

**М. А. КАМЕНСКАЯ, А. В. КОБЕЛЕВ, А. Н. КАГДИН,  
С. В. АРТЕМОВА, Т. И. ЧЕРНЫШОВА**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И КОМПЛЕКСАХ**



**Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

М. А. КАМЕНСКАЯ, А. В. КОБЕЛЕВ, А. Н. КАГДИН,  
С. В. АРТЕМОВА, Т. И. ЧЕРНЫШОВА

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И КОМПЛЕКСАХ

Утверждено Ученым советом университета в качестве учебного пособия  
для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика  
и электротехника», а также других направлений подготовки бакалавров,  
изучающих курс «Электрические измерения», всех форм обучения

*Учебное электронное издание*



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2023

УДК 321.317  
ББК 31.22  
Э45

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой КБ-6  
«Приборы и информационно-измерительные системы» ФГБОУ ВО  
«МИРЭА – Российский технологический университет»  
*А. Б. Снедков*

Доктор технических наук, профессор,  
проректор по научной работе ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
*Д. Ю. Муромцев*

Э45      **Электрические** измерения в электроэнергетических системах и комплексах [Электронное издание] : учебное пособие / М. А. Каменская, А. В. Кобелев, А. Н. Кагдин, С. В. Артемова, Т. И. Чернышова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования: ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 2,3 Мб ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2611-8

Изложены основные понятия, факты и методы математического анализа. Приведены технологические приемы решения типовых задач.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также других направлений подготовки бакалавров, изучающих курс «Электрические измерения», всех форм обучения.

УДК 321.317  
ББК 31.22

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.  
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2611-8

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2023

## ВВЕДЕНИЕ

---

Вся наша жизнь от рождения до старости неразрывно связана с различного вида измерениями. Человек в повседневной жизни делает множество различных измерений массы, времени, температуры, влажности, давления, расстояния, напряжения в электрической сети. Ученый-хранитель Депо образцовых мер и весов Менделеев Дмитрий Иванович говорил: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять, точная наука немислима без меры». Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Современная метрология – наука о мерах (от греческих слов μέτρον – мера и λόγος, – учение, слово) – объединяет две дисциплины, которые различаются по своим задачам и назначению. С одной стороны, метрология – это наука о точных измерениях. Основной ее задачей является конкретное создание единиц измерения в виде точнейших образцов – эталонов. Для создания образцов измерения метрология разрабатывает специальную методику измерений, которая позволяет достигать точности, необходимой для научных и практических целей.

С другой стороны, метрология – это вспомогательная историческая дисциплина, изучающая историю сложения систем мер, названия единиц измерения, соотношение друг с другом различных мер прошлого, а также единицы налогового обложения и денежного счета, т.е. изучающая различные единицы измерения в историческом развитии.

# 1. ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

---

## 1.1. ДРЕВНЕРУССКАЯ МЕТРОЛОГИЯ

Для измерения длины практически у всех народов использовались размеры тела человека. В древней Руси – вершок, пядь, кулак, ладонь, локоть, сажень. Для определения расстояний и площадей применялись меры, обусловленные физическими возможностями человека. Это нашло отражение в названиях мер: косье – полоса земли (мера площади, применявшаяся при покосе и разделе земли в Вологодской, Ярославской и Московской губерниях), день пути – в зависимости от образа жизни народа, бычий рев – мера для определения расстояния, на котором человек слышит крик быка.

Представления о времени наши далекие предки получали, наблюдая за положением Солнца, Луны и других небесных тел относительно горизонта. Солнечные часы были известны еще в третьем тысячелетии до нашей эры, применялись также в древности песочные и водяные часы. Древнейшим измерительным прибором являются весы.

В древней Руси надзор за мерами и весами был возложен на духовенство.

На территории разных княжеств контроль над мерами осуществляли русские князья.

Уточнению русских мер длины способствовало строительство храмов: строительные материалы должны быть единых размеров.

## 1.2. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ РЕФОРМА ПЕТРА I

При Петре I активно развивались флот, промышленность, торговые связи с западом, в связи с этим наблюдались рост количества и повышение точности измерений. Это привело к введению новых единиц измерений: механических, электрических, тепловых, магнитных.

Произошло сближение русской системы с передовой английской. В стране создается приборостроительная база. В центральных городах и в провинции открываются государственные и частные мастерские для изготовления измерительных приборов. Значительно увеличилось количество законоположений, направленных на упорядочение метрологической и поверочной деятельности.



При Петре I существовало две системы мер длины: сажень-аршин-вершок (согласно Соборному уложению 1649 г.) и сажень-фут-дюйм. Обе системы применялись в России вплоть до XIX в.

В 1736 году в России была организована первая правительственная Комиссия по мерам и весам, которую возглавил директор Монетного правления граф М. Г. Головкин. В процессе работы Комиссии были определены размеры исходных образцов мер длины, веса и объема, выдвинуты идеи по созданию эталонов, основанных на физических постоянных, глава комиссии определил порядок хранения образцовых мер, правила изготовления поверки и клеймения рабочих мер, а также наметил организацию сети поверочных учреждений, установил штаты и расценки за проведение поверки. Однако в начале 1742 г. Комиссия была распущена, а важнейший в метрологическом отношении документ «Регламент» не был утвержден. Работы по упрочению метрологической и поверочной базы продолжались, что нашло отражение в дальнейших законоположениях (Указ 1748 г., Указ 1773 г., Закон 1797 г. и др.).

В мастерских Сестрорецкого оружейного завода выполнялись также заказы по изготовлению точных измерительных приборов и инструментов. Во исполнение указаний Комиссии по мерам и весам 1736 г. здесь в 1747 г.

были изготовлены мастерами Д. Дударовым и Г. Григорьевым по чертежам П. Н. Крекшина образцовые весы для С.-Петербургского монетного двора, на которых, в частности, производились взвешивания (1827–1828 гг.).

В 1771 году по распоряжению Петра I был изготовлен первичный образец мер веса.

В 1797 году был издан Указ с приложением. Указ установил шаровидную форму гирь и новый уменьшенный набор гирь в целях избежания обмана при взвешивании. В качестве материала рекомендовалось использовать чугун. Разрешалось использовать безмены с передвижной гирей. Согласно Указу рекомендовалось установить связь между мерами объема и длины. Автором и основным исполнителем Указа 1797 г. являлся статский советник, управляющий Александровским литейным заводом Карл Карлович Гасконий.

### **1.3. РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЙ**

С конца XVIII по XIX век в России создаются предпосылки для перехода к фабричному производству; мануфактура сменяется фабрикой, на которой происходит разделение труда уже между машинами. В России увеличилось количество научно-исследовательских учреждений (Академия наук, Военно-ученый комитет Главного штаба, университеты, лаборатории при различных ведомствах). Все это вызвало необходимость создания единой научно обоснованной системы мер, опирающейся на эталоны, и организации централизованной регулярной поверки мер, которую могло осуществить постоянно действующее поверочное учреждение. Особое влияние на развитие метрологии в России оказала Англия.

По инициативе Министра финансов Е. Ф. Канкрин для проведения сличений были выписаны образцовые меры из главнейших государств, в том числе из Англии и Франции. Комиссия 1832 г. связала Российскую систему мер с унифицированной английской путем сравнения основных русских мер – сажени с образцовым английским ярдом.

### **1.4. НАДЗОР ЗА МЕРАМИ И ВЕСАМИ И ЗА ОТСУТСТВИЕМ ЗЛОУПОТРЕБЛЕНИЙ**

В 1842 году впервые в истории отечественной метрологии была введена единая система мер на всей территории России, учреждено первое государственное метрологическое и поверочное учреждение.

Согласно Положению платиновые эталоны – фунт и сажень и их основные копии – железная сажень, медный золоченый фунт хранили в С.-Петербургской крепости [1]. Также копии эталонов – железная сажень и медный фунт передавались для хранения в Оружейную палату Москвы. Положение обязало Депо изготовить за казенный счет комплекты образцовых мер и клейма и разослать их в губернские Казенные палаты и Экспедиции для организации поверки и клеймения мер на местах. Заводы-изготовители мер и весов обязаны были иметь свои образцы мер, выверенные в Казенных палатах с нанесением на них клейм палаты. В свою очередь заводы должны были изготавливать по этим образцам и поверять новые меры, налагая на них заводские клейма. Частные же мастерские и отдельные мастера обязаны были, ставить клейма на вновь изготовленные меры и выверять их в Казенных палатах.

Денежный сбор за наложение клейм на вновь изготовленные меры и весы, а также штраф за пользование неверными средствами измерений поступали в пользу городов.

Положение предусматривало проведение только внезапных поверок мер и весов в гостиных дворах, рынках, лавках, мастерских специально назначаемыми представителями городских дум, магистратов, ратуш и разработало процедуру поверок, правила и тарифы.

В конце 1841 года по инициативе Министра финансов Е. Ф. Канкринна на территории Петропавловской крепости было построено Депо образцовых мер и весов. Хранителем Депо был назначен Адольф Яковлевич Купфер (1842 – 1865 гг.) – известный физикохимик, член Академии наук, человек, обладавший специальными знаниями в области метрологии. В обязанности хранителя Депо входили: надзор за сохранением российских нормальных мер и весов (эталонов) и их копий, точнейших копий эталонов; проведение научных метрологических исследований.

С Депо сотрудничали в разные годы известные физикомеханики Академии наук Т. Гиргенсон и Г. Я. Краузе, которые изготавливали точнейшие образцовые средства измерений.





## 1.5. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭТАЛОННОЙ СЛУЖБЫ

Академик А. Я. Купфер разработал два проекта, предусматривающие развитие метрологической и поверочной деятельности в стране. Однако из-за необходимости значительных финансовых затрат оба проекта были отклонены.

Профессор Владимир Семенович Глухов (1865 – 1892 гг.), предложил свою систему преобразования государственной службы мер и весов. Согласно его проекту все дела по мерам и весам рекомендовалось сосредоточить в Министерстве финансов при непосредственном контроле за ними Депо образцовых мер и весов после его преобразования.

Глухов В. С. считал, что в ведении Депо как единого государственного метрологического и поверочного учреждения должны находиться все измерительные приборы, используемые для поверки мер и весов, а также изготовление и оценка новых приборов. Одним из основных мероприятий он считал организацию периодической поверки, которая не проводилась в России более 25 лет.

Так как здание Депо в Петропавловской крепости оказалось непригодным для проведения метрологических и поверочных работ, В. С. Глухов предложил построить новое, специально оборудованное здание с различными лабораториями, оснащенными новейшими средствами измерений.

По ходатайству В. С. Глухова в 1869 г. была создана правительственная комиссия, в состав которой вошли директор Департамента торговли и мануфактур А. Бутовский, представитель Генерального штаба – генерал Д. Обломиевский, академик Г. Вильд и др. Комиссия одобрила предложение В. С. Глухова о необходимости строительства нового здания для Депо, посчитав, что все остальные мероприятия, и, прежде всего, проведение периодической поверки в России могут быть выполнены лишь после того, как начнет функционировать новое здание Депо.

Предварительно В. С. Глухов ознакомился с устройством метрологических и поверочных учреждений в Германии, Франции и Англии, тщательно выбрал место для строительства – на одной из центральных улиц С.-Петербурга (Забалканский пр., 19), в глубине двора, чтобы избежать воздействия на точные меры и приборы сотрясений грунта, вызываемых проездом городского транспорта. Для проведения метрологических исследований В. С. Глухов предусмотрел водяное отопление. Такая планировка позволяет сохранять в центральных помещениях постоянными температуру, влажность, давление и в настоящее время.



