраций, ускорений и т.д.). Примерами использования таких датчиков могут служить электронные весы, датчик детонации двигателя в автомобиле, высокочувствительный направленный микрофон и др. Обратный пьезоэффект находит применение при конструировании излучателей ультразвуковых сканеров, широко используемых в медицине.

В *пьезорезонаторах* используются одновременно прямой и обратный пьезоэффекты. Последний заключается в том, что если на электроды преобразователя подать переменное напряжение, то в пьезочувствительной пластине возникнут механические колебания, частота которых f_p (резонансная частота) зависит от толщины h пластины, модуля упругости E и плотности ρ ее материала. При включении такого преобразователя в резонансный контур генератора частота генерируемых электрических колебаний определяется частотой f_p . Значение пьезорезонаторов для современной электронной техники трудно переоценить. В качестве примеров их использования можно назвать генераторы тактовых синхроимпульсов для микропроцессорных систем и компьютеров, электронные кварцевые часы и т.д.

При изменении значений h , E или ρ под влиянием механических или температурных воздействий частота f_p изменится и соответственно изменится частота генерируемых колебаний. Этот принцип ис-

пользуют для преобразования давления, усилия, температуры и других величин в частоту.

9.2.3. Магнитоэлектрические датчики Холла

Когда проводник с протекающим по нему током помещается в магнитное поле так, что направление тока оказывается перпендикулярным магнитным силовым линиям, то образуется поперечное электрическое поле, пропорциональное произведению плотности магнитного потока и силе электрического тока. Этот эффект возникает в проводниках, однако наиболее существенен он в полупроводниках, где известен под названием *эффекта Холла*. На рис. 9.5 показана полупроводниковая пластина, к которой приложено магнитное поле с индукцией B , перпендикулярное протекающему через пластину току I , и возникающее при этом электрическое поле с напряженностью E . Отношение между магнитной индукцией, током и напряженностью можно выразить следующим образом:

$$E = -R_H (I \cdot B),$$

где $R_H = \frac{1}{ne}$ – коэффициент Холла; n – число зарядов, протекающих через единицу объема и образующих электрический ток в проводнике или полупроводнике; e – заряд носителя зарядов. Таким образом, величина возникающей на гранях полупроводника *ЭДС Холла* определяется векторным произведением тока и магнитной индукции.

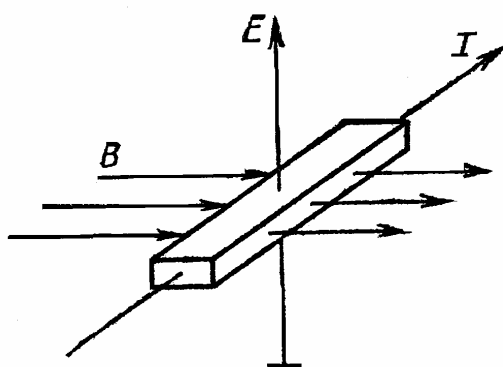


Рис. 9.5. Возникновение эффекта Холла в полупроводнике

Магнитоэлектрический датчик Холла получил свое название по имени Э.Холла, американского физика, открывшего в 1879 г. это важ-

ное гальваномагнитное явление. Бесконтактные клавишные переключатели на основе эффекта Холла применялись за рубежом довольно широко уже с начала 70-х гг. XX в. К достоинствам таких переключателей относятся высокая надежность и долговечность, малые габариты, а к недостаткам – постоянное потребление энергии и сравнительно высокая стоимость по сравнению с другими бесконтактными переключателями – герметизированными контактами (герконами). В качестве полупроводниковых материалов датчиков Холла чаще используют кремний (Si), арсенид индия (InAs) и антимонид индия (InSb).

Эффект Холла используется во многих типах преобразователей, предназначенных для измерения магнитного поля, а также в бесконтактных переключающих приборах. В настоящее время датчики на основе эффекта Холла находят чрезвычайно широкое применение при решении различных задач, среди которых – определение положения различных движущихся частей механизмов и устройств, измерение их скоростей и ускорений.

Датчики Холла широко используются в современной автомобильной электронике. Рассмотрим управление системой зажигания двигателя автомобиля. Обычной конструкцией датчика Холла является щелевая. С одной стороны щели расположен полупроводник с протекающим по нему током, с другой – неподвижный постоянный магнит. В щель датчика входит стальной цилиндрический экран с прорезями, механически связанный с коленчатым валом. При вращении экрана, когда его прорези оказываются в щели датчика, магнитный поток воздействует на полупроводник с протекающим по нему током и образующиеся управляющие импульсы датчика Холла подаются в коммутатор, в котором они преобразуются в импульсы тока в первичной обмотке катушки зажигания. В системах распределенного впрыска топлива (инжекторных) импульсы датчика прежде подаются в контроллер (бортовой компьютер), который управляет электронным блоком зажигания по соответствующему алгоритму.

9.2.4. Датчики Виганда

Одной из последних разработок среди датчиков магнитного поля является *датчик Виганда*. По конструкции он похож на датчик Холла, в нем также имеется магнит, однако вместо полупроводнико-

вой пластины используется катушка из специальной магнитобистабильной проволоки.

Эта проволока из магнитотвердого сплава – викаллой (54% Со, 14% V, 32% Fe) диаметром $\approx 0,3$ мм предварительно обработана механически и намотана в виде катушки длиной 15 мм, имеющей около 1300 витков. Если эту катушку поместить в магнитное поле (например, постоянного магнита), то при превышении определенной величины напряженности поля направление намагничивания спонтанно изменится. В результате этого изменения возникает импульс напряжения длительностью ≈ 20 мкс и амплитудой $\approx 2,5$ В. Достоинствами датчика Виганда являются отсутствие необходимости в источнике питания, большая величина сигнала (несколько вольт), широкий температурный диапазон применения (от -96 до $+175^\circ\text{C}$), конструктивная защищенность от коротких замыканий, искробезопасность.

Амплитуда и длительность импульсов, возникающих в магнитобистабильной проволоке датчика Виганда, не зависят от скорости изменения магнитного поля, так что датчики указанного типа могут применяться при скоростях, даже близких к нулю. Поэтому параметрические индуктивные преобразователи уступают в таких случаях данному способу измерения. Датчики Виганда используются наиболее часто для измерения частоты вращения.

9.2.5. Фотоэлектрические преобразователи (солнечные элементы)

К генераторным преобразователям относят также солнечные элементы. Они представляют собой *фотоэлектрические преобразователи* (ФЭП), которые превращают излучаемую электромагнитную энергию в электрическую, т.е. изменение измеряемого значения излучения преобразуется в изменение выходного напряжения (рис. 9.6). В данном случае мы имеем дело с вентильным фотоэффектом¹ – возбуждением светом электродвижущей силы на границе между металлом и полупроводником или между разнородными полупроводниками.

¹ Явление фотоэффекта впервые наблюдал Эдмон Беккерель в 1839 г. Это случайное открытие оставалось незамеченным вплоть до 1873 г., когда Уиллоуби Смит обнаружил подобный эффект при облучении светом селеновой пластины.

Конструкция преобразователя включает в себя слой фоточувствительного высокоомного материала, размещенного между двумя проводящими электродами.

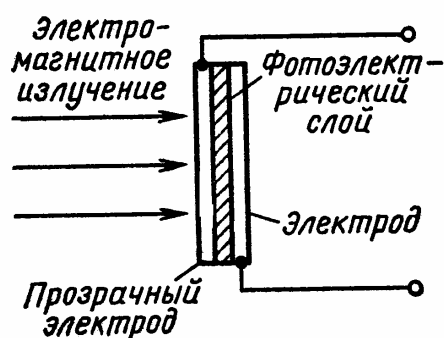


Рис. 9.6. Солнечный элемент как фотоэлектрический преобразователь

Один из электродов выполнен из прозрачного материала, через который проходит излучение и попадает на фоточувствительный материал. При полном освещении один элемент вырабатывает выходное напряжение между электродами около 0,5 В. Ток элемента зависит от интенсивности света и площади поверхности элемента. КПД обычного солнечного элемента на основе Si или GaAs в настоящее время колеблется в пределах 10–20%, а максимальный КПД для структур на основе AlGaSb/GaSb – 28%. Это значит, что элемент размером 100×100 мм при стандартных условиях может генерировать 1–1,6 Вт.

ФЭП используются в системах энергообеспечения космических аппаратов и орбитальных станций, автономного электропитания потребителей, в устройствах автоматики, переносных радиостанциях и радиоприемниках, системах подзарядки сотовых телефонов и т.д.

9.3. Параметрические измерительные преобразователи

В параметрических преобразователях выходной величиной является изменение параметра электрической цепи (R , L , C). Изменение контролируемой величины вызывает соответствующее изменение параметра цепи датчика. Параметрические датчики еще называют датчиками-модуляторами.

9.3.1. Реостатные преобразователи

Реостатные (резистивные) датчики являются одними из самых простых по принципу действия среди параметрических преобразователей. Чаще всего они представляют собой переменные резисторы. Будучи включенными в цепь источника питания, они изменяют свое сопротивление в зависимости от величины перемещения подвижного контакта и соответственно изменяют регистрируемую в цепи силу тока, которая является выходным сигналом такого датчика (рис. 9.7).

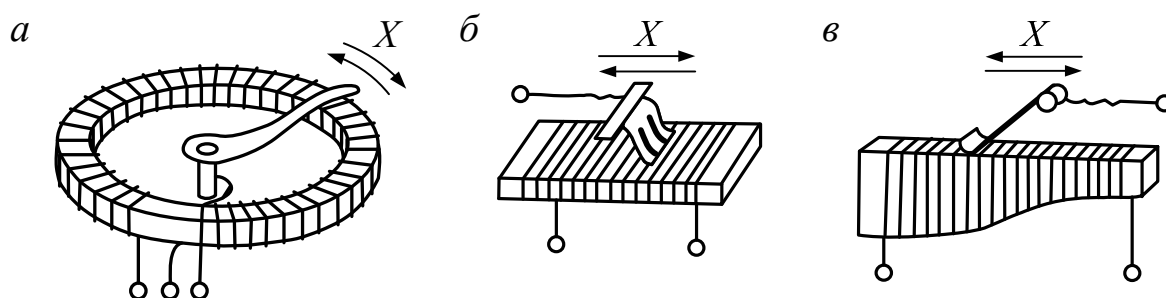


Рис. 9.7. Реостатные преобразователи для угловых (*а*), линейных (*б*) перемещений и для функционального преобразования линейных перемещений (*в*)

Переменный резистор может быть в реостатном включении (подвижный контакт соединен с одним из концов резистивного элемента), в этом случае он регулирует ток в цепи. Также используется и потенциметрическое включение: к концам резистивного элемента прикладывается входное напряжение, а с общего вывода и подвижного контакта снимается часть входного напряжения, соответствующая положению подвижного контакта.