Строительство здания по проекту архитектора Ф. Ф. Бекмана было начато в 1875 г. и завершено в декабре 1879 г. В начале 1880 г. сюда было переведено Депо образцовых мер и весов. Штат Депо увеличился до 6 человек.

Проект В.С. Глухова оказал значительное влияние на дальнейшее развитие метрологии и поверочного дела в России, хотя и не был полностью осуществлен при жизни автора.

## 1.6. РЕФОРМА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

Идеи А. Я. Купфера и В. С. Глухова были развиты и претворены в жизнь Дмитрием Ивановичем Менделеевым – всемирно известным естествоиспытателем, государственным деятелем, ученым энциклопедического склада. 19 ноября 1892 г. он становится ученым-хранителем Депо образцовых мер и весов.

Реформа Д. И. Менделеева предначертала путь развития метрологии и поверочного дела на многие годы и была претворена в жизнь усилиями его учеников и последователей в 1920 – 1930-е годы.



## 2. ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

---

Научной основой теории измерений является *метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. В метрологии различают три направления: *теоретическое* (фундаментальное), *законодательное* и *практическое* (прикладное).

Метрология делится на три части:

*Теоретическая метрология* – раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии (рис. 2.1).

*Прикладная метрология* – раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии [2].

*Законодательная метрология* – раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимости точности измерений в интересах общества.

Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов и процессах с заданной точностью и достоверностью. Основным понятием метрологии является *измерение*.

*Измерением* называют процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств (средств измерений).

Базовыми понятиями метрологии и измерительной техники являются *измерение, единство измерений, точность измерений* (рис. 2.2).

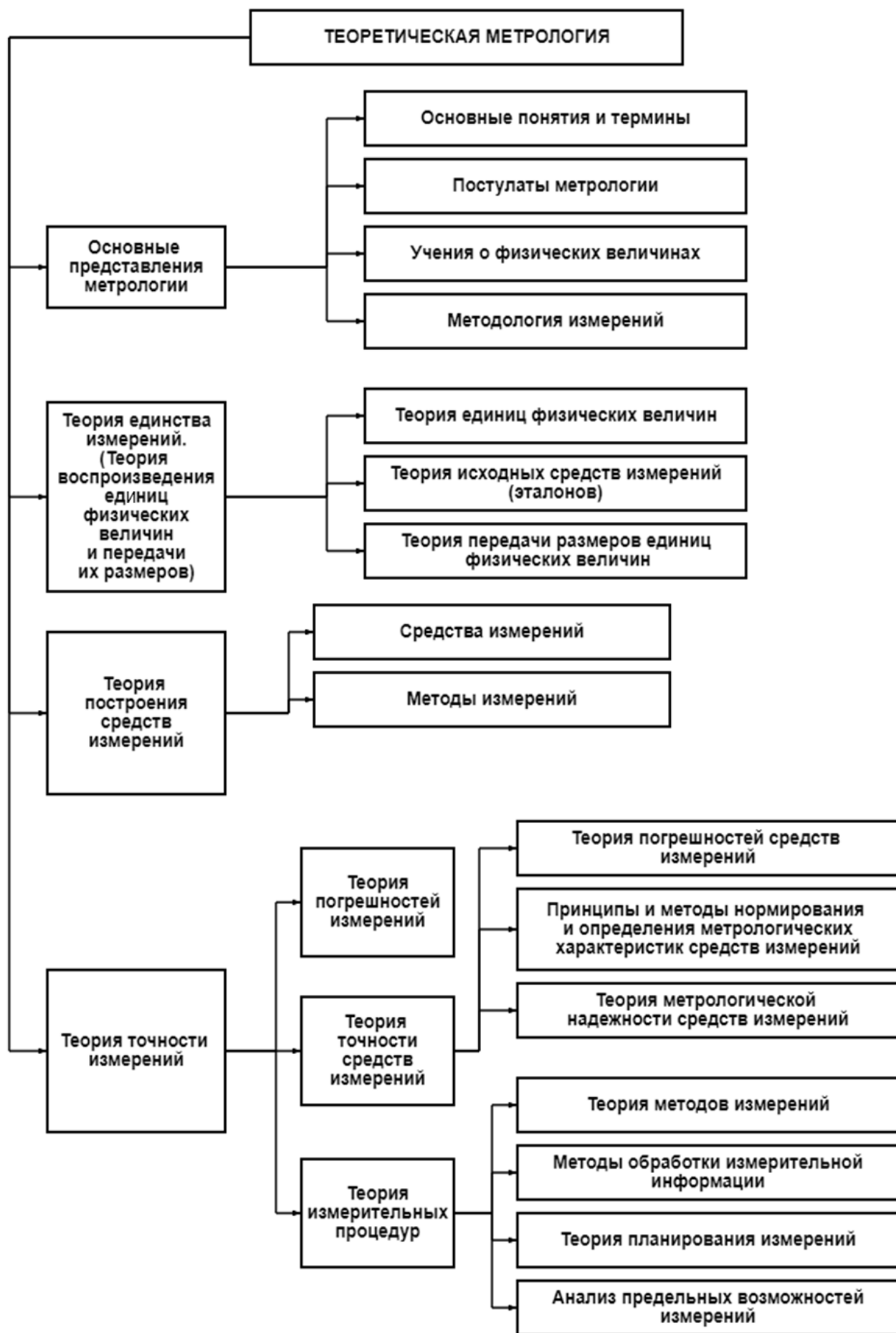


Рис. 2.1. Структура теоретической метрологии



Рис. 2.2. Структура базовых понятий измерительной техники

## 2.1. ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА

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

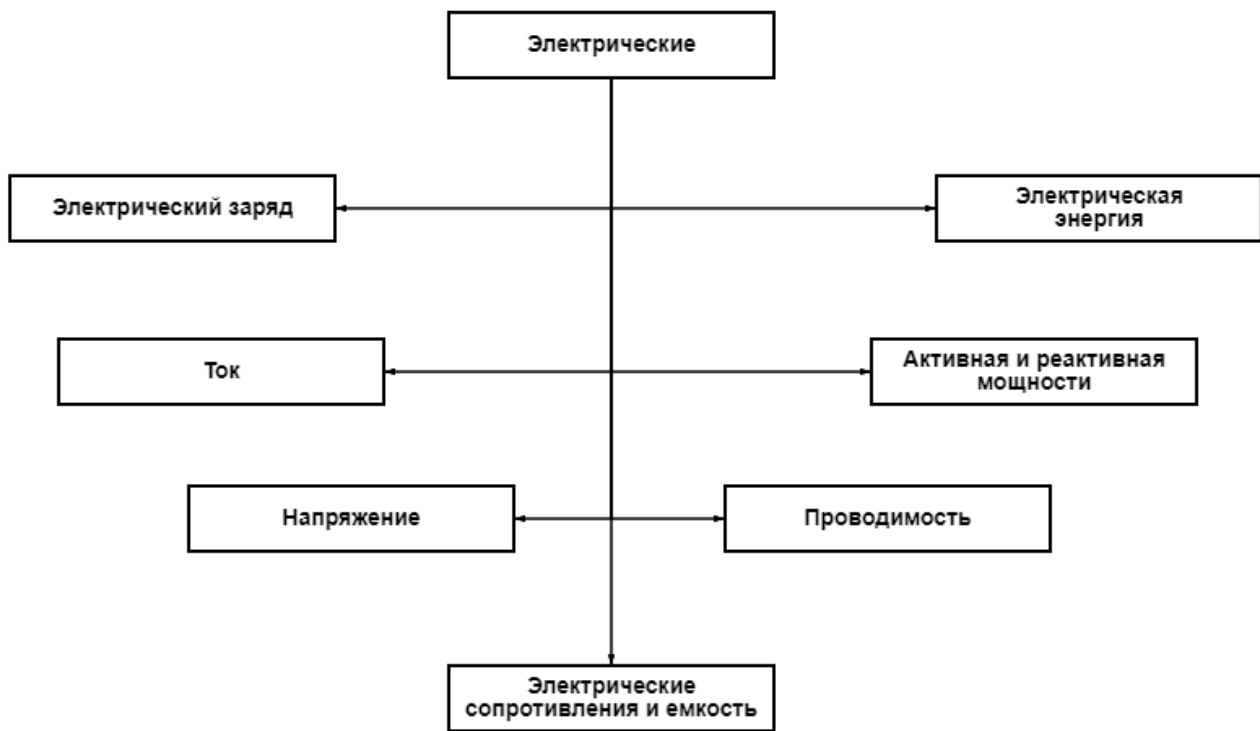


Рис. 2.3 Электрические физические величины

Все многообразие ФВ может быть классифицировано по множеству различных признаков. Все ФВ подразделяются на две группы: неэлектрические и электрические величины.

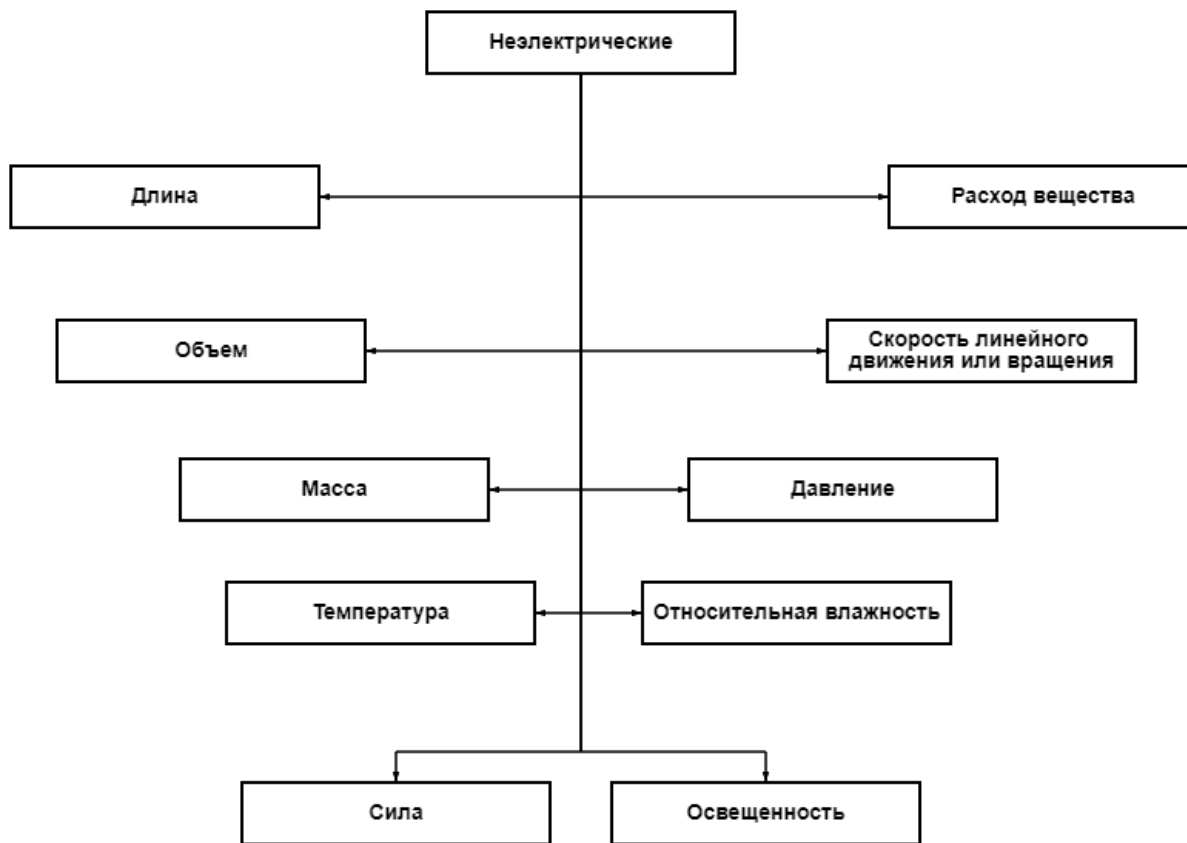
Значение ФВ – выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц (значение силы тока в электрической цепи  $I = 10,2 \text{ A}$ ).