Пример. С выхода потенциметрического поплавкового датчика снимается выходной сигнал в виде напряжения (рис. 9.8). Поплавок размещается на одном конце поворачивающегося на оси стержня, другой конец которого соединен с ползунком потенциметра. Изменение уровня приводит поплавок в движение. Следовательно, перемещается и ползунок (подвижный контакт) потенциметра по треку (резистивному элементу), и, таким образом, создается разность потенциалов на выходе датчика, функционально связанная с уровнем жидкости. Такие датчики просты и широко используются для определения уровня жидкости, например для индикации количества топлива в баке автомобиля.

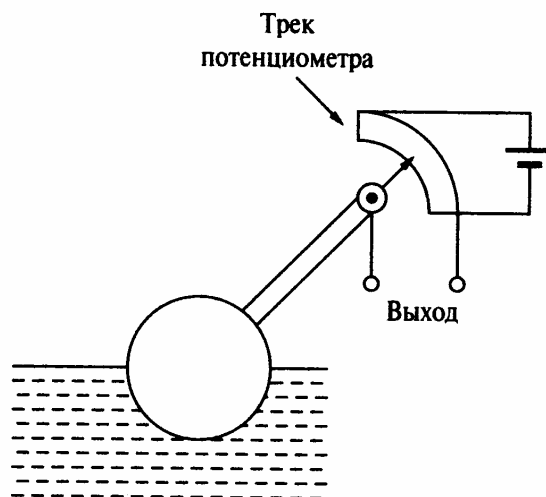


Рис. 9.8. Потенциометрический поплавковый датчик

В электросистеме автомобиля имеется еще один резистивный преобразователь углового перемещения – датчик положения дроссельной заслонки.

Реостатные преобразователи включают в измерительные цепи в виде равновесных и неравновесных мостов, делителей напряжения и т.п. Применяют их для преобразования сравнительно больших перемещений и углов поворота, а также других неэлектрических величин (усилия, давления и др.), которые могут быть преобразованы в перемещение. Типичный пример использования резистивных датчиков угла поворота – промышленный робот-манипулятор с несколькими степенями подвижности «руки».

Недостатком всех резистивных преобразователей является их невысокая надежность, связанная с износом скользящего контакта, для которого требуются относительно большие перемещения. К достоинствам следует отнести высокую точность преобразования, значительный уровень выходного сигнала, простоту конструкции и относительно невысокую стоимость.

9.3.2. Тензочувствительные преобразователи

В тензочувствительных преобразователях используется тензорезистивный эффект – изменение активного сопротивления проводника (полупроводника) в результате его деформации. Основным элементом конструкции преобразователя является тензорезистор.

Тензорезистор (от лат. *tensus* – напряженный и резистор) – резистор, изменяющий свое сопротивление при деформации (сжатии или растяжении), вызываемой механическими напряжениями.

Датчики на основе тензорезистивного эффекта используются для измерения смещений или деформаций механизмов, конструкций, сооружений.

Если проволоку подвергнуть механическому воздействию, например растяжению, то сопротивление ее изменится. Относительное изменение сопротивления проволоки $\Delta R/R = S\Delta l/l$, где S – коэффициент тензочувствительности; $\Delta l/l$ – относительная деформация проволоки.

Изменение сопротивления проволоки при механическом воздействии на нее объясняется изменением ее геометрических размеров (длины, диаметра) и удельного сопротивления материала.

Тензочувствительные преобразователи, широко применяемые в настоящее время (рис. 9.9), представляют собой тонкую зигзагообразно уложенную и приклеенную к полоске бумаги (подложке 1) проволоку 2 (проволочную решетку). Преобразователь включают в цепь с помощью привариваемых или припаиваемых выводов 3. Преобразователь наклеивают на поверхность исследуемой детали так, чтобы направление ожидаемой деформации совпадало с продольной осью проволочной решетки.

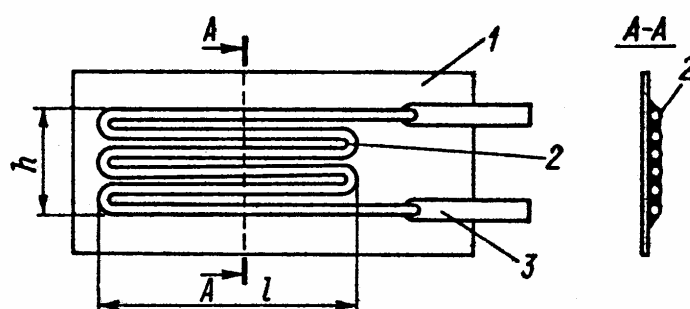


Рис. 9.9. Тензочувствительный проволочный преобразователь

Для изготовления преобразователей применяют главным образом константовую (58,5% Cu, 40% Ni, 1,5% Mn) проволоку диаметром 0,02–0,05 мм ($S = 1,9 \div 2,1$). Константан обладает малым температурным коэффициентом электрического сопротивления, что очень важно, так как изменение сопротивления преобразователей при деформациях, например, стальных деталей соизмеримо с изменением

сопротивления преобразователя при изменении температуры. В качестве подложки используют тонкую (0,03–0,05 мм) бумагу, а также пленку лака или клея, а при высоких температурах – слой специального жаростойкого цемента.

Применяют также фольговые преобразователи, у которых вместо проволоки используется фольга и пленочные тензорезисторы, получаемые путем возгонки тензочувствительного материала с последующим осаждением его на подложку. В настоящее время серийно выпускают интегральные полупроводниковые тензорезисторы, образующие мост или полумост с элементами термокомпенсации.

В качестве измерительных цепей для тензорезисторов используют равновесные и неравновесные мосты. Тензорезисторы применяют для измерения деформаций и других неэлектрических величин: усилий, давлений, моментов и т.п.

9.3.3. Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных преобразователей основан на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток на магнитопроводе от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи.

Индуктивность обмотки, расположенной на магнитопроводе (рис. 9.10), $L_i = w_i^2 / Z_m$, где Z_m – магнитное сопротивление магнитопровода; w_i – число витков обмотки.

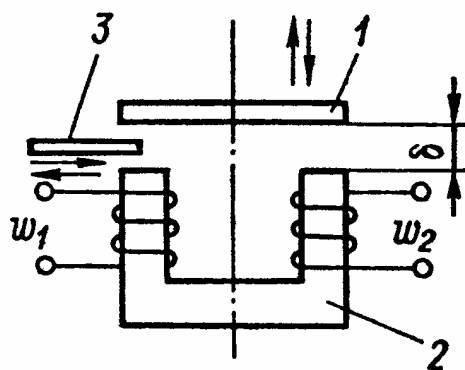


Рис. 9.10. Магнитопровод с зазорами и двумя обмотками

Взаимная индуктивность двух обмоток, расположенных на том же магнитопроводе, $M = w_1 w_2 / Z_m$, где w_1 и w_2 – число витков первой и второй обмоток.

Магнитное сопротивление определяется выражением

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2},$$

где $R_m = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i s_i} + \frac{\delta}{\mu_0 s}$ – активная составляющая магнитного сопротивления (рассеиванием магнитного потока пренебрегаем); l_i , s_i , μ_i – соответственно длина, площадь поперечного сечения и относительная магнитная проницаемость i -го участка магнитопровода; μ_0 – магнитная постоянная; δ – длина воздушного зазора; s – площадь поперечного сечения воздушного участка магнитопровода; $X_m = P / (\omega \Phi^2)$ – реактивная составляющая магнитного сопротивления; P – потери мощности в магнитопроводе, обусловленные вихревыми токами и гистерезисом; ω – угловая частота; Φ – магнитный поток в магнитопроводе.

Приведенные соотношения показывают, что индуктивность и взаимную индуктивность можно изменять, воздействуя на длину δ , сечение воздушного участка магнитопровода s , на потери мощности в магнитопроводе и другими путями. Этого можно достичь, например, перемещением подвижного сердечника (якоря) 1 (см. рис. 9.10) относительно неподвижного 2, введением немагнитной металлической пластины 3 в воздушный зазор и т. п.

На рис. 9.11 схематически показаны различные типы индуктивных преобразователей.

Индуктивный преобразователь (рис. 9.11, а) с переменной длиной воздушного зазора δ характеризуется нелинейной зависимостью $L = f(\delta)$. Такой преобразователь обычно применяют при перемещениях якоря на 0,01–5 мм. Значительно меньшей чувствительностью, но линейной зависимостью $L = f(s)$ отличаются преобразователи с переменным сечением воздушного зазора (рис. 9.11, б). Эти преобразователи используют при перемещениях до 10–15 мм. Якорь в перечисленных преобразователях испытывает нежелательное притяжение со стороны электромагнита, которое необходимо учитывать в расчетах.

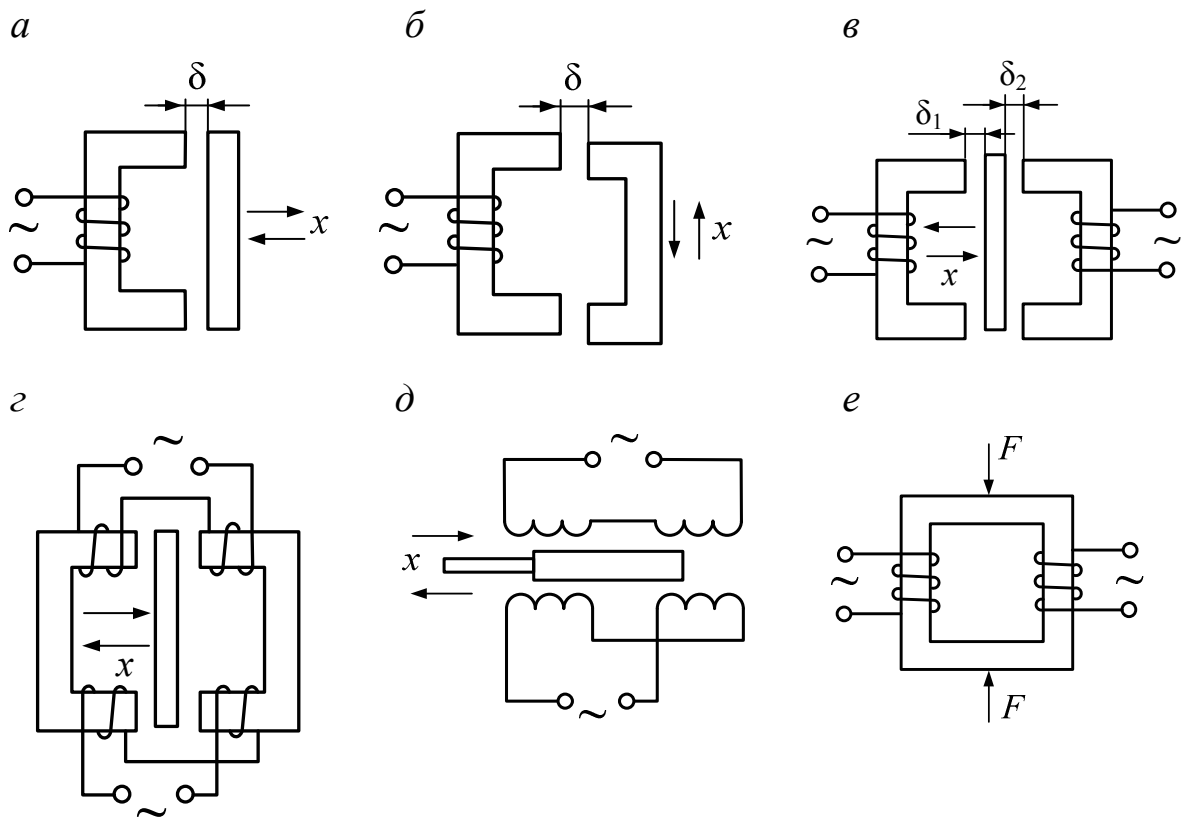


Рис. 9.11. Индуктивные преобразователи:

- a* – с изменяющейся длиной зазора; *б* – с изменяющимся сечением зазора;
в – дифференциальный; *г* – дифференциальный трансформаторный; *д* – дифференциальный трансформаторный с разомкнутой магнитной цепью;
е – магнитоупругий

Сделаем небольшое отступление и отметим широкое распространение в измерительной технике так называемых *дифференциальных преобразователей*. В состав таких датчиков, как правило, входят пара конденсаторов или катушек и перемещающаяся пластина, которая является электродом или магнитопроводом соответственно. Перемещение этой пластины увеличивает значение одной из емкостей или индуктивностей, а значение другой соответственно уменьшает.

На рис. 9.11, *в* представлен индуктивный дифференциальный преобразователь. В нем под воздействием измеряемой величины одновременно и притом с разными знаками изменяются два зазора электромагнитов. Дифференциальные преобразователи в сочетании с соответствующей измерительной цепью (обычно мостовой) имеют более высокую чувствительность, меньшую нелинейность характеристики преобразования, испытывают меньшее влияние внешних фак-

торов и сниженное результирующее усилие на якорь со стороны электромагнита, чем недифференциальные преобразователи.

На рис. 9.11, *г* показана схема включения дифференциального индуктивного преобразователя, у которого выходными величинами являются взаимные индуктивности. Такие преобразователи называют взаимноиндуктивными или трансформаторными. При питании первичной обмотки переменным током и симметричном положении якоря относительно электромагнитов ЭДС на выходных зажимах равна нулю. При перемещении якоря на выходных зажимах появляется ЭДС.

Для преобразования сравнительно больших перемещений (до 50–100 мм) применяют трансформаторные преобразователи с незамкнутой магнитной цепью (рис. 9.11, *д*).

Если ферромагнитный сердечник преобразователя подвергать механическому воздействию силы F , то вследствие изменения магнитной проницаемости материала сердечника μ изменится магнитное сопротивление цепи, что повлечет за собой изменение индуктивности L и взаимной индуктивности M обмоток. На этом принципе основано действие *магнитоупругих преобразователей* (рис. 9.11, *е*). Физической основой является эффект Виллари¹ (магнитоупругий эффект) – изменение намагниченности тела при его деформации.

Эффект Виллари обусловлен изменением под действием механических напряжений доменной структуры ферромагнетика, определяющей его намагниченность. Этот эффект обратен явлению *магнитострикции* – изменения размеров и формы кристаллического тела при намагничивании. Поэтому иногда такие датчики называют магнитострикционными индуктивными.

Конструкция преобразователя определяется диапазоном измеряемого перемещения. Габариты преобразователя выбирают исходя из необходимой мощности выходного сигнала.

Пример использования индуктивного дифференциального преобразователя при измерении больших угловых перемещений α показан на рис. 9.12.

Катушка I питается от источника переменного тока. Изменение положения ферромагнитного подвижного якоря A относительно не-

¹ Открыт итальянским физиком Э. Виллари в 1865 г.

подвижного сердечника B в процессе измерения вызывает изменение магнитного сопротивления сердечников катушек 2 и $2'$ на одинаковые значения с противоположными знаками, в результате чего ЭДС, наводимые переменным магнитным потоком в катушках, получают приращения $E_1 = E_0 + \Delta E$ и $E_2 = E_0 - \Delta E$ ($E_1 = E_2 = E_0$ при симметричном относительно обеих катушек положении якоря A). Разность ЭДС на выходе ($E_1 - E_2 = 2\Delta E$) получается в результате встречного включения катушек 2 и $2'$ и измеряется милливольтметром mV .

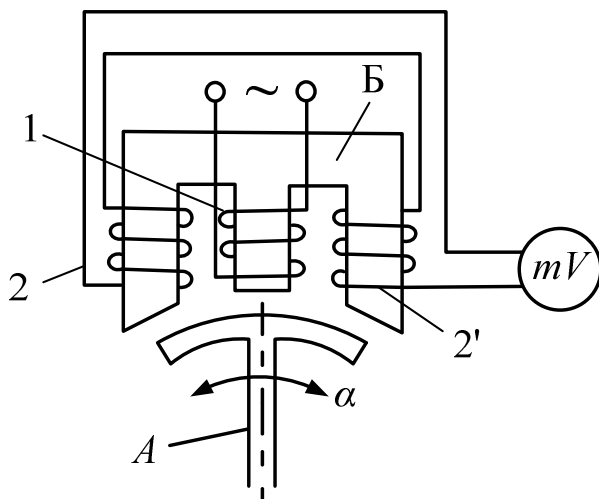


Рис. 9.12. Прибор с дифференциальным преобразователем угла поворота

Для измерения малых угловых перемещений α используют индуктосины (рис. 9.13).

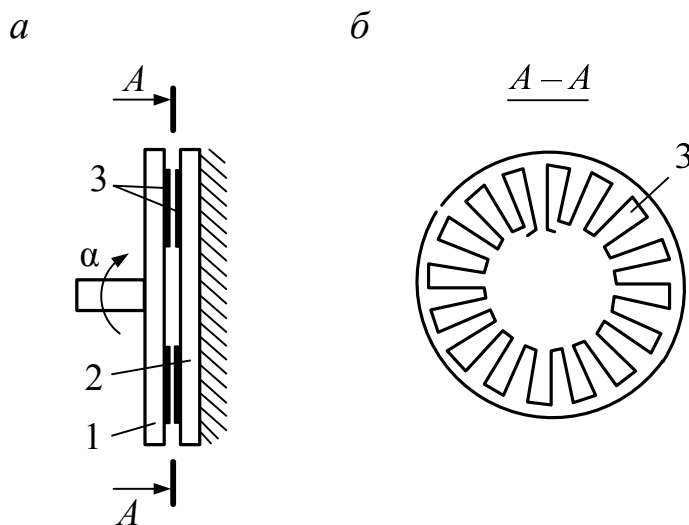


Рис. 9.13. Устройство (а) и вид печатной обмотки (б) индуктосина

Ротор 1 и статор 2 индуктосина снабжают печатными обмотками 3, имеющими вид радиального раstra. Обмотку статора питают переменным током. Поворот ротора вызывает изменение значения и фазы наводимой в его обмотке ЭДС. Нанесением обмоток печатным способом удастся получить большое число полюсных шагов обмотки, что обеспечивает высокую чувствительность преобразователя к изменению угла поворота.

Для измерения выходного параметра индуктивных преобразователей наибольшее применение получили мостовые (равновесные и неравновесные) цепи, а также компенсационная (в автоматических приборах) цепь для дифференциальных трансформаторных преобразователей.

Индуктивные преобразователи используют для преобразования перемещения и других неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в перемещение (усилие, давление, момент и т.д.).

По сравнению с другими преобразователями перемещения индуктивные преобразователи отличаются значительными по мощности выходными сигналами, простотой и надежностью в работе. К их недостаткам относятся обратное воздействие преобразователя на исследуемый объект (воздействие электромагнита на якорь) и влияние инерции якоря на частотные характеристики прибора.

9.3.4. Емкостные преобразователи

Принцип действия емкостных преобразователей основан на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его обкладок и от диэлектрической проницаемости среды между ними.

Для двухобкладочного плоского конденсатора электрическая емкость определяется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon s}{\delta},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; s – активная площадь обкладок; δ – расстояние между обкладками. Из выражения для емкости видно, что преобразователь может быть построен с использованием зависимостей $C = f_1(\varepsilon)$, $C = f_2(s)$, $C = f_3(\delta)$.

На рис. 9.14 схематически показано устройство различных емкостных преобразователей.

Преобразователь, изображенный на рис. 9.14, *а*, представляет собой конденсатор, одна пластина которого перемещается под действием измеряемой величины x относительно неподвижной пластины. Статическая характеристика преобразования $C = f_3(\delta)$ нелинейна.

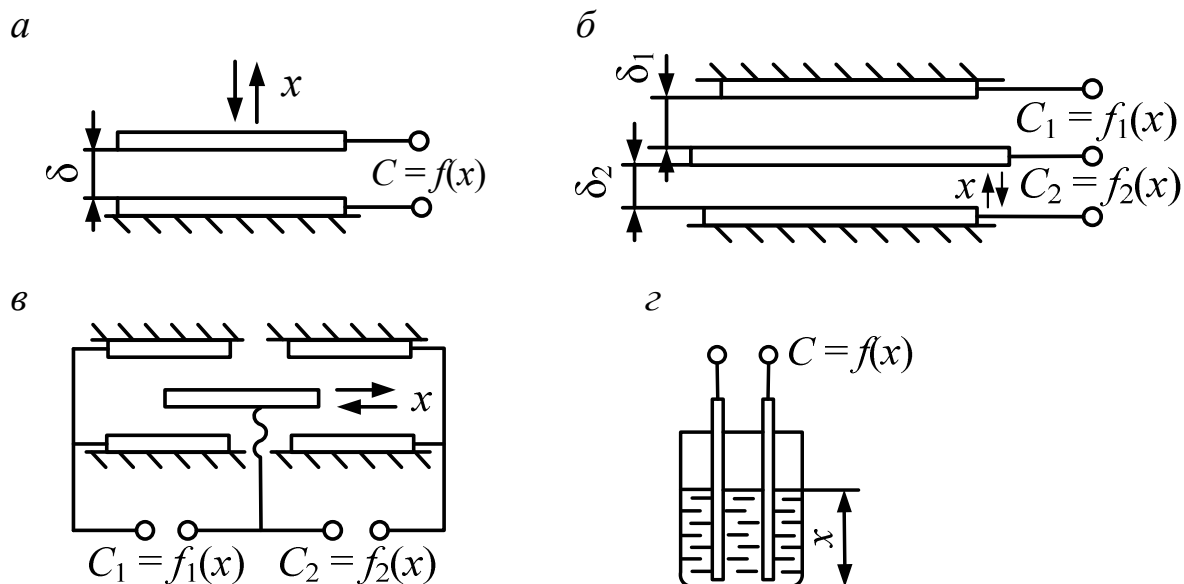


Рис. 9.14. Емкостные преобразователи:

а – с изменяющимся расстоянием между пластинами; *б* – дифференциальный; *в* – дифференциальный с переменной активной площадью пластин; *г* – с изменяющейся диэлектрической проницаемостью среды между пластинами

Чувствительность преобразователя возрастает с уменьшением расстояния δ . Такие преобразователи используют для измерения малых перемещений (менее 1 мм).

Малое рабочее перемещение пластин приводит к погрешности из-за изменения расстояния между пластинами при колебаниях температуры. Выбором размеров деталей преобразователя и материалов добиваются снижения этой погрешности. В емкостных преобразователях возникает усилие (нежелательное) притяжения между пластинами.

Применяют также дифференциальные преобразователи (рис. 9.14, *б*), у которых имеется одна подвижная и две неподвижные пластины. При воздействии измеряемой величины x у этих преобразователей одновременно изменяются емкости C_1 и C_2 . На рис. 9.14, *в* показан дифференциальный емкостной преобразователь с переменной

активной площадью пластин. Такой преобразователь используют для измерения сравнительно больших линейных (более 1 мм) и угловых перемещений. В этом преобразователе легко получить требуемую характеристику преобразования путем профилирования пластин.

Преобразователи с использованием зависимости $C = f_1(\varepsilon)$ применяют для измерения уровня жидкостей, влажности веществ, толщины изделий из диэлектриков и т.п. В качестве примера на рис. 9.14, *з* показано устройство преобразователя емкостного уровнемера. Емкость между электродами, опущенными в сосуд, зависит от уровня жидкости, так как изменение уровня ведет к изменению средней диэлектрической проницаемости среды между электродами. Изменением конфигурации пластин можно получить желаемый характер зависимости показаний прибора от объема (массы) жидкости.

Известна также конструкция датчика, при которой диэлектрик, оставаясь неподвижным, изменяет свои характеристики. На этом принципе основано действие *емкостного датчика приближения* и *емкостного выключателя приближения*, способные обнаруживать цель на некотором расстоянии от прибора. Они используются в охранных системах и системах безопасности на производстве. Емкостные приборы дороже индуктивных, однако они способны воспринимать приближение тел, выполненных из различных материалов, в более широком диапазоне расстояний.

Для измерения выходного параметра емкостных преобразователей применяют мостовые цепи и цепи с использованием резонансных контуров. Последние позволяют создавать приборы с высокой чувствительностью, способные реагировать на перемещения порядка 10^{-7} мм. Цепи с емкостными преобразователями обычно питают током повышенной частоты (до десятков мегагерц), что вызвано желанием увеличить сигнал, попадающий в измерительный прибор, и необходимостью уменьшить шунтирующее действие сопротивления изоляции.

Достоинствами емкостных преобразователей являются простота устройства, высокая чувствительность и возможность получения малой инерционности преобразователя; недостатками – влияние внешних электрических полей, паразитных емкостей, температуры, влажности, относительная сложность цепей включения и необходимость в специальных источниках питания повышенной частоты.

9.3.5. Оптические преобразователи

Номенклатура производимых мировой промышленностью оптических преобразователей настолько обширна, что требует освещения в отдельном издании. Рассмотрим лишь основные варианты конструкций оптических датчиков на примерах измерения неэлектрических величин: перемещения, приближения и освещенности (рис. 9.15).

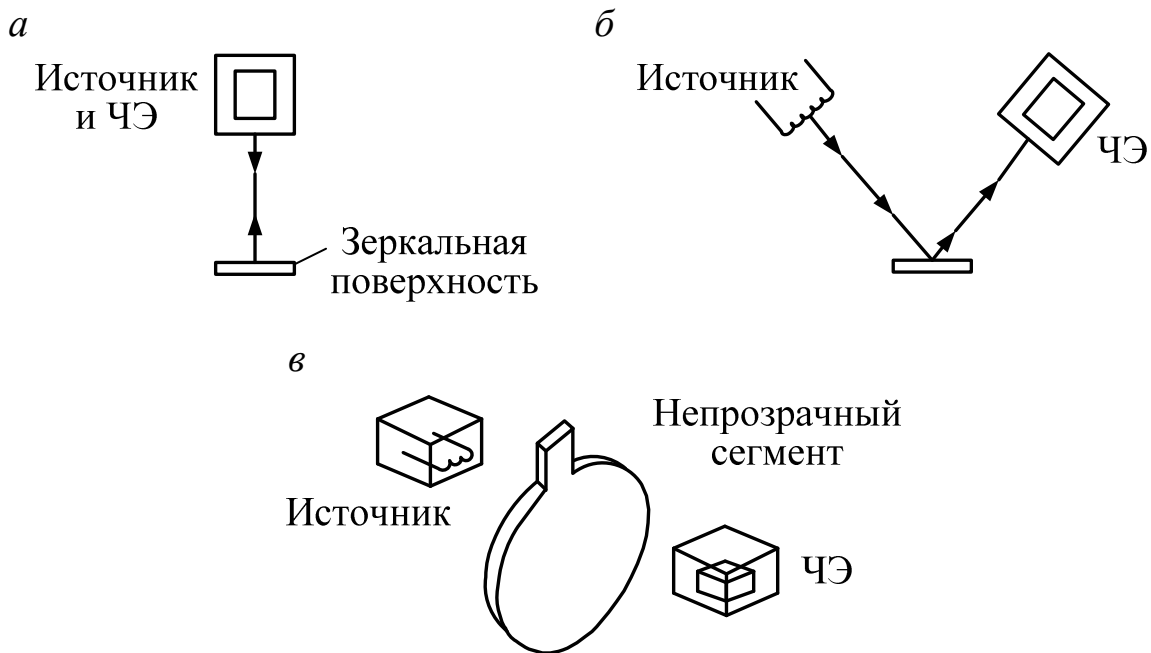


Рис. 9.15. Оптические датчики:
а – отражающий (ретрорефлективный); б – зеркальный;
в – диффузный

Подобные датчики состоят из базового чувствительного элемента (ЧЭ), которым обычно является фоторезистор или фотодиод, и схемы его сопряжения с измерительной схемой. В рассматриваемых приборах реализуется два способа определения приближения: прямой (непосредственный), или сканирование, и отражение.

В *ретрорефлективных* датчиках источник света и чувствительный элемент размещаются вместе, а излучаемый свет отражается и проходит вдоль того же пути, что и падающий (рис. 9.15, а). Типичным примером таких приборов является датчик блокировки закрытия (опускания) автоматических ворот в случае нахождения помехи в их проеме. Луч света отражается от световозвращателя.

В *зеркальном* приборе (рис. 9.15, б) луч от источника и отраженный луч света находятся под некоторым углом друг к другу и отражаются от поверхности тела или от зеркала. Это позволяет создавать системы, следящие за угловым перемещением поверхности или приближением объекта.

В *диффузных* приборах используется прохождение света через матовую поверхность (рис. 9.15, в). Такие датчики предназначены для измерения, например, светового потока, уровня освещенности.

Пирометрами называют приборы для измерения температуры, работа которых основана на использовании энергии излучения нагретых тел.

Достоинство этих приборов состоит в том, что они не искажают температурного поля объекта (измерение осуществляется бесконтактным способом) и не имеют ограничения для расширения предела измерений в сторону высоких температур. Принцип действия пирометров излучения основан на зависимости энергии излучения нагретых тел от их температуры. Температурное излучение характеризуется переносимой им энергией.

В оптическом пирометре интенсивность излучения нагретого тела измеряют путем сравнения в монохроматическом свете яркости исследуемого тела с яркостью нити лампы накаливания. Пирометр предварительно градуируют по излучению абсолютно черного тела. Под яркостью понимают отношение силы света в данном направлении к проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную тому же направлению. Два тела, имеющие одинаковую яркость в одном направлении, обладают одинаковой интенсивностью излучения. На рис. 9.16 показан *оптический пирометр*.

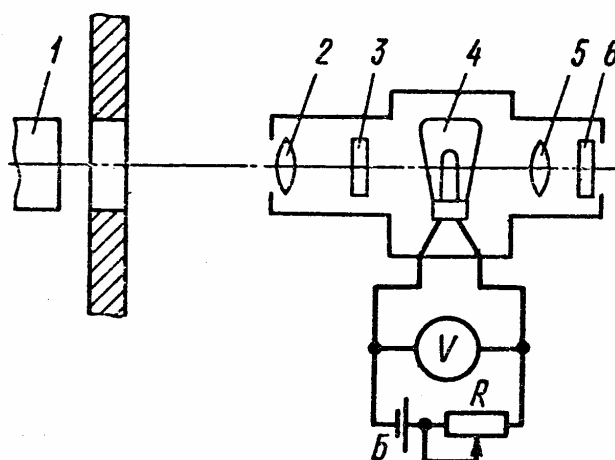


Рис. 9.16. Оптический пирометр

В этом пирометре яркость исследуемого тела I сравнивается с яркостью нити фотометрической лампы 4 . Яркость нити лампы, накаливаемой от источника B , регулируют реостатом R . Фотометрическая лампа встроена в телескоп, имеющий объектив 2 и окуляр 5 . При изменении температуры телескоп направляют на исследуемое тело I и передвижением объектива и окуляра добиваются получения чёткого изображения тела и нити фотометрической лампы в одной плоскости. Изменяя ток в фотометрической лампе, добиваются совпадения яркости нити и исследуемого тела. Отсчет показаний в момент совпадения яркости производят по шкале вольтметра, который градуируют в градусах температуры абсолютно черного тела. Иногда для повышения точности измерения тока или падения напряжения на нити лампы применяют компенсатор постоянного тока. Нить фотометрической лампы допустимо накаливать лишь до определенной температуры (1400°C), поэтому для увеличения верхнего предела измеряемых температур в пирометре имеется ослабляющий светофильтр 3 , уменьшающий яркость исследуемого тела в определенное число раз. Для того чтобы интенсивности излучения сравнивались в спектре монохроматических лучей с длиной волны, различимой человеческим глазом, предусмотрен красный светофильтр 6 , пропускающий лучи в узком спектре $0,62\text{--}0,73$ мкм.