*Истинное значение ФВ* – значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

*Действительное значение величины* – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

## 2.2. ВИДЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

*Средство измерений (СИ)* – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и(или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени [1].



**Рис. 2.4. Неэлектрические физические величины**

*Метрологическая характеристика средств измерений (МХ СИ)* – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность.

*Измерительный сигнал* – сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине.

Измерительная задача – задача, заключающаяся в определении значения физической величины путем ее измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений.

*Мера* – это СИ, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Например, нормальный гальванический элемент – мера ЭДС; образцовый (измерительный) резистор; образцовая катушка индуктивности [2].

*Измерительный преобразователь (ИП)* – СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для дальнейшего преобразования, передачи, обработки, хранения, но не предназначенной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительный преобразователь не имеет отсчетного устройства, и поэтому результат преобразования не может быть непосредственно воспринят человеком (измерительные трансформаторы



тока и напряжения, измерительные усилители, делители напряжения, шунты, добавочные резисторы, цифровые измерительные регистраторы (логгеры)).

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

*Измерительные установки* – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте.

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

*Измерительная система (ИС)* – совокупность функционально объединенных измерительных средств, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту в форме удобной для передачи и автоматической обработки.

### 2.3. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИЗМЕРЕНИЙ

*Измерение* – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины [3].



Рис. 2.5. Основные этапы проведения измерений

## 2.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ОБЩИМ ПРИЕМАМ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Получать значения ФВ (результаты измерений) можно различными способами. В практике электрических измерений применяются разнообразные виды и методы измерений. Существуют следующие виды измерений: прямые, косвенные, совокупные и совместные. Наиболее распространены прямые и косвенные измерения.

*Прямые измерения* – измерения, при которых искомое значение измеряемой величины находят непосредственно из опытных данных по снятию показаний измерительного прибора (измерение напряжения вольтметром, измерение силы тока амперметром).

*Косвенные измерения* – определение искомого значения ФВ на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной (измерение мощности  $P$  на активной нагрузке  $R$  с помощью амперметра  $A$  и вольтметра  $V$ ):

$$P = UI, \quad (2.1)$$

где  $U$  – напряжение на нагрузке  $R$ , измеренное вольтметром;  $I$  – ток в нагрузке, измеренный амперметром.

В современных цифровых ИП вычисления искомой измеряемой величины производятся «внутри» прибора. В результате измерения определяются как прямые измерения.

*Совокупные измерения* – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

*Совместными измерениями* – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними.

По *характеристике точности* измерения делятся на равноточные и неравноточные.

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

*Неравноточными* называются измерения ФВ, выполненные различными по точности СИ и(или) в разных условиях. Методика обработки результатов равноточных и неравноточных измерений различна.

В зависимости от *числа измерений*, проводимых во время эксперимента, различают одно- и многократные измерения. *Однократными* называются измерения, выполненные один раз.

*Многократными* называются измерения ФВ одного и того же размера, результат которых получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящих из ряда однократных измерений.

По *отношению к изменению измеряемой величины* измерения делятся на статические и динамические.

К *статическим* относятся измерения ФВ, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения. *Динамические измерения* – это измерения изменяющейся по размеру ФВ. Признаком, по которому измерение относят к статическому или динамическому, является динамическая погрешность при данной скорости или частоте изменения измеряемой величины и заданных динамических свойствах СИ. Предположим, что она пренебрежимо мала (для решаемой измерительной задачи). В этом случае измерение можно считать статическим. При невыполнении указанных требований оно является динамическим.

В зависимости от *метрологического назначения* измерения делятся на технические и метрологические. *Технические* измерения проводятся рабочими СИ. *Метрологические* измерения выполняются с помощью эталонов с целью воспроизведения единиц ФВ для передачи их размера рабочим СИ.

В зависимости от *выражения результатов измерений* последние подразделяются на абсолютные и относительные. *Абсолютное* измерение основано на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и(или) использовании значений физических констант.

*Относительное измерение* – это измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

## **2.5. ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ**

*Принцип измерений* – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений (применение эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения).

*Метод измерений* – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Классификация методов измерений:

1. *Метод непосредственной оценки* – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

2. *Метод сравнения с мерой* – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с известной ЭДС нормального элемента).

3. *Нулевой метод измерений* – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. (пример – измерения электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием).

4. *Метод измерений замещением* – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины.

5. *Метод измерений дополнением* – метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению.

6. *Дифференциальный метод измерений* – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины и при котором измеряется разность между этими двумя величинами.

7. *Контактный метод измерений* – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения.

8. *Бесконтактный метод измерений* – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения.

## 2.6. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

*Погрешность измерения* – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

1. Истинное значение величины неизвестно, его применяют только в теоретических исследованиях.

2. На практике используют действительное значение величины  $X_d$ , в результате чего погрешность измерения  $\Delta X_{изм}$  определяют по формуле

$$\Delta X_{\text{изм}} = X_{\text{изм}} - X_{\text{д}}, \quad (2.2)$$

где  $X_{\text{изм}}$  – измеренное значение величины.

*Неопределенность (измерения)* – параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

*Систематическая погрешность измерения* – составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

В зависимости от характера измерения систематические погрешности подразделяют на *постоянные, прогрессивные, периодические* и *погрешности, изменяющиеся по сложному закону*.

*Постоянные погрешности* – погрешности, которые длительное время сохраняют свое значение, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто.

*Прогрессивные погрешности* – непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле ее прибором активного контроля.

*Периодические погрешности* – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

*Погрешности, изменяющиеся по сложному закону*, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

*Инструментальная погрешность измерения* – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

*Погрешность метода измерений* – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений.

Вследствие упрощений, принятых в уравнениях для измерений, нередко возникают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Погрешность метода иногда называют *теоретической погрешностью*. Иногда погрешность метода может проявляться как случайная.

*Погрешность (измерения) из-за изменений условий измерения* – составляющая систематической погрешности измерения, являющаяся следствием

неучтенного влияния отклонения в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений, от установленного значения.

Этот термин применяют в случае неучтенного или недостаточно учтенного действия той или иной влияющей величины (температуры, атмосферного давления, влажности воздуха, напряженности магнитного поля, вибрации и др.); неправильной установки средств измерений, нарушения правил их взаимного расположения и др.

*Субъективная погрешность измерения* – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора.

Встречаются операторы, которые систематически опаздывают (или опережают) снимать отсчеты показаний средств измерений. Иногда субъективную погрешность называют *личной погрешностью* или *личной разностью*.

*Неисключенная систематическая погрешность* – составляющая погрешности результата измерений, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок на влияние систематических погрешностей или систематической погрешностью, поправка на действие которой не введена вследствие ее малости.

Иногда этот вид погрешности называют *неисключенный остаток систематической погрешности*. Неисключенная систематическая погрешность характеризуется ее границами.

Границы неисключенной систематической погрешности  $\Theta$  при числе слагаемых  $N \leq 3$  вычисляют по формуле

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^N |\Theta_i|, \quad (2.3)$$

где  $\Theta_i$  – граница  $i$ -й составляющей неисключенной систематической погрешности.

При числе неисключенных систематических погрешностей  $N \geq 4$  вычисления проводят по формуле

$$\Theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^N \Theta_i^2}, \quad (2.4)$$

где  $K$  – коэффициент зависимости отдельных неисключенных систематических погрешностей от выбранной доверительной вероятности  $P$  при их равномерном распределении (при  $P = 0,99$ ,  $K = 1,4$ ). Здесь  $\Theta$  рассматривается как доверительная квазислучайная погрешность.

*Случайная погрешность измерения* – составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины.

*Абсолютная погрешность измерения* – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

*Относительная погрешность измерения* – погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины.

Относительную погрешность в долях или процентах находят из отношений

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \text{ или } \delta = \frac{\Delta x}{x} 100\%, \quad (2.5)$$

где  $\Delta x$  – абсолютная погрешность измерений;  $x$  – действительное или измеренное значение величины.

*Рассеяние результатов в ряду измерений* – несовпадение результатов измерений одной и той же величины в ряду равноточных измерений, как правило, обусловленное действием случайных погрешностей.

*Размах результатов измерений* – оценка  $R_n$  рассеяния результатов единичных измерений физической величины, образующих ряд (или выборку из  $n$  измерений), вычисляемая по формуле

$$R_n = x_{\max} - x_{\min}, \quad (2.6)$$

где  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значения физической величины в данном ряду измерений.

Рассеяние обычно обусловлено проявлением случайных причин при измерении и носит вероятностный характер.

*Средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений* – оценка  $S$  рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.7)$$

где  $x_i$  – результат  $i$ -го единичного измерения;  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение измеряемой величины из  $n$  единичных результатов.

На практике широко распространен термин *среднее квадратическое отклонение* – (СКО). Под отклонением в соответствии с формулой (2.7) понимают отклонение единичных результатов в ряду измерений от их среднего арифметического значения. В метрологии, как отмечено в 2.6, это отклонение называется погрешностью измерений. Если в результаты измерений введены поправки на действие систематических погрешностей, то отклонения представляют собой случайные погрешности. Поэтому с точки зрения упорядочения совокупности терминов, родовым среди которых является термин «погрешность измерения», целесообразно применять термин «средняя квадратическая погрешность». При обработке ряда результатов измерений, свободных от систематических погрешностей, СКП и СКО являются одинаковой оценкой рассеяния результатов единичных измерений

*Средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического* – оценка  $S_{\bar{x}}$  случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений одной и той же величины в данном ряду измерений, вычисляемая по формуле

$$S_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (2.8)$$

где  $S$  – средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений, полученная из ряда равнозначных измерений;  $n$  – число единичных измерений в ряду.

*Доверительные границы погрешности результата измерений* – наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений.

1. Доверительные границы в случае нормального закона распределения вычисляются как  $\pm tS$ ,  $\pm tS_{\bar{x}}$ , где  $S$ ,  $S_{\bar{x}}$  – средние квадратические погрешности соответственно единичного и среднего арифметического результатов измерений;  $t$  – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности  $P$  и числа измерений  $n$ .

2. При симметричных границах термин может применяться в единственном числе – *доверительная граница*.

3. Иногда вместо термина *доверительная граница* применяют термин *доверительная погрешность* или *погрешность при данной доверительной вероятности*.



*Поправка* – значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения в целях исключения составляющих систематической погрешности.

Знак поправки противоположен знаку погрешности. Поправку, прибавляемую к номинальному значению меры, называют *поправкой к значению меры*; поправку, вводимую в показание измерительного прибора, называют *поправкой к показанию прибора*.

*Точность результата измерений* – одна из характеристик качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения.

*Погрешность метода поверки* – погрешность применяемого метода передачи размера единицы при поверке.

*Погрешность градуировки средства измерений* – погрешность действительного значения величины, приписанного той или иной отметке шкалы средства измерений в результате градуировки.

*Погрешность воспроизведения единицы физической величины* – погрешность результата измерений, выполняемых при воспроизведении единицы физической величины.

Примечание. Погрешность воспроизведения единицы с помощью государственных эталонов обычно указывают в виде ее составляющих: неисключенной систематической погрешности; случайной погрешности; нестабильности за год.

*Погрешность передачи размера единицы физической величины* – погрешность результата измерений, выполняемых при передаче размера единицы.

*Статическая погрешность измерений* – погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения.

*Динамическая погрешность измерений* – погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения.

*Промах* – погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Иногда вместо термина «промах» применяют термин *грубая погрешность измерений*.

*Предельная погрешность измерения в ряду измерений* – максимальная погрешность измерения ( $\pm$ ), допускаемая для данной измерительной задачи.

Примечание. Во многих случаях погрешность  $3S$  принимают за предельную, т.е.  $\Delta_{пр} = \pm 3S$ . При необходимости за предельную погрешность может быть принято и другое значение погрешности.

*Погрешность результата однократного измерения* – погрешность одного измерения (не входящего в ряд измерений), оцениваемая на основании известных погрешностей средства и метода измерений в данных условиях (измерений).

*Суммарная средняя квадратическая погрешность результата измерений* – погрешность результата измерений (состоящая из суммы случайных и неисключенных систематических погрешностей, принимаемых за случайные), вычисляемая по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S^2 + S_{\Theta}^2}, \quad (2.9)$$

где  $S_{\Theta} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_i \Theta_i^2}$  – средняя квадратическая погрешность суммы неисключенных систематических погрешностей при равномерном распределении (принимаемых за случайные).

Примечание. Доверительные границы суммарной погрешности  $(\Delta x)_{\Sigma}$  могут быть вычислены по формуле

$$(\Delta x)_{\Sigma} = \pm t_{\Sigma} S_{\Sigma}, \quad (2.10)$$

где  $t_{\Sigma} = \frac{\Theta + t S_{\bar{x}}}{S_{\Theta} + S_{\bar{x}}}$ ;  $\Theta$  – граница суммы неисключенных систематических погрешностей результата измерений, вычисляемая по формулам (2.3) или (2.4).

## 2.7. КЛАССИФИКАЦИЯ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

*Нормальные условия измерений* – условия измерения, характеризуемые совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости.

Примечание. Нормальные условия измерений устанавливаются в нормативных документах на СИ конкретного типа или по их поверке (калибровке). Нормальное значение влияющей величины – значение влияющей величины, установленное в качестве номинального.

*Рабочие условия измерений* – условия измерений, при которых значения влияющих величин находятся в пределах рабочих областей.

1. Для измерительного конденсатора нормируют дополнительную погрешность на отклонение температуры окружающего воздуха от нормальной.

2. Для амперметра нормируют изменение показаний, вызванное отклонением частоты переменного тока от 50 Гц (50 Гц в данном случае принимают за нормальное значение частоты).

*Предельные условия измерений* – условия измерений, характеризующиеся экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые средство измерений может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

## 2.8. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ

Под *единством измерений* понимают такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности результатов измерений известны с известной или заданной вероятностью. Единство измерений позволяет сопоставлять результаты измерений, выполненные в разных местах, в разное время, разными специалистами, с помощью разных средств измерений. Единство измерений обеспечивается использованием общепринятой системы единиц ФВ, эталонами и образцовыми СИ, соответствующей НТД.

## 2.9. СТАНДАРТИЗАЦИЯ

В XX веке была принята система единиц SI. Законодательной основой стандартизации является система Государственных стандартов (ГОСТ).

Базовой составляющей стандартизации является метрологическое обеспечение. Под *метрологическим обеспечением* понимается наличие и грамотное использование эталонов, мер, аттестованных образцовых СИ, узаконенных методов поверки, необходимой НТД, квалифицированных специалистов-метрологов.

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

*Стандарт* – это нормативно-технический документ, устанавливающий перечень норм, правил, требований к объекту (стандартизации) и утвержденный уполномоченным органом (например, Госстандартом России).



Рис. 2.6. Пример обозначения ГОСТ

*Метрологическая аттестация* – это исследование СИ, выполняемое метрологическим органом для определения МХ СИ, и оформление соответствующего документа (сертификата) с указанием полученных результатов.

*Поверка СИ* – установление органом государственной метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям.

*Калибровка* – способ уменьшения систематических погрешностей СИ, т.е. коррекция его характеристики преобразования.

*Эталон* – СИ (или комплекс СИ), предназначенное для воспроизведения и(или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

## 2.10. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Качество электроэнергии определяет возможности технологического процесса (особенно, при применении высоких технологий), производительность оборудования, устойчивость и надежность его работы, общие потери энергии и затраты, и в итоге – качество и стоимость продукции объекта.

В некоторых случаях при ухудшении качества электроэнергии возможны аварии и, как следствие, значительный ущерб производству или объектам ЖКХ.

Различные виды электрооборудования по-разному реагируют на искажения напряжения. Например, лампы накаливания, или электрические нагреватели не реагируют на большинство типичных искажений сетевого напряжения. В то же время некоторые потребители довольно капризны и требуют высокого качества электрической энергии.



**Рис. 2.7. Схема передачи размера единицы физической величины**

Среди них, например, станки с электронным (числовым) программным управлением, роботизированные комплексы, различные микропроцессорные контроллеры, оргтехника, персональные компьютеры. Причем число таких потребителей в общем составе электрооборудования непрерывно растет. Чем выше технологическая культура на предприятии, тем больше доля таких чувствительных к качеству электрической энергии объектов. Для подобных потребителей даже незначительные искажения сети могут приводить к серьезным последствиям.

Для определения и устранения причин сбоев и нештатной работы такого рода оборудования, для оценки его восприимчивости к конкретным искажениям необходимо владеть методами определения отдельных параметров электрических сигналов и цепей, необходимо иметь современную высокопроизводительную микропроцессорную и компьютерную регистрирующую и анализирующую измерительную технику.

В процессе передачи, распределения, преобразования и потребления электрической энергии в электрических сетях и цепях основные параметры

переменного сигнала – носителя энергии – могут меняться. (Форма кривой напряжения, вырабатываемого электрическими станциями, как правило, достаточно близка к синусоидальной (практически это чистый гармонический сигнал), и частота сигнала не сильно отличается от 50 Гц. Но специфический потребитель (например, мощный электропривод технологического объекта с тиристорным управлением) может сильно изменить форму напряжения).

Наиболее вероятными виновниками ухудшения качества электроэнергии могут выступать как энергоснабжающие организации, так и потребители со специфической нагрузкой. Например, в значительном отклонении частоты сети от номинала виноват поставщик энергии, а в сильной несинусоидальности – скорее всего, потребитель с нелинейной нагрузкой.

Качество электроэнергии в нашей стране нормируется ГОСТ 13109–97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

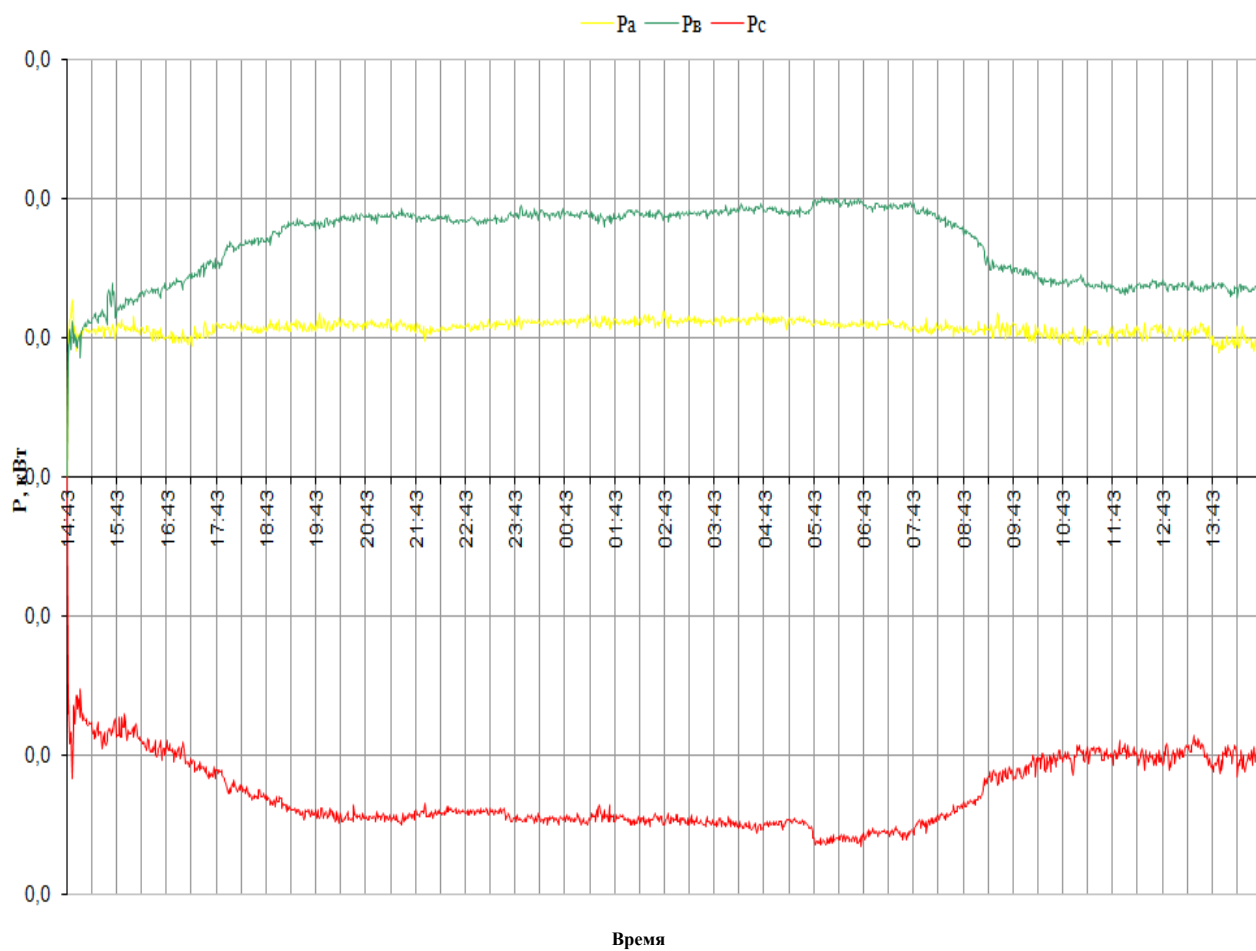
К основным показателям качества электроэнергии (ПКЭ) относятся: отклонение напряжения; колебания напряжения; несинусоидальность напряжения; несимметрия напряжения; отклонение частоты; провал напряжения; импульс напряжения и временное перенапряжение.

Указанный стандарт устанавливает требования к основным ПКЭ. Если режимы работы электрической сети нормальны, то значения ПКЭ не выходят за пределы нормальных значений.