Промышленностью выпускаются пирометры для измерения температур в диапазоне $800\text{--}10000^{\circ}\text{C}$. Основная погрешность пирометра обусловлена в основном неполнотой излучения реальных физических тел.

9.3.6. Термопреобразователи

Электрические приборы, предназначенные для измерения температуры, называют электрическими термометрами. Электрический термометр представляет собой сочетание (комплект) преобразователя температуры (терморезистора, термопары и т.д.) с электрическим измерительным прибором.

В зависимости от типа используемого термопреобразователя приборы называют термометрами сопротивления, термоэлектрическими термометрами, термотранзисторными термометрами и др.

Приборы для измерения температуры, использующие энергию нагретых тел, называют пирометрами. В отличие от термометров они предназначены для бесконтактного измерения температуры.

Рассмотрим *электрические термометры сопротивления*. Прибор представляет собой терморезистор, включенный в измерительную цепь, которой в большинстве случаев является равновесный или неравновесный мост (рис. 9.17).

Терморезистор является обычно полупроводниковым нелинейным резистором, имеющим положительный или отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ПТКС или ОТКС).

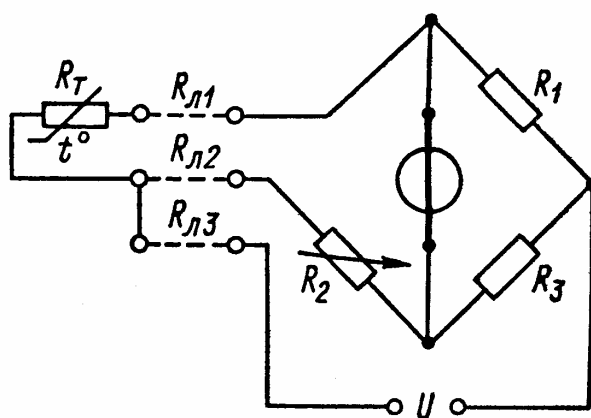


Рис. 9.17. Мостовая трехпроводная схема включения преобразователя термометра сопротивления

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) характеризует относительное изменение сопротивления резистора при изменении внешней температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_1 \Delta t},$$

где ΔR – алгебраическая разность между сопротивлением при заданной положительной или отрицательной температуре и сопротивлением при нормальной температуре; R_1 – сопротивление при нормальной температуре (обычно определяется как $20\text{ }^{\circ}\text{C}$); Δt – алгебраическая разность между положительной заданной или отрицательной заданной температурой и нормальной температурой.

Терморезистор может быть включен в мост по двухпроводной или трехпроводной схеме. Для уменьшения погрешности, вызванной изменением сопротивления соединительных проводов, применяют

трехпроводную схему, в которой два провода включены в соседние плечи моста, а третий – в диагональ питания (см. рис. 9.17). При работе этой цепи в равновесном режиме и при условии, что $R_1=R_3$, $R_{л1}=R_{л2}$, погрешность от изменения сопротивления проводов отсутствует. При работе же в неравновесном режиме погрешность значительно меньше, чем при двухпроводной схеме включения.

Для измерения температуры с помощью стандартных медных и платиновых терморезисторов промышленность выпускает автоматические мосты классов точности 0,25; 0,5.

Номенклатура выпускаемых промышленностью измерительных преобразователей не ограничивается рассмотренными нами примерами. Производятся датчики для измерения скорости (расхода) жидкостей и газов, концентраций растворов, концентраций компонентов газовых смесей, степени ионизации, скорости, ускорения, давления в различных средах и др. Познакомьтесь с принципом их действия и устройством вы можете по литературе, приведенной в библиографическом списке.

Контрольные вопросы

1. Какую задачу выполняют измерительные преобразователи?
2. Как классифицируют измерительные преобразователи?
3. Дайте определение генераторных преобразователей.
4. Опишите принцип действия термоэлектрического преобразователя.
5. Объясните устройство и принцип действия пьезоэлектрического преобразователя. Где он может использоваться?
6. В чем состоит магнитоэлектрический эффект Холла? Чем определяется величина ЭДС Холла?
7. Опишите принцип действия датчика Виганда.
8. Опишите принцип действия фотоэлектрических преобразователей.
9. Дайте определение параметрических преобразователей.
10. Опишите принцип действия реостатного преобразователя и приведите примеры его использования.
11. Где применяются тензочувствительные датчики?
12. Объясните принцип действия индуктивного преобразователя.
13. Перечислите типы индуктивных преобразователей.

14. Что такое дифференциальный преобразователь, какими преимуществами он обладает?
15. На основе каких зависимостей строятся емкостные датчики? В каких областях они применимы?
16. Определите достоинства и недостатки емкостных датчиков.
17. Назовите типы оптических датчиков.
18. Опишите принцип действия оптического пирометра.
19. Приведите схему электрического термометра сопротивления.

Глава 10. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

10.1. Косвенные измерения

10.1.1. Определить величину максимальной абсолютной погрешности для количества тепла, выделяющегося на сопротивлении при пропускании через него тока. Величина сопротивления $R=1800$ Ом; класс точности 5; сила тока $I=(100,0\pm 1)$ мА; время пропускания тока $t=100$ с; погрешность секундомера 0,5 с.

Решение. Вычислительная формула в соответствии с законом Джоуля–Ленца $Q = R I^2 t$; $Q = 1800 \cdot 0,01 \cdot 100 = 1800$ Дж.

Вычислительная формула представляет собой произведение аргументов, следовательно, при расчете относительной погрешности косвенного измерения количества тепла складываются относительные погрешности измерений параметров с учетом показателя степени (см. прил. 1):

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta R}{R} + 2 \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t} = 0,05 + 2 \frac{1}{100} + \frac{0,5}{100} = 0,05 + 0,02 + 0,005 = 0,075.$$

$$\Delta Q = 0,075 \cdot Q = 0,075 \cdot 1800 \text{ Дж} = 135 \text{ Дж}.$$

Запишем предварительный результат для измеренного количества тепла: $Q = (1800 \pm 135)$ Дж. После получения предварительного результата производим округление вычисленной погрешности в соответствии с правилами: $Q = (1800 \pm 140)$ Дж.

10.1.2. Найти абсолютную погрешность определения сопротивления резистора методом двух приборов, если показания вольтметра равны 40 В при пределе измерений 50 В и классе точности прибора 4,0; показания миллиамперметра – 200 мА при пределе измерений 300 мА и классе точности 1,0.

Решение. Вычислительная формула $R = U / I$; $R = 40 / 0,2 = 200$ Ом. Вычислительная формула представляет собой частное двух аргументов, следовательно, складываются относительные погрешности измерений:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}.$$

Однако неизвестны значения абсолютных погрешностей напряжения и тока. Найдем их, исходя из параметров измерительных приборов:

$$\Delta U = (\text{Класс точности}) \cdot \text{предел измерения } U = (4,0 \cdot 50) / 100\% = 2 \text{ В};$$

$$\Delta I = (\text{Класс точности}) \cdot \text{предел измерения } I = (1,0 \cdot 0,3) / 100\% = 3 \text{ мА}.$$

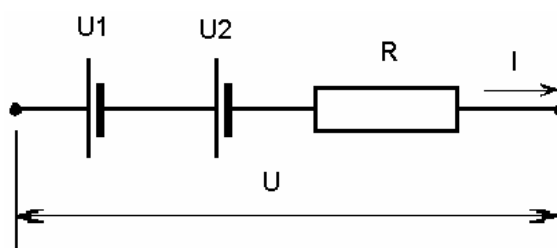
Далее вычислим относительную погрешность:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{2}{40} + \frac{3}{200} = 0,05 + 0,015 = 0,065.$$

$$\text{Отсюда } \Delta R = 0,065 \cdot R = 0,065 \cdot 200 = 13 \text{ Ом}.$$

В данном случае округление погрешности не требуется. Окончательный ответ: $R = (200 \pm 13) \text{ Ом}$.

10.1.3. Определить величину погрешности для напряжения на участке цепи в соответствии с формулой $U = U_1 + U_2 - R \cdot I$, если $U_1 = (150 \pm 1) \text{ В}$; $U_2 = (80 \pm 0,5) \text{ В}$; $R = (500 \pm 10) \text{ Ом}$; $I = (50 \pm 1) \text{ мА}$.



Решение. Вычислительная формула представляет собой сумму и разность величин, следовательно, складываются абсолютные погрешности:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta(R \cdot I);$$

$$\Delta(RI) = R \cdot I \cdot \left(\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta I}{I} \right) = 500 \cdot 0,05 \cdot \left(\frac{10}{500} + \frac{1}{50} \right) = 1 \text{ В}.$$

Первые два слагаемых аргумента известны, необходимо найти последнее слагаемое $R \cdot I$ как отдельную функцию (произведение двух параметров):

$$U = U_1 + U_2 - (RI) = 150 + 80 - 500 \cdot 0,05 = 205 \text{ В};$$

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta(RI) = 1 + 0,5 + 1 = 2,5 \text{ В}.$$

Окончательная запись аргумента и погрешности имеет вид $U = (205 \pm 3) \text{ В}$.

10.2. Расширение пределов измерений

10.2.1. Вольтметр с пределом измерения 10 мВ имеет внутреннее сопротивление $R_0=1,1$ кОм. Какова должна быть величина дополнительного сопротивления, чтобы расширить предел измерения до 100 мВ?

Решение. В соответствии с уравнением для расчета расширения пределов при измерении напряжения (см. п. 5.2.1) отношение измеряемого магистрального напряжения (U_M) и регистрируемого вольтметром (U_0) равно

$$\frac{U_M}{U_0} = \frac{R_{доп}}{R_0} + 1.$$

Отсюда

$$R_{доп} = \left(\frac{U_M}{U_0} - 1 \right) R_0;$$
$$R_{доп} = \left(\frac{100}{10} - 1 \right) \cdot 1100 = 9900 \text{ Ом} = 9,9 \text{ кОм}.$$

10.2.2. Во сколько раз увеличится верхний предел шкалы вольтметра с внутренним сопротивлением $R_0 = 2,0$ кОм, если к нему присоединить последовательно добавочное сопротивление 10,0 кОм?

Решение

$$\frac{U_M}{U_0} = \frac{R_{доп}}{R_0} + 1 = \frac{10000}{2000} + 1 = 6.$$

Верхний предел шкалы вольтметра увеличится в 6 раз.

10.2.3. Имеется милливольтметр с пределом измерения 25 мВ. Требуется использовать его как амперметр. Каким должно быть сопротивление шунта, чтобы можно было измерять этим прибором магистральный ток величиной до 10 А?