## 2.11. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

В реальных технологических процессах при обычно изменяющейся во времени нагрузке (включение и отключение нескольких различных потребителей электроэнергии) коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ) меняется во времени и тоже может быть представлен функцией времени  $k_m(t)$ . На рисунке 2.8 приведен пример реальной диаграммы, зарегистрированной на вводно-распределительном устройстве механического цеха промышленного предприятия в течение суток. Значения функции коэффициента мощности  $k_m(t)$  менялись в довольно широком диапазоне – от 1,0 до 0,23.

Отметим, что отрицательные значения коэффициента мощности  $k_m$  означали бы емкостной характер нагрузки. Чем ближе значение  $k_m$  к единице, тем лучше. При чисто активных потребителях (идеализированный вариант) значение этого коэффициента было бы равно единице.



**Рис. 2.8. Графики активной фазной мощности**

## 3. СРЕДСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

---

### 3.1. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

*Измерительный прибор (ИП)* – наиболее распространенный вид средств измерений. Все ИП можно поделить на две большие группы: аналоговые и цифровые.

*Аналоговые измерительные приборы (АИП)* – это такие приборы, показания которых являются непрерывной функцией изменения входной измеряемой величины (которая принимает бесконечное множество значений в определенном диапазоне). Группу АИП можно представить двумя подгруппами: приборы для статических измерений (вольтметры, амперметры, омметры) и приборы для динамических измерений.

Приборы для динамических измерений в свою очередь делятся на показывающие АИП (например, электронно-лучевые осциллографы, анализаторы спектра) и регистрирующие приборы (например, самопишущие приборы, светолучевые осциллографы).

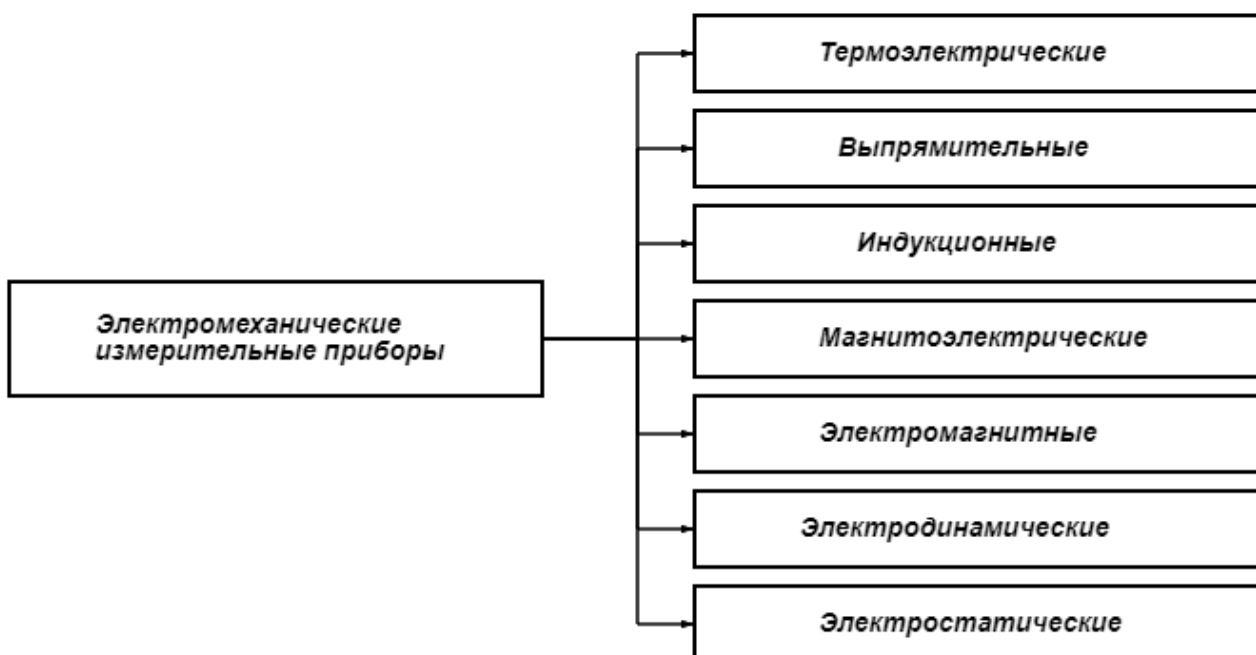
*Электромеханические ИП* основаны на преобразовании электрической энергии входного сигнала в механическую энергию углового (реже – линейного) перемещения подвижной части отсчетного устройства. Кроме самостоятельного применения, электромеханические

ИП используются также в качестве выходных устройств большинства электронных АИП.

*Электронные ИП* – это такие АИП, в которых энергия для механического перемещения указателя отсчетного устройства поступает не от источника измеряемого сигнала (как в электромеханических приборах), а от вспомогательного источника энергии, например от электрической сети, питающей прибор.

Большинство используемых сегодня в технологических процессах стационарных измерительных приборов – это классические аналоговые электромеханические приборы. Их метрологические и эксплуатационные характеристики вполне достаточны для решения основных задач технических измерений. Широко распространены электромеханические вольтметры, амперметры, омметры, фазометры, ваттметры, счетчики активной и реактивной энергии.





**Рис. 3.1.** Классификация электромеханических измерительных приборов

В электромеханических измерительных приборах реализованы различные физические принципы, позволяющие преобразовать значение измеряемой величины в пропорциональное отклонение (видимое перемещение) указателя (например, стрелки прибора).

Упрощенная классификация электромеханических измерительных приборов приведена на рис. 3.1.

### **3.2. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ЦИФРОВЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ**

В практике электрических измерений все шире используются цифровые методы и средства преобразования, хранения, обработки, передачи и представления информации. Цифровые инструменты активно вытесняют аналоговые средства при измерении самых разных физических величин. Широко применяются цифровые вольтметры, мультиметры, частотомеры, омметры, ваттметры, контактные и бесконтактные термометры, расходомеры, тахометры, манометры, анемометры, измерители относительной влажности, освещенности, цифровые регистраторы, осциллографы, анализаторы различных параметров, компьютерные измерительные устройства, комплексы, системы [4].

Во всем многообразии цифровых средств измерений наибольший интерес для нас представляют две большие группы (два вида СИ): измерительные приборы и измерительные преобразователи.

*Первую группу* составляют автономные, сравнительно медленно действующие цифровые измерительные приборы, предназначенные в основном для статических однократных измерений, выполняемых вручную оператором.

*Вторая группа* – это различные цифровые измерительные преобразователи, предназначенные для работы в составе информационно-измерительных систем, измерительно-вычислительных комплексов, автоматизированных измерительных установок. Они обладают высоким быстродействием.

Довольно широко распространены цифровые регистрирующие измерительные приборы и преобразователи, обеспечивающие возможности длительной регистрации процессов.

В данном подразделе рассмотрим варианты организации основной (общей для всех цифровых СИ) процедуры – аналого-цифрового преобразования; а также особенности построения и применения представителей первой группы – цифровых измерительных приборов (ЦИП), которые, в отличие от измерительных преобразователей, предназначены в основном для работы с человеком. По всем основным показателям ЦИП превосходят аналоговые измерительные приборы, у них гораздо более высокие метрологические и эксплуатационные характеристики.

Современные ЦИП представляют собой высокопроизводительные интеллектуальные средства исследования объектов и процессов, поскольку строятся на основе микропроцессорной техники. Структуры ЦИП, предназначенных для измерения различных ФВ, во многом схожи. Различия между ними сосредоточены в основном во входных узлах приборов, т.е. там, где происходят преобразования конкретных величин в унифицированный сигнал.

### **3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Наиболее важным и ответственным узлом любого цифрового средства измерений является аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – поскольку именно он определяет основные метрологические характеристики и быстродействие всего прибора. Задача АЦП – автоматически трансформировать бесконечное множество возможных значений входной аналоговой величины в конечное множество (в ограниченный набор цифровых эквивалентов, кодов). Разрядность АЦП, его погрешности, чувствительность, быстродействие, надежность в значительной мере определяют окончательную достоверность

результатов измерения и регистрации, характеристики цифровой измерительной аппаратуры.

Рассмотрим основные характеристики АЦП, знание которых необходимо для правильного сравнения возможностей различных преобразователей. Для определенности будем полагать в дальнейших рассуждениях, что входным сигналом АЦП является напряжение постоянного тока.

*Длина шкалы  $L$*  характеризует число возможных уровней преобразования (ступеней характеристики преобразования) АЦП. Этот термин возник на заре цифровой измерительной техники по аналогии с длиной шкалы (числом делений) аналоговых стрелочных измерительных приборов. Длина шкалы  $L$  ЦИП определяется разрядностью АЦП.

*Разрядность  $n$*  – это число двоичных разрядов (бит) –или десятичных разрядов. Если разрядность АЦП –  $n$  двоичных разрядов (бит), то длина шкалы  $L = 2^n$ . Например, при  $n = 11$  бит значение  $L = 2048$ . Если разрядность АЦП –  $n$  десятичных разрядов,  $L = 10^n$ . Например, при  $n$ , равном четырем полным десятичным разрядам, значение  $L = 9999$  (как говорят при этом – «четыре девятки»), или округленно  $L = 10\,000$ .

Цифровые средства измерения, предназначенные для работы с человеком (а не в составе измерительных систем), имеют десятичные цифровые отсчетные устройства, т.е. индикаторы, отражающие числа в десятичной системе счисления и состоящие из нескольких десятичных разрядов. Характеризовать отсчетное устройство (индикатор) ЦИП при этом можно по-разному.

Один из способов – задание максимального числа возможных значений выходного цифрового кода (точек) на отсчетном устройстве, т.е. указание длины шкалы  $L$ . Например,  $L = 999$  точек (или округленно – 1000 точек).

Другой способ – задание числа десятичных разрядов  $n$ . Причем число десятичных разрядов  $n$  может быть как целым (например, 4 десятичных разряда), так и дробным (например,  $n = 3\frac{1}{3}$  разряда).

*Разрешающая способность  $R$  (Resolution)* – это величина, обратная длине шкалы  $L$  ( $R = 1:L$ ) и характеризующая чувствительность АЦП. Чем больше длина шкалы  $L$ , тем лучше разрешающая способность  $R$  и тем, следовательно, выше качество преобразования.

*Значение кванта  $q$  (quant)* – единицы младшего значащего разряда (МЗР) определяется отношением номинального  $U_{\text{ном}}$  значения входного напряжения (или верхнего значения диапазона измерения) к длине шкалы  $L$ :

$$Q = U_{\text{ном}}/L. \quad (3.1)$$

Для двоичных АЦП значение кванта  $q$  иногда обозначается Least Significant Bit (LSB), для десятичных АЦП – Least Significant Digit (LSD).

Погрешность квантования  $\Delta_{\text{кв}}$  – важное понятие цифровой измерительной техники. Одним из основных источников недостоверности преобразования аналогового сигнала в цифровой код является процедура квантования, т.е. автоматического округления. Преобразование бесконечного множества возможных значений входного напряжения  $U$  в конечное число возможных уровней выходного кода неизбежно приводит к появлению погрешности квантования  $\Delta_{\text{кв}}$ . Эта погрешность принципиально неистребима, но может быть удовлетворительно малой.

Функция погрешности квантования  $\Delta_{\text{кв}}$  – это разница между реальной ступенчатой характеристикой преобразования и идеальной линейной (рис. 3.2).

Конкретное значение погрешности  $\Delta_{\text{кв}}$  в каждом отдельном результате преобразования – это случайная величина, равномерно распределенная на интервале кванта  $q$ . Все возможные значения этой погрешности лежат в диапазоне  $\pm q/2$  (плюс – минус половина кванта). Максимальное значение погрешности  $\Delta_{\text{кв}}$  составляет по модулю  $q/2$ . Конечно, суммарная погрешность АЦП определяется не только погрешностью квантования. Реальная суммарная погрешность современных АЦП обычно находится в диапазоне 2...5 единиц младшего значащего разряда (т.е.  $2q...5q$ ).