Решение. Будем считать, что сопротивление шунта значительно меньше сопротивления вольтметра, т.е. весь ток амперметра потечет через шунт и, следовательно, током через катушку вольтметра при расчетах можно будет пренебречь. В параллельном с прибором включении шунт является преобразователем тока в напряжение, и сопротивление равно

$$R_{ш} = \frac{U_0}{I_M} = \frac{0,025}{10} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

10.2.4. Чувствительность гальванометра с сопротивлением обмотки, равным 3000 Ом, нужно уменьшить в 100 раз. Какое сопротивление будет иметь применяемый шунт?

Решение. Уменьшение чувствительности в 100 раз равнозначно увеличению регистрируемого тока в 100 раз, поэтому, используя выражение для коэффициента шунтирования n

$$\frac{I_M}{I_0} = \frac{R_0}{R_{ш}} + 1 = n,$$

получим

$$n = 100 = \frac{I_M}{I_0} = \frac{R_0}{R_{ш}} + 1,$$

отсюда

$$R_{ш} = \frac{R_0}{100-1} = \frac{3000}{99} = 30,3 \text{ Ом.}$$

10.2.5. Определить величину тока магистрали, если амперметр с внутренним сопротивлением 0,1 Ом работает с шунтом $R_{ш} = 0,01$ Ом и показывает ток, равный 1 А.

Решение.

$$I_M = I_0 \left(\frac{R_0}{R_{ш}} + 1 \right) = 1 \cdot \left(\frac{0,1}{0,01} + 1 \right) = 11 \text{ А.}$$

10.2.6. Во сколько раз увеличится предел измерения амперметра с внутренним сопротивлением 0,2 Ом, если он работает с шунтом $R_{ш} = 0,02$ Ом?

Решение

$$n = \frac{I_M}{I_0} = \frac{R_0}{R_{ш}} + 1 = \frac{0,2}{0,02} + 1 = 11.$$

Предел измерения амперметра увеличится в 11 раз.

10.3. Классы точности и погрешности

10.3.1. Определить наибольшую возможную разницу в показаниях двух последовательно включенных амперметров с пределами измерения 2,5 А и 5,0 А и классами точности 1,5 и 0,5 соответственно.

Решение. Очевидно, что наибольшая разница в показаниях двух приборов, одновременно измеряющих одну и ту же величину (в нашем случае двух последовательно включенных амперметров), наблю-

дается только тогда, когда максимальные погрешности этих приборов имеют разный знак. Ошибка одного прибора (ΔX_1) имеет, например, положительную величину, т.е. он показывает величину бóльшую, чем фактическое значение, а ошибка другого прибора (ΔX_2) имеет отрицательный знак, т.е. он показывает величину меньшую, чем фактическое значение. Соответственно наибольшая разница в показаниях двух приборов будет равна сумме модулей максимально возможных ошибок:

$$\Delta X_0 = |\Delta X_1| + |\Delta X_2|.$$

Максимально возможная абсолютная погрешность определяется через класс точности прибора (приведенную погрешность) и нормирующее значение шкалы прибора:

$$\Delta X_{\max} = \gamma \cdot X_N.$$

Следовательно,

$$\Delta X_{1_{\max}} = \gamma_1 \cdot X_{N_1} = \frac{1,5 \cdot 2,5}{100} = 0,0375 \text{ A} = 37,5 \text{ mA};$$

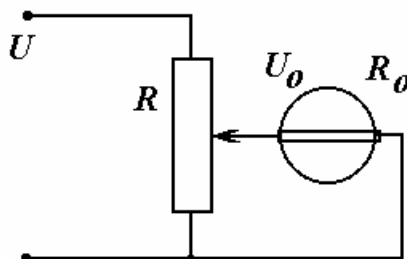
$$\Delta X_{2_{\max}} = \gamma_2 \cdot X_{N_2} = \frac{0,5 \cdot 5,0}{100} = 0,025 \text{ A} = 25 \text{ mA}.$$

Отсюда

$$\Delta X_0 = |\Delta X_1| + |\Delta X_2| = 0,0375 + 0,025 = 62,5 \text{ mA}.$$

10.3.2. К движку потенциометра, имеющего сопротивление $R = 24$ кОм, подключен вольтметр с классом точности 1,0, с пределом измерения 150 В и с внутренним сопротивлением $R_0 = 60$ кОм. Если напряжение на клеммах потенциометра $U = 220$ В, что покажет вольтметр при установке движка в среднее положение? Во сколько раз методическая погрешность превысит нормированную погрешность прибора?

Решение. Рассмотрим измерительную схему:

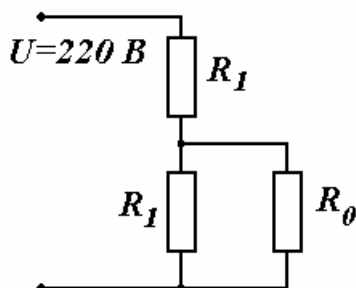


Так как подвижный контакт расположен в средней точке потенциометра, то вольтметр должен показать половину приложенного к клеммам потенциометра напряжения, т.е. $U / 2 = 110$ В.

Максимальная ожидаемая погрешность определения этой величины (см. задачу 10.3.1) равна:

$$\Delta X_{\max} = \gamma \cdot X_N = \frac{1,0 \cdot 150}{100} = 1,5 \text{ В.}$$

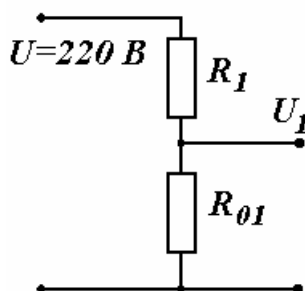
Рассмотрим эквивалентную схему:



В соответствии с условиями задачи $R_1 = 12 \text{ кОм}$, а эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных резисторов R_1 и R_0 будет равно

$$R_{01} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{12 \cdot 60}{12 + 60} = 10 \text{ кОм.}$$

Тогда схема принимает вид



Ввиду того что фактически делитель напряжения будет состоять из двух сопротивлений номиналом 12 кОм и 10 кОм, напряжение на выходе схемы при среднем положении движка потенциометра будет не 110 В, а только

$$U_1 = \frac{U \cdot R_{01}}{R_1 + R_{01}} = \frac{220 \cdot 10}{12 + 10} = 100 \text{ В.}$$

Следовательно, методическая погрешность измерения, связанная с влиянием внутреннего сопротивления вольтметра на сопротивление измерительной цепи, будет равна

$$\Delta U_{\text{метод}} = U_{R_1} - U_{R_{01}} = 110 - 100 = 10 \text{ В.}$$

Таким образом, методическая погрешность в данном случае существенно превышает ожидаемую максимальную погрешность, опре-

деляемую параметрами измерительного прибора, а именно в $10/1,5 \approx 6,67$ раз.

10.3.3. Выбрать необходимый класс точности миллиамперметра с конечным значением шкалы, равным 250 мА, если при измерении им тока в пределах от 100 до 150 мА относительная погрешность измерения не должна превышать 2%.

Решение. Для определения класса точности необходимо вычислить максимально допустимую (абсолютную) погрешность исходя из условия задачи. Поскольку относительная погрешность не может превышать 2%, допустимые максимальные абсолютные погрешности для указанных пределов будут равны

$$\Delta I_1 \leq \frac{2 \cdot 100}{100} = 2 \text{ мА}; \quad \Delta I_2 \leq \frac{2 \cdot 150}{100} = 3 \text{ мА}.$$

Из указанных двух условий выбирается более жесткое: $\Delta I < 2$ мА, т.е. максимальная погрешность не должна превышать 2 мА. Тогда для приведенной погрешности будет справедливо выражение

$$\gamma \leq \frac{\Delta I}{I_N} \cdot 100\% \leq \frac{2}{250} \cdot 100\% = 0,8\%.$$

Следовательно, класс точности прибора должен быть не более 0,8%. По стандартному ряду классов точности 6,0; 4,0; 2,5; 1,5; 1,0; 0,5; 0,1; 0,05; 0,02 и т.д., выбираем ближайшее наименьшее значение: 0,5%.

10.3.4. Записать обозначение класса точности цифрового вольтметра, если известно, что предел допускаемой погрешности при максимальном значении измеряемой величины составляет 0,01%, а при значении, равном половине максимального, – 0,015%.

Решение. В условии задачи речь идет об относительных погрешностях измерения в конце и в середине диапазона измерений. Известно, что относительная погрешность цифрового прибора (см. п. 4.1.1) нормируется коэффициентами c и d , при этом класс точности прибора записывается в виде c/d , где черта является не знаком деления, а просто разделительной линией.

$$\delta = c + d (X_N / X_i - 1) (\%).$$

Тогда в соответствии с условием задачи можно записать

$$\delta_1 = 0,01\% = c + d \cdot \left(\frac{U_N}{U_N} - 1 \right) = c + d(1-1) = c;$$

$$\delta_2 = 0,015\% = c + d \cdot \left(\frac{U_N}{U_N/2} - 1 \right) = c + d(2-1) = c + d.$$

Решая совместно эти два уравнения, получим $c = 0,01\%$ и $d = 0,005\%$.

Обозначение класса точности прибора 0,01/0,005.

10.3.5. Записать обозначение класса точности цифрового вольтметра, если известно, что предел допускаемой погрешности равен 0,02% для напряжения, равного половине максимального, и 0,03% для напряжения, равного одной трети максимального.

Решение

$$\delta_1 = 0,02\% = c + d \cdot \left(\frac{U_N}{U_N/2} - 1 \right) = c + d(2-1) = c + d;$$

$$\delta_2 = 0,03\% = c + d \cdot \left(\frac{U_N}{U_N/3} - 1 \right) = c + d(3-1) = c + 2d.$$

Решаем систему уравнений

$$c + d = 0,02\%,$$

$$c + 2d = 0,03\%,$$

откуда $c = 0,01\%$ и $d = 0,01\%$.

Класс точности прибора: 0,01/0,01.

10.3.6. Для цифрового прибора класса 0,02/0,01 при измерении напряжения 0,5 В получена погрешность, равная 0,2 мВ. Каков предел измерения данного вольтметра?

Решение. В первую очередь определим относительную погрешность измерений:

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_i} 100\% = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{0,5} = 0,04\%.$$

Для известной относительной погрешности составляем уравнение, которое решаем относительно U_N :

$$0,04\% = c + d \cdot \left(\frac{U_N}{0,5} - 1 \right) = 0,02 + 0,01 \left(\frac{U_N}{0,5} - 1 \right).$$

Решая уравнение, находим величину предельного значения шкалы вольтметра (предел измерения) $U_N = 1,5$ В.

Заключение

Развитие измерительной техники открывает широкие возможности для прикладных наук, обеспечивая их новыми средствами, позволяющими разрабатывать более совершенные материалы и технологии. В свою очередь прикладные науки, например электроника, вооружают измерительную технику новейшей элементной базой: микропроцессорами и микроконтроллерами, быстродействующими АЦП и другими приборами, позволяющими производить высокоточные измерения в реальном масштабе времени, фиксировать параметры быстропротекающих процессов и, следовательно, эффективно управлять ими.

Развитие диалоговых средств задания режимов работы позволяет создавать различную структуру и гибкие алгоритмы работы измерительных приборов. Это направление развития находит воплощение в компьютерных «виртуальных» приборах, все функции которых, включая и функции органов управления, определяются программным способом.

Увеличение степени интеграции электронных компонентов, входящих в состав цифровых измерительных приборов, позволяет концептуально изменить сам процесс измерений, включив в него как составную часть автоматическую калибровку измерительного тракта, статистическую оценку результатов измерений, передачу данных в компьютерные сети и т.п.

К сожалению, ограниченный объем данного пособия не позволяет отразить все многообразие приборной базы, измерительных преобразователей и информационно-измерительных систем, номенклатура которых расширяется вместе с развивающимися технологиями. Для получения полной информации по указанным вопросам рекомендуем обратиться к учебной, справочной и специальной литературе, указанной в библиографическом списке. Авторы надеются, что студенты, аспиранты, специалисты и внимательные читатели, освоив материал данного пособия, смогут, используя новейшую литературу, самостоятельно изучить интересующие их вопросы.

Данное пособие может продуктивно использоваться в самостоятельной работе студентов, при организации внеаудиторной работы (в том числе по дистантным формам обучения), в процессе реализации программ переподготовки кадров.

Библиографический список

Учебная и справочная литература

Азимов А. Мир измерений. От локтей и ярдов к эргам и квантам / Пер. с англ. О.В. Замятиной. – М.: Центрополиграф, 2003. – 219 с.

Аналоговая и цифровая электроника: Учеб. для вузов / *Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров и др.*; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Радио и связь, 1996. – 768 с.

Атамальян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1982. – 223 с.

Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: В 2 кн. / *Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон*; Пер. с фр. А.С. Обухова. – М.: Мир, 1992. – Кн. 1. – 480 с.

Басаков М.И. Сертификация продукции и услуг с основами стандартизации и метрологии. – 2-е изд., испр. и доп. – Ростов н/Д: Изд. центр «Март», 2002. – 256 с.

Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога. – М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2002. – 384 с.

Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справ. пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

Бриндли К. Электронные контрольно-измерительные приборы: Пер. с англ. / Под ред. А.П. Фомина. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.

Бриндли К., Карр Дж. Карманный справочник инженера электронной техники: Пер. с англ. – 2-е изд., стер. – М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2005. – 480 с.

Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – 10-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005. – 576 с.

Завражина Т.Г. Датчики: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2002. – 87 с.

Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. – 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1967. – 88 с.

Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов / *Н.Н. Евтихеев, Я.А. Куперимидт, В.Н. Скугоров и др.*; Под общ. ред. Н.Н. Евтихеева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

Карр Дж. Диагностика и ремонт аппаратуры радиосвязи и радиовещания: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 400 с.

Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учеб. для вузов. – 9-е изд., стер. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 544 с.

Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 336 с.

Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

Любимов Л.И. Проверка средств электрических измерений: Справ. кн. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 296 с.

Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 535 с.

Методы электрических измерений: Учеб. пособие для вузов / *Л.Г. Журавин, М.А. Мариненко, Е.И. Семенов и др.*; Под ред. Э.И. Цветкова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.

Метрология и радиоизмерения: Учеб. для вузов / *В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др.* / Под ред. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. – 526 с.

Основы метрологии и электрические измерения: Учеб. для вузов / Под ред. Е.М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

Пахалуев В.М., Акифьева Н.Н. Основы метрологии: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. тех. ун-та, 2004. – 150 с.

Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: Учеб. для вузов – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.

Самин Д.К. Сто великих научных открытий. – М.: Вече, 2005. – 480 с.

Сборник задач и упражнений по электрическим и электронным измерениям: Учеб. пособие для вузов / *Э.Г. Атамалян, Е.Р. Аствацатурьян, О.Н. Бодряшова и др.*; Под ред. Э.Г. Атамалян. – М.: Высш. шк., 1980. – 117 с.

Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Карман. энцикл. студента: Учеб. пособие для студентов высш. и сред. спец. учеб. заведений. – М.: Логос, 2001. – 376 с.

Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 2001. – 408 с.

Смолин Г.К., Шабалдин Е.Д. Решение задач по электротехнике с использованием компьютера: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2002. – 72 с.

Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений: Учеб. пособие для вузов. – Л: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.

Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений. – М.: Высш. шк., 2001. – 172 с.

Токхейм Р. Основы цифровой электроники: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 392 с.

Трофимов А.И. Приборы и системы контроля ядерных энергетических установок: Учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 486 с.

Тули М. Карманный справочник по электронике: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 176 с.

Тюрин Н.И. Введение в метрологию. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 392 с.

Харт Х. Введение в измерительную технику: Пер. с нем. – М.: Мир, 1999. – 391 с.

Шабалдин Е.Д., Марьин Г.А. Задания и методические указания для выполнения контрольной работы по дисциплине «Метрология и электрические измерения» / Рос. гос. проф.-пед. ун-т. – Екатеринбург, 2002. – 24 с.

Шабалдин Е.Д., Смолин Г.К. Практикум по профессии: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2003. – 113 с.

Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков: Справ. Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.

Электрические измерения (с лабораторными работами): Учеб. для техникумов / *Р.М. Демидова-Панферова, В.Н. Малиновский, В.С. Попов и др.*; Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 392 с.

Электрические измерения: Учеб. пособие для вузов. / *В.Н. Малиновский, Р.М. Демидова-Панферова, Ю.Н. Евланов и др.*; Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 372 с.

Нормативные документы

ГОСТ 8.381–80 ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 28 с.

ГОСТ 8.395–80 ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 24 с.

ГОСТ 8.401–80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 28 с.

ГОСТ 8.009–84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 16 с.

ГОСТ Р 8.563–96 ГСИ. Методики выполнения измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 34 с.

ГОСТ Р ИСО 5725–1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений: В 6 ч. – М.: Изд-во стандартов, 2002.

МИ 2083–90. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 34 с.

ПМГ 29–99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 42 с.

О техническом регулировании: Закон РФ № 184-ФЗ от 27.12.2002 // Рос. газ. – 2002. – 31 дек.

Об обеспечении единства измерений: Закон РФ № 4872–1 от 27.04.1993 (в ред. Закона РФ от 10.01.2003. №15-ФЗ) // Вед. Съезда нар. депутатов РФ и Верхов. Совета РФ. – 1993. – № 23.

Журналы

Контрольно-измерительные приборы и системы.

Законодательная и прикладная метрология.

Измерительная техника.

Главный Метролог.

Основные обозначения

- АЦП (ADC) – аналого-цифровой преобразователь
БИС – большая интегральная схема (до тысячи компонентов)
ВЧ – высокая частота
ДИП – дифференциальный измерительный преобразователь
ЗУ – запоминающее устройство
ИИС – информационно-измерительная система
ИП – измерительный преобразователь
ИС – интегральная схема
ИСО (ISO) – Международная организация по стандартизации
МВИ – методика выполнения измерений
МОМВ – Международная организация мер и весов
МП – микропроцессор
МЭК – Международная электротехническая комиссия
НЧ – низкая частота
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство (память)
ОТКС – отрицательный температурный коэффициент сопротивления
ОУ – операционный усилитель
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство (память)
ПТКС – положительный температурный коэффициент сопротивления
СВЧ – сверхвысокая частота
СКО – среднее квадратическое отклонение
СУ – сравнивающее устройство
УПТ – усилитель постоянного тока
ФЭП – фотоэлектрический преобразователь
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь
ЦИП – цифровой измерительный прибор
ЦИУ – цифровое измерительное устройство
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка
EEPROM – перепрограммируемое ПЗУ с электрическим стиранием информации
EPROM – перепрограммируемое ПЗУ со стиранием информации ультрафиолетовым излучением
Flash EEPROM или Flash Memory – ЗУ, перезаписываемое без использования программатора
PROM – ПЗУ, однократно записываемое пользователем с помощью программатора
ROM – однократно программируемое на заводе ПЗУ

Погрешности косвенных измерений

Существуют упрощенные способы расчета погрешностей косвенных измерений. Пусть некоторая величина A определяется через две другие измеренные величины a_1 и a_2 , связанные некоторой функциональной зависимостью. Рассмотрим способы расчета для разных случаев.

Правило 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):

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

Правило 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 $\delta a = \Delta a/a$.

Правило 3. Умножение измеренной величины на точное число. Если a используется для вычисления произведения $A = B \cdot a$, в котором B не имеет погрешности, то $\delta A = |B| \delta a$.

Правило 4. Возведение в степень. Если a используется для вычисления степени $A = a^n$, то $\delta A = n \cdot \delta a$.

Правило 5. Погрешность в произвольной функции одной переменной. Если a используется для вычисления функции $A(a)$, то

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

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 $\delta P = \delta R + 2 \delta I$.

Построение фигуры Лиссажу графоаналитическим способом

При построении фигур Лиссажу необходимо учитывать следующее:

1. Сигнал с частотой f_y подается на горизонтальные отклоняющие пластины (вертикального отклонения луча) осциллографа и соответственно строится относительно горизонтальной оси. Сигнал f_x строится относительно вертикальной оси, так как подается на вертикальные отклоняющие пластины.

2. Амплитуды двух исследуемых сигналов должны быть равны, т.е. фигура Лиссажу вписывается в квадрат.

3. Шаг по шкале времени при построении принимается, например, равным $1/8$ части периода сигнала, имеющего наибольшую частоту (в приведенном примере $f_y = 200$ Гц). Это делается для исключения ошибок при построении. Шаг времени при разбиении обоих сигналов должен быть одинаковым и соответствовать делениям масштабной бумаги (рис. 1).