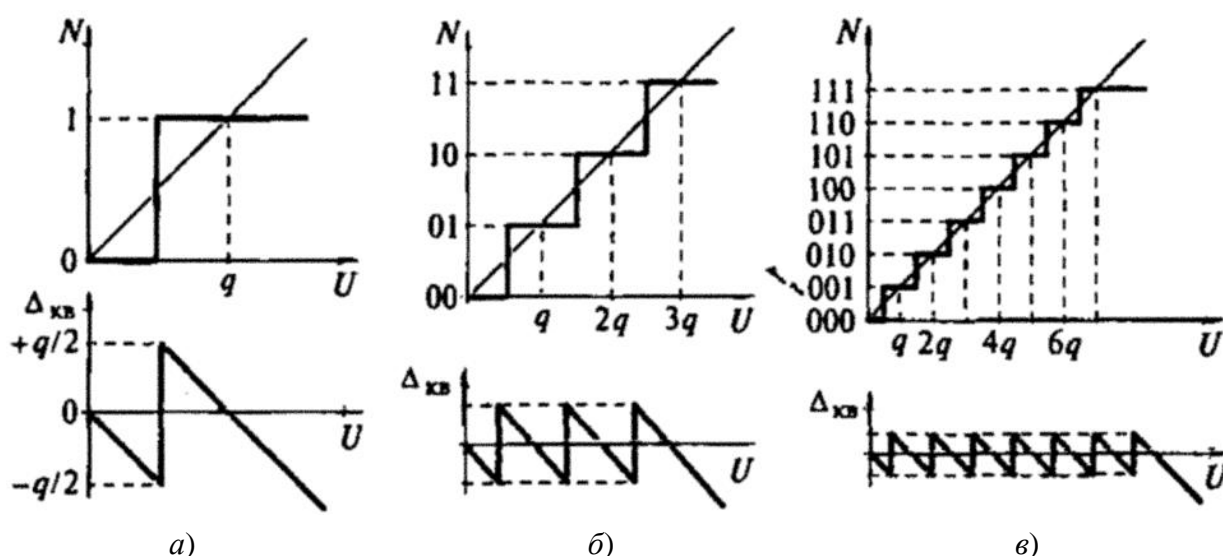


Рис. 3.2. Связь разрядности, длины шкалы и погрешности квантования:

$a - n = 1$  бит;  $L = 2$ ,  $R = 1:2$ ;  $б - n = 2$  бита;  $L = 2^2 = 4$ ,  $R = 1:4$ ;

$в - n = 3$  бита,  $L = 2^3 = 8$ ,  $R = 1:8$

Рисунок 3.2 иллюстрирует зависимость выходного кода  $N$  АЦП от значения входного напряжения  $U$ , а также связь основных понятий: разрядности  $n$ , длины шкалы  $L$ , разрешающей способности  $R$ , веса кванта  $q$  и значения погрешности квантования  $\Delta_{\text{кв}}$  на примере двоичных АЦП, входной сигнал которых – напряжение постоянного тока  $U$ . Случай разрядности  $n = 1$  бит (рис. 3.2, *а*) соответствует простейшему АЦП с двумя возможными состояниями – 0/1. Случай разрядности  $n = 2$  бита (рис. 3.2, *б*) соответствует АЦП с длиной шкалы  $L = 4$ . Случай  $n = 3$  бита (рис. 3.2, *в*) соответствует длине шкалы АЦП  $L = 8$ . Чем больше число двоичных разрядов, тем больше длина шкалы  $L$  (больше число возможных уровней квантования  $N_m$ ), тем меньше погрешность квантования  $\Delta_{\text{кв}}$ .

В таблице 3.1 приведены некоторые количественные значения длины шкалы  $L$  и разрешающей способности  $R$ , соответствующие различным значениям разрядности  $n$  современных двоичных АЦП.

По значению разрешающей способности  $R$  можно косвенно судить о метрологических характеристиках конкретного типа АЦП (его возможной чувствительности и точности).

*Частота дискретизации*  $F_d$  – одна из важнейших характеристик АЦП, позволяющая оценить его динамические свойства (скорость преобразования), т.е. возможность его работы с быстро меняющимися сигналами, что особенно важно для системных цифровых вольтметров. Значение  $F_d$  может выражаться числом результатов преобразования в секунду – отсчетов в секунду (Samples/s), или слов/с, или в герцах.

### 3.1. Соотношение между разрядностью АЦП, длиной шкалы и разрешающей способностью

$n$ , бит	$L$ , число точек	$R$
6	64	0,016 (1,6%)
8	256	0,0039 (0,39%)
10	1024	0,00098 (0,098%)
12	4096	0,00024 (0,024%)
14	16384	0,000061 (61 ppm)
16	65 536	0,00015 (15 ppm)
18	262 144	0,0000038 (3,8 pmm)
20	1 048 576	0,95 ppm
22	4 194 304	0,24 ppm
24	16 777 216	0,060 ppm

*Примечание.* 1 pmm (part-per-million) – одна миллионная часть.

Например, если сказано, что  $F_d = 1$  МГц (или  $F_d = 1$  Мслов/с, или  $F_d = 1$  MSamples/s), то это означает, что при изменяющемся входном напряжении преобразователь в течение 1 с может выдать 1 млн различных результатов, соответствующих текущим (мгновенным) значениям входного сигнала.

*Длительность цикла преобразования* (шаг дискретизации)  $T_{ц}$  АЦП – это величина, обратная частоте дискретизации  $F_d$ , означающая интервал времени, необходимый для выполнения одного полного цикла преобразования. Значение  $T_{ц}$  выражается в единицах времени: с, мс, мкс и т.д. Если известно значение частоты, например,  $F_d = 1$  МГц, то значение  $T_{ц} = 1$  мкс.

### 3.4. МЕТОДЫ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

При построении цифрового измерительного оборудования применяются различные методы и средства преобразования аналоговой информации в цифровую, отличающиеся метрологией, помехозащищенностью, динамикой. Рассмотрим и сравним возможности и основные характеристики некоторых из них, наиболее распространенных.

В цифровой измерительной технике достаточно широко применяется *преобразователь* (считающийся классическим типом АЦП) *последовательного приближения* (поразрядного уравнивания) Successive Approximation ADC – с устройством выборки и хранения (УВХ) на входе. УВХ обеспечивает выполнение дискретизации входного сигнала, т.е. переход к дискретному времени.

Один цикл преобразования входного измеряемого напряжения  $U_x$  в этом методе состоит из нескольких тактов. Уравнивание выполняется с помощью автоматически изменяющегося компенсирующего напряжения. Процесс преобразования заключается в поочередном сравнении изменяющегося по определенному алгоритму компенсирующего напряжения  $U_k$  с измеряемым  $U_x$ . В соответствии с алгоритмом напряжение  $U_k$  целенаправленно стремится стать равным  $U_x$ , т.е. уравновесить его. В течение нескольких тактов напряжение  $U_k$  становится практически равным значению  $U_x$ . Этот метод преобразования обеспечивает средние метрологические характеристики и достаточно высокое быстродействие. Поэтому в основном именно он и применяется в цифровых средствах динамических измерений (цифровых измерительных регистраторах, цифровых осциллографах и анализаторах).

Типичные параметры таких АЦП:  $n = (10... 16)$  бит;  $F_d = (0,02...100)$  МГц.

Среди других методов, используемых в средствах динамических измерений, – *метод параллельного преобразования* (Flash ADC), который обеспечивает наиболее высокое быстродействие (правда, с малой разрядностью и невысокой точностью).

Входной сигнал с помощью множества одностипных компараторов сравнивается одновременно с рядом опорных напряжений, формируемых точным делителем напряжения. Затем с помощью дешифратора выявляется граница между двумя группами компараторов с одинаковыми состояниями («0» и «1») и результат сравнения преобразуется в привычный двоичный код. При числе компараторов  $m = 256$  образуется выходное слово с разрядностью  $n = 8$  бит. При числе компараторов  $m = 1024$  образуется выходное слово с разрядностью  $n = 10$  бит.

Типичные характеристики параллельных АЦП:  $n = (6...10)$  бит, скорость преобразования 20...1000 МГц.

В автономных цифровых вольтметрах и мультиметрах, предназначенных для статических измерений, а также в некоторых регистраторах/анализаторах, логгерах, особенно в тех, которые предназначены для работы с медленно меняющимися процессами, применяются АЦП *интегрирующего типа* (Integrating ADC). Интегрирующие методы преобразования обеспечивают самые высокие точность, чувствительность, разрешающую способность, а также высокое подавление периодических помех сетевой частоты (что особенно важно в экспериментах, выполняемых в промышленных условиях и при работе с сигналами малого уровня). Правда, эти АЦП сравнительно медленно действующие (длительность цикла преобразования, как правило, десятки миллисекунд – единицы секунд), но для автономных приборов и не требуется высокого быстродействия (так как оператор не в состоянии был бы воспринимать разные цифровые отсчеты, меняющиеся быстрее, чем 1 раз в секунду).

В настоящее время применяют две разновидности интегрирующего аналого-цифрового преобразования: *временнй импульсный* и *частотно-импульсный* методы.

При использовании *временнй импульсного метода* входное напряжение преобразуется в пропорциональный по длительности интервал времени, который затем заполняется импульсами стабильной известной частоты  $F_0$ . Сформированная таким образом серия импульсов подсчитывается счетчиком, содержимое которого по окончании счета и определяет значение измеряемого напряжения. Цикл преобразования состоит из двух основных тактов. Основной узел такого

АЦП – интегратор, который в течение первого такта  $T_x$  (длительность которого всегда постоянна) интегрирует входной сигнал, а если к сигналу примешана периодическая помеха, то интегрирует сумму сигнала и помехи. На этом такте емкость интегратора линейно заряжается. При равенстве (или кратности) интервала первого такта периоду помехи результат интегрирования не будет зависеть от помехи. Во втором такте  $T_2$  на вход интегратора поступает опорное (стабильное, образцовое) напряжение, полярность которого противоположна полярности измеряемого напряжения. При этом емкость интегратора линейно разряжается. Компаратор фиксирует момент полного разряда емкости. Таким образом, длительность второго такта пропорциональна значению входного постоянного напряжения. Затем значение длительности второго такта с помощью генератора тактовой частоты и счетчика импульсов преобразуется в пропорциональный цифровой код. Длительность интервала первого такта  $T_x$  задается разработчиком, равным или кратным периоду периодической помехи (в России номинальное значение частоты сети и, следовательно, частоты помехи 50 Гц, а ее период 20 мс).

Степень ослабления влияния помехи характеризуется коэффициентом подавления  $K_{\Pi}$ , который выражается в децибелах и определяется по формуле

$$K_{\Pi} = 20 \lg (U_{\Pi.м} / \Delta U_{\Pi}), \quad (3.2)$$

где  $U_{\Pi.м}$  – амплитудное значение периодической помехи на входе АЦП;  $\Delta U_{\Pi}$  – изменение результата преобразования, вызванное действием помехи.

*Частотно-импульсный метод* основан на предварительном преобразовании входного сигнала в пропорциональную частоту следования импульсов. Эти импульсы в течение стабильного интервала времени  $T_0$  поступают на счетчик, который и подсчитывает число импульсов в серии. Таким образом, содержимое счетчика отражает значение входного напряжения.

Типичные параметры интегрирующих АЦП:  $n = (12...20)$  бит; длительность одного цикла преобразования  $T_{\Pi} = (0,1... 10,0)^{\circ}$  с;  $K_{\Pi} = (40...60)$  дБ.

Существует объективная обратно пропорциональная зависимость между разрядностью (точностью/чувствительностью) преобразования и быстродействием (скоростью) АЦП.

Рисунок 3.3 упрощенно иллюстрирует эту связь для современного уровня развития техники аналого-цифрового преобразования.

Масштаб по оси абсцисс (частота дискретизации  $F_{д}$ ) логарифмический. При линейном масштабе по оси абсцисс эта зависимость носила бы гиперболический характер.



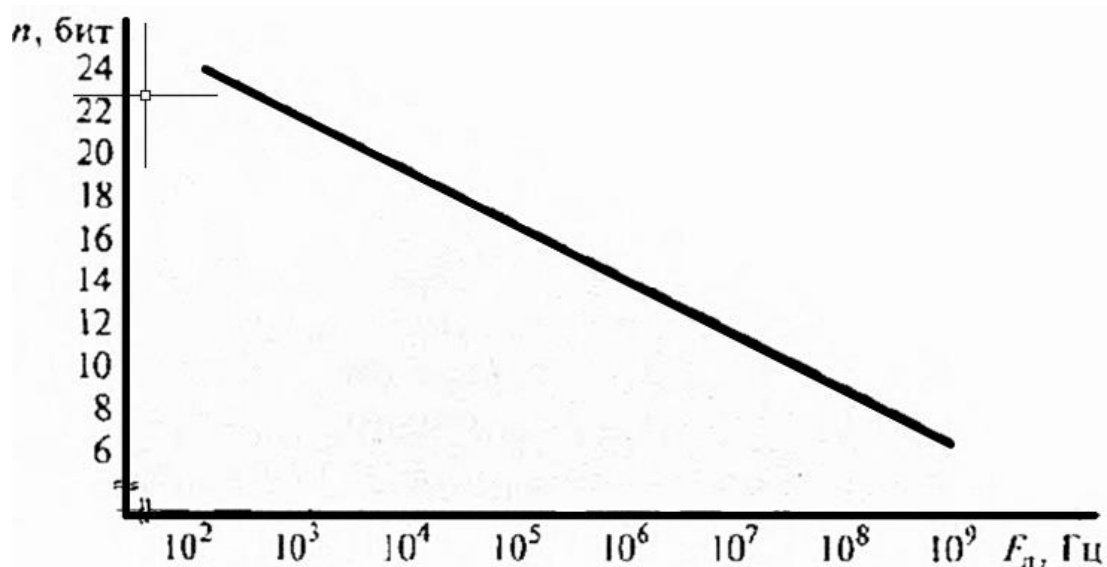


Рис. 3.3. Связь точности (разрядности АЦП) и быстродействия

### 3.5. ЦИФРОВЫЕ ЧАСТОТОМЕРЫ

*Цифровые частотомеры (ЦЧ)* – довольно распространенные измерительные приборы, используемые для оценки частотно-временных параметров электрических сигналов. Они работают в очень широком диапазоне значений измеряемых частот периодических сигналов (или их периода). Современные ЦЧ обеспечивают самые высокие метрологические характеристики (точность и разрешающую способность) среди всех прочих ЦИП, отличаются достаточно высоким быстродействием, широкими функциональными возможностями, простотой эксплуатации, высокой надежностью.

Помимо измерения частотно-временных параметров периодических сигналов, современные ЦЧ применяются и для измерения различных ФВ. Для этого необходимо подключать к ЦЧ вспомогательные первичные измерительные преобразователи (датчики), имеющие выходные сигналы, частота или период (длительность) которых пропорциональны измеряемой величине. (ЦЧ можно использовать для измерения скорости вращения вала двигателя.) С помощью ЦЧ легко можно организовать подсчет числа импульсов (числа событий).

Практически все ЦЧ обеспечивают два основных режима работы: измерения частоты и измерения периода (длительности интервала времени).

#### 3.5.1. Режим измерения частоты

Упрощенная структура ЦЧ, реализующая режим измерения частоты, показана на рис. 3.4, а, а временные диаграммы работы в этом режиме приведены на рис. 3.4, б.

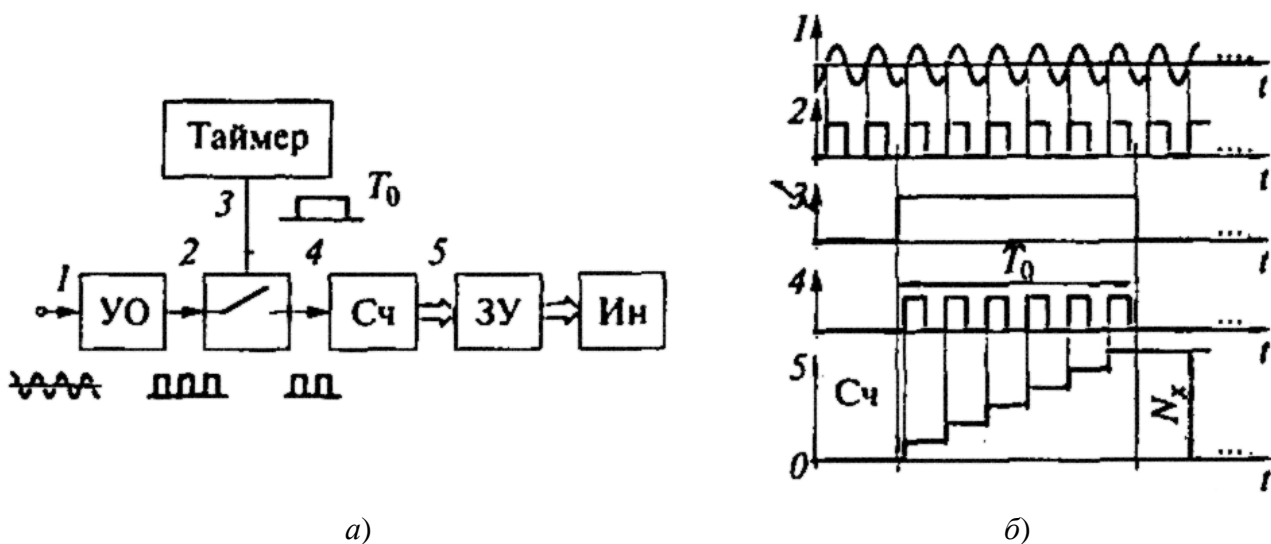


Рис. 3.4. Режим изменения частоты:

*a* – упрощенная структура ЦЧ; *б* – временные диаграммы работы

Исследуемый периодический сигнал  $I$  (соответственно диаграмма 1) подается на вход усилителя-ограничителя (УО), где преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов 2 (диаграмма 2) фиксированной амплитуды, частота которых равна частоте  $f_x$  входного сигнала. Далее этот сигнал поступает на вход электронного ключа, которым управляет таймер, периодически замыкающий его на постоянный стабильный интервал времени 3 (диаграмма 3), например  $T_0 = 1$  с. Сформированная таким образом серия импульсов 4 (диаграмма 4) поступает на вход счетчика Сч, содержимое которого 5 в начале интервала  $T_0$  равно нулю, а в конце интервала счета равно числу поступивших импульсов  $N_x$ . Это число прямо пропорционально измеряемой частоте  $f_x$  входного сигнала:

$$N_x = \text{Ent} [T_0/f_x] = \text{Ent} [T_0 f_x], \quad (3.3)$$

где  $\text{Ent} [\dots]$  – оператор определения целой части выражения  $[\dots]$ ;  $T_x$  – период входного сигнала ( $T_x = 1/f_x$ );  $f_x$  – частота входного сигнала.

Содержимое счетчика 5 запоминается в буферном запоминающем устройстве (ЗУ) и хранится там до окончания следующего цикла измерения и переписи нового результата. Одновременно результат поступает на цифровое отсчетное устройство (индикатор Ин). Если, например, в течение интервала  $T_0 = 1$  с на вход счетчика поступило 254 импульса, то, следовательно, частота входного сигнала  $f_x = 254$  Гц. Прибор работает циклически, т.е. в начале каждого нового цикла счетчик «обнуляется». Таким образом, результат измерения периодически обновляется. Отметим, что форма периодического сигнала значения не имеет.

Общая погрешность  $\Delta F$  результата измерения частоты  $f_x$  складывается из двух составляющих: погрешности дискретности  $\Delta F_1$  и погрешности  $\Delta F_2$ , вызванной неточностью (неидеальностью) задания интервала времени  $T_0$ .

Погрешность дискретности  $\Delta F_1$  неизбежно присутствует в любом аналого-цифровом преобразовании. Рассмотрим природу возникновения этой погрешности. Отношение  $T_0/T_x$  может быть любым, так как частота  $f_x$  входного сигнала может иметь бесконечное множество различных значений. Понятно, что в общем случае отношение  $T_0/T_x$  – дробное число. А поскольку число импульсов  $N_x$ , подсчитываемых счетчиком, может быть только целым, то в процессе такого автоматического округления естественно и неизбежно возникает погрешность (погрешность дискретности).

Погрешность  $\Delta F_2$  вызвана неточностью (неидеальностью) задания интервала  $T_0$  (рис. 3.5, а).

Если бы длительность интервала  $T_0$  имела строго номинальное значение, то число импульсов, поступивших в счетчик, было бы равно  $N_1$  (см. рис. 3.5, а). Если же интервал  $T_0$  будет, например, несколько больше номинального и составит  $T_0 + \Delta T_0$ , то при той же измеряемой частоте  $f_x$  в счетчик поступит больше импульсов  $N_2 > N_1$  (см. рис. 3.5, а).