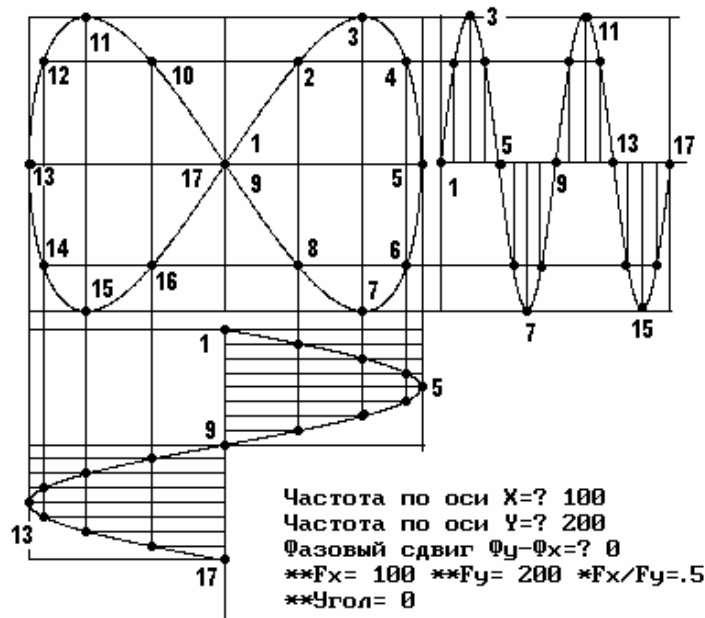


Рис. 1. Построение результирующей траектории луча методом графического сложения сигналов f_x и f_y

4. Выбирается временной интервал для построения сигнала, следующего с меньшей частотой. В рассматриваемой задаче такая частота у сигнала f_x (по условию задачи это отрезок от метки 1 до метки 17). В этом же интервале должны укладываться все периоды сигнала f_y . В приведенном примере соотношение частот 1:2, т.е. в интервале одного периода f_x располагается два периода f_y . Например, в случае соотношения частот 2:3 в конкретном выбранном временном интервале будет укладываться два полных периода первого сигнала и три второго. Только в этом случае процесс взаимовлияния сигналов на луч изображается как циклический и тра-

ектория луча осциллографа является замкнутой, т.е. фигура Лиссажу будет соответствовать видимой нами на экране.

5. Если в условии задачи указан фазовый сдвиг между сигналами, то один из сигналов строится с его учетом. Например, если фазовый сдвиг равен 90° (т.е. $\pi/2$ рад, или четверть периода), то нулевой момент времени (в рассматриваемом примере обозначен цифрой «1») будет приходиться на максимальное значение сигнала (рис. 2). Сигнал, сдвинутый по фазе, достраивается до полного периода (или целочисленного количества периодов), т.е. в конце необходимо будет добавить четверть периода.

6. Метки по обеим осям времени нумеруются, и затем выполняется геометрическое (графическое) сложение сигналов по точкам. Точки соединяются между собой гладкой кривой.

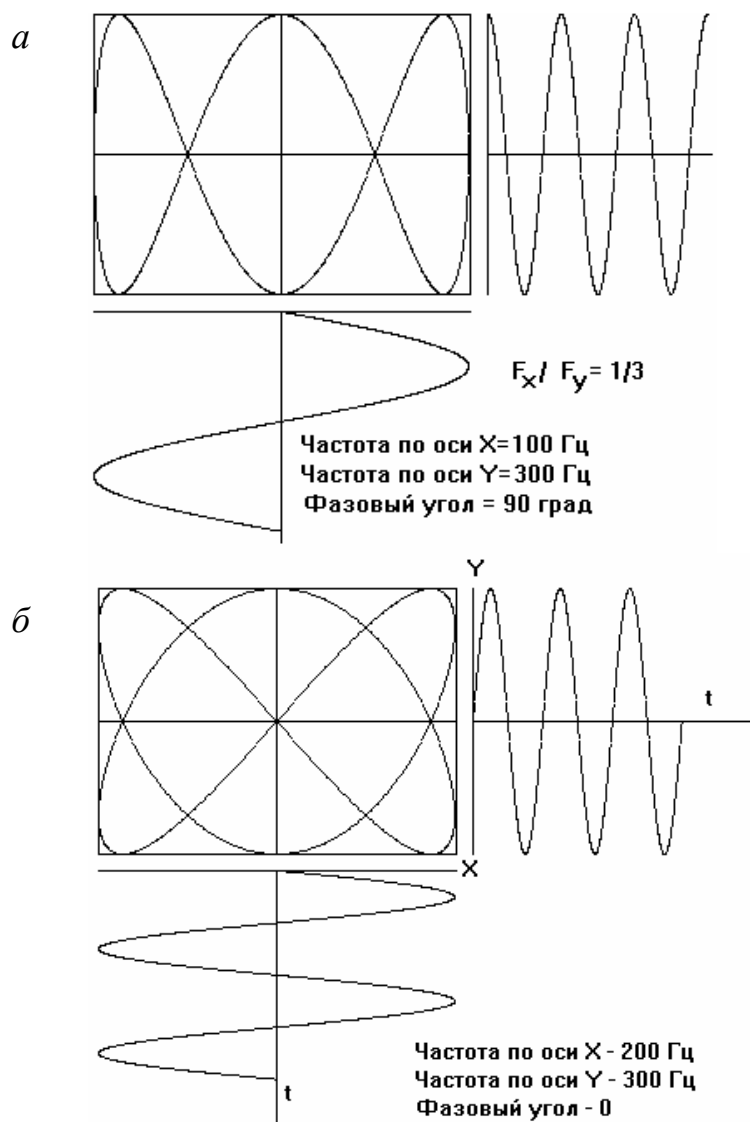
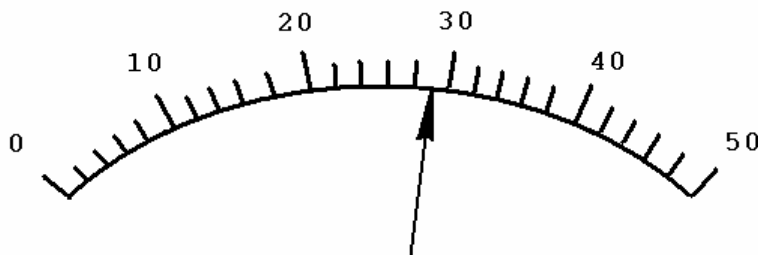


Рис. 2. Примеры построения фигур Лиссажу при соотношениях частот сигналов 1:3 (а) и 2:3 (б)

Правила снятия показаний стрелочных приборов с равномерной шкалой

Показания стрелочных приборов с равномерной шкалой снимаются в указанной ниже последовательности:

1. Определяется число делений прибора (ЧД). В рассматриваемом случае их 50 (рисунок). Необходимо помнить, что понятия «деление» и «риска» – это разные вещи. Количество делений между двумя соседними оцифрованными делениями шкалы, например, можно подсчитать так: $(30-20)/5 = 2$, т.е. на шкале данного прибора между двумя рисками заключено два деления.



Шкала прибора

2. Определяется предел измерения прибора (ПИ). Необходимо помнить, что прибор может быть одно- или многопредельным. Допустим, в нашем примере предел измерения равен 10 В.

3. Вычисляется цена деления прибора (ЦД):

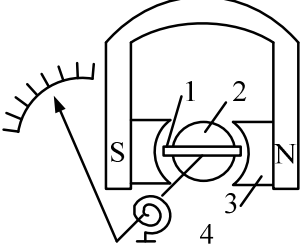
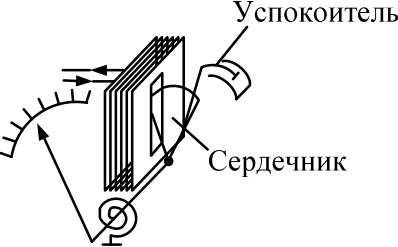
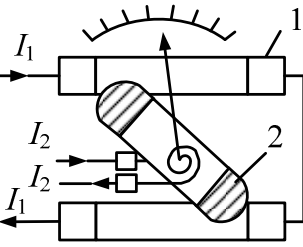

$$\text{ЦД} = \frac{\text{ПИ}}{\text{ЧД}} = \frac{10 \text{ В}}{50 \text{ дел.}} = 0,2 \frac{\text{В}}{\text{дел.}}$$

4. Определяется число отсчета (ЧО), т.е. сколько делений показывает прибор. В рассматриваемом случае стрелка находится между двумя рисками и прибор показывает 29 делений.






















5. Рассчитывается показание прибора:

$$[U] = \text{ЦД} \cdot \text{ЧО} = 0,2 \text{ В/дел.} \cdot 29 \text{ дел.} = 5,8 \text{ В.}$$

Электромеханические приборы

Наименование системы, функциональная схема	Уравнение шкалы, применение	Частотный диапазон, потребление мощности, класс точности
<p><i>Магнитоэлектрическая:</i> 1 – рамка с измеряемым током и стрелкой; 2 – неподвижный сердечник; 3 – полюсные наконечники; 4 – возвратная пружина.</p> 	$\alpha = I \frac{\psi_0}{W},$ <p>где $\psi_0 = BS\omega$; B – индукция в зазоре; S – площадь рамки; ω – число витков рамки; W – удельный противодействующий момент, создаваемый пружиной</p> <p>Переносные, лабораторные, многопредельные амперметры, вольтметры постоянного тока</p>	<p>Постоянный ток Класс точности 0,05... 0,5 $P_{собр} = 10^{-5} \dots 10^{-4}$ Вт</p>
<p><i>Электромагнитная</i></p>  <p>Успокоитель Сердечник</p>	$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{da},$ <p>где $I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt$;</p> <p>$L$ – индуктивность катушки</p> <p>Щитовые и лабораторные переносные низкочастотные амперметры, вольтметры</p>	<p>$F = 0 \dots 5$ кГц Класс точности 0,5...2,5 $P_{собр} \approx 1 \dots 6$ Вт</p>
<p><i>Электродинамическая</i> 1 – неподвижная катушка 2 – подвижная катушка</p> 	$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cos \theta \frac{dM}{da},$ <p>где θ – угол между токами; M – коэффициент взаимной индуктивности катушек</p> <p>Лабораторные приборы низкочастотные высокого класса точности</p>	<p>$F = 0 \dots 5$ кГц Класс точности 0,1...0,2 $P_{собр} = 1$ Вт</p>
<p><i>Электростатическая</i></p>  <p>Подвижная пластина Неподвижная пластина</p>	$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dC}{da}, \quad U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt,$ <p>где C – емкость между пластинами</p> <p>Высокочастотные лабораторные и высоковольтные вольтметры</p>	<p>$F = 0 \dots 30$ МГц Класс точности 0,5...1,5 $P_{собр} < 1$ мВт</p>

**Условные обозначения на шкалах
электроизмерительных приборов**

Расшифровка обозначения	Условное обозначение
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	
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	

Учебное издание

Шабалдин Евгений Дмитриевич
Смолин Георгий Константинович
Уткин Владимир Иванович
Зарубин Андрей Павлович

МЕТРОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Редактор Е.А. Ушакова
Компьютерная верстка Е.Д. Шабалдина

Печатается по постановлению
редакционно-издательского совета университета

Подписано в печать 22.11.2006. Формат 60x84/16. Бумага для множ. аппаратов. Усл.печ.л. 16,3. Уч.-изд.л. 17,5. Тираж 400 экз. Заказ №350
Издательство ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет». Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

Ризограф ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет». Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.