Неточность  $\Delta T_0$  задания этого интервала приводит к появлению мультипликативной, т.е. линейно зависящей от значения измеряемой частоты  $f_x$ , составляющей

$$\Delta F_2 = \pm f_x \frac{\Delta T_0}{T_0}. \quad (3.4)$$

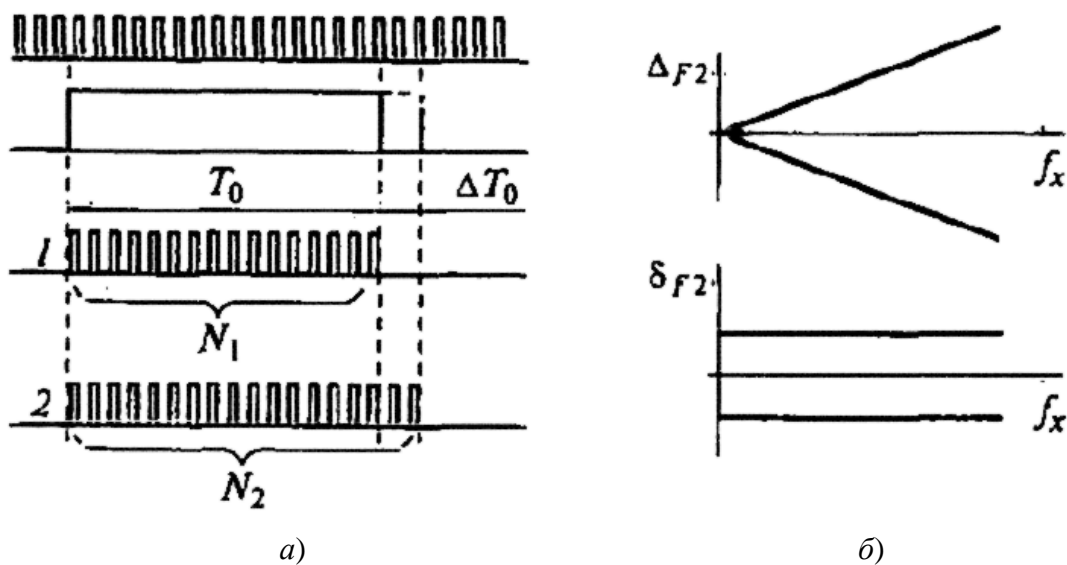


Рис. 3.5. Мультипликативная погрешность в режиме измерения частоты: а – возникновение; б – абсолютная и относительная погрешности

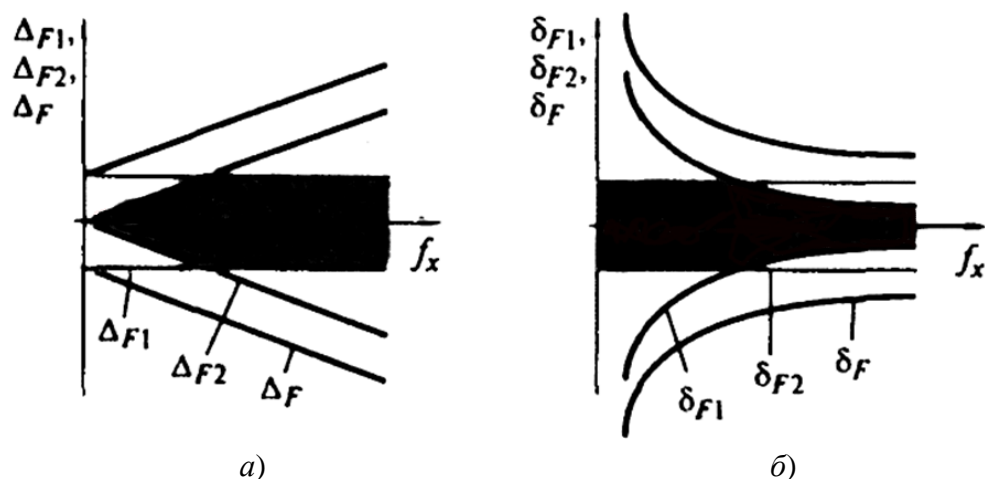


Рис. 3.6. Суммарные абсолютная (а) и относительная (б) погрешности

Суммарная абсолютная погрешность  $\Delta F$  результата измерения частоты  $f_x$  и суммарная относительная погрешность  $\delta F$ , %, равны соответственно:

$$\Delta F = \Delta_{F1} + \Delta_{F2} = \pm \left( \frac{1}{T_0 f_x} + \frac{\Delta T_0}{T_0} \right), \quad (3.5)$$

$$\delta F = \delta_{F1} + \gamma_{F2} = \pm \left( \frac{1}{T_0 f_x} + \frac{\Delta T_0}{T_0} \right) 100. \quad (3.6)$$

Графическая иллюстрация поведения составляющих и суммарных абсолютной и относительной погрешностей результата измерения частоты  $f_x$  приведена на рис. 3.6, а и б соответственно.

Видно, что чем меньше значение измеряемой частоты  $f_x$  в этом режиме, тем (при постоянном интервале  $T_0$ ) хуже, так как тем больше относительная погрешность  $\delta F$ . Для уменьшения этой погрешности необходимо увеличивать интервал  $T_0$ , но нецелесообразно его делать слишком большим. Так, например, длительность интервала  $T_0 = 10$  с уже неудобна для работы, так как значительное время ожидания появления каждого нового результата (10 с) может вызвать у оператора раздражение. Для измерения сравнительно низких частот удобнее использовать второй режим ЦЧ – режим измерения периода исследуемого входного сигнала  $T_x = 1/f_x$ .

### 3.6. ЦИФРОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ И МУЛЬТИМЕТРЫ

Упрощенная структура цифрового вольтметра (ЦВ) показана на рис. 3.7. На вход прибора подается измеряемое напряжение  $U$  (постоянное или переменное, в частности, периодическое).

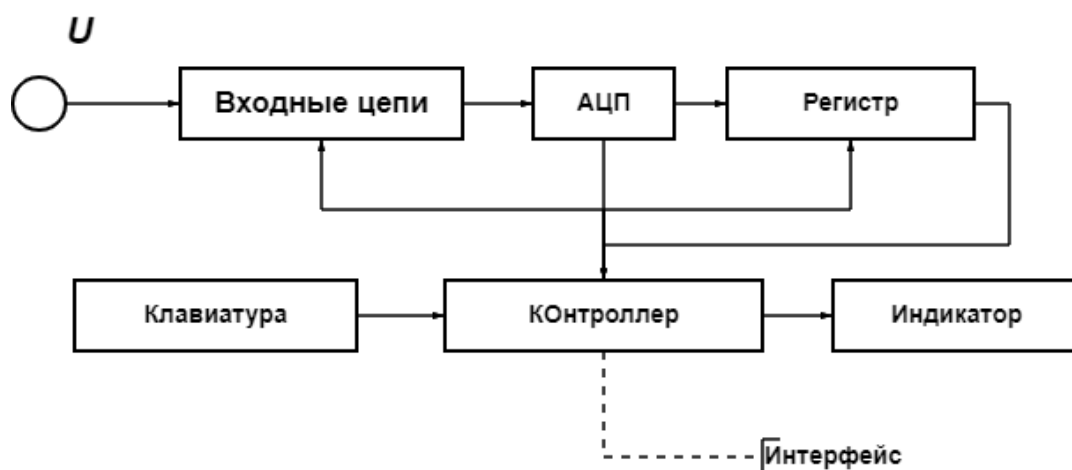


Рис. 3.7. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра

*Входные цепи* ЦВ предназначены для преобразования входного напряжения в унифицированный сигнал, обычно – в небольшое напряжение постоянного тока, пропорциональное значению информативного параметра, измеряемой величины (например, действующему значению периодического напряжения). В общем случае во входных цепях ЦВ выполняются функции усиления, ослабления, выпрямления, фильтрации, коммутации сигнала, защиты от перегрузки. Основным узел прибора – *аналого-цифровой преобразователь (АЦП)*, который автоматически реализует переход от аналоговой формы входной величины к цифровой форме выходной величины (т.е. к пропорциональному коду). В ЦВ для статических измерений применяются, как правило, *интегрирующие АЦП*. Результат этого преобразования временно хранится в запоминающем *регистре*. *Контроллер* управляет работой всех узлов прибора. Взаимодействие человека (оператора) с прибором осуществляется с помощью *клавиатуры* и *индикатора*. Клавиатура позволяет задавать режимы работы ЦВ. Цифровой индикатор показывает результаты измерения. В структуре прибора может быть предусмотрен *интерфейс*, позволяющий прибору общаться с внешними устройствами, в частности с компьютером.

Структура микропроцессорного ЦВ сложнее, но и возможности его богаче. В отличие от предыдущей структуры, контроллер здесь более сложный. Он содержит *микропроцессор (МП)*, являющийся основным элементом управления; *постоянное запоминающее устройство (ПЗУ)*, в котором хранятся программы работы прибора, и *оперативное запоминающее устройство (ОЗУ)*, в котором хранятся данные. Такой контроллер является своеобразным искусственным интеллектом, обеспечивающим разнообразные функциональные возможности по преобразованию, хранению, передаче и представлению информации.

Микропроцессорный прибор в состоянии, например, запомнив несколько сотен результатов (кодов) отдельных измерений входного напряжения, вычислить среднее, среднее квадратическое значения, найти максимальное и минимальное значения за время продолжительного эксперимента, найти необходимые производные величины. В ЦВ, имеющем несколько диапазонов измерений, МП может управлять автоматическим выбором диапазонов измерения. Как правило, микропроцессорные приборы имеют узел стандартного интерфейсного обмена информацией с другими устройствами, что позволяет включать их в состав различных измерительных и управляющих систем.

### 3.7. СТРУКТУРА ЦИФРОВОГО МУЛЬТИМЕТРА

*Цифровые мультиметры (ЦМ) – Digital Multi Meter (DMM) – это многофункциональные измерительные приборы, специально предназначенные в основном для статических измерений нескольких электрических (например, переменных и постоянных напряжений и токов, сопротивления, частоты) и неэлектрических величин.*

Автономный миниатюрный ЦМ – самый распространенный инструмент, широко применяемый в различных измерительных экспериментах в электрических цепях и установках низкого (до 1000 В) напряжения.

Структура ЦМ подобна структуре любого ЦИП. Отличие лишь в наличии на входе прибора нескольких специальных преобразователей конкретных входных физических величин. На рисунке 3.8 показана упрощенная структура ЦМ с минимальным набором измеряемых величин: постоянных (DC – Direct Current) и переменных (AC – Alternating Current) напряжений и токов, а также сопротивления  $R$ .

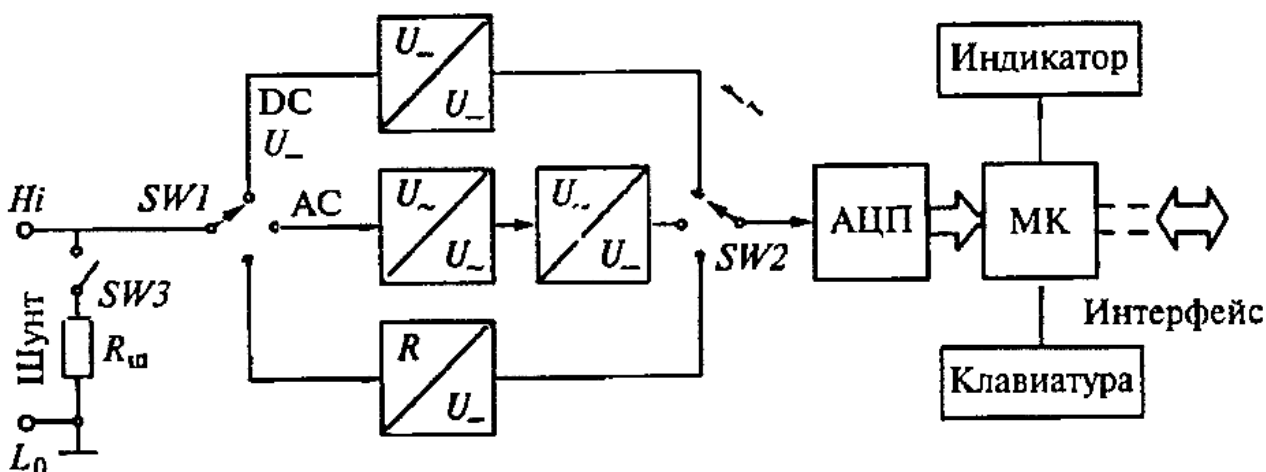


Рис. 3.8. Упрощенная структура ЦМ

Входные измеряемые величины в любом случае сначала преобразуются в пропорциональное напряжение постоянного тока, которое поступает на вход АЦП, где и преобразуется в код.

Структура содержит уже знакомые нам узлы: АЦП (как правило, интегрирующего типа), микроконтроллер (МК), клавиатуру и индикатор. Во входных цепях стоят следующие аналоговые преобразователи:

- $U_{-}/U_{-}$  – постоянного напряжения в постоянное (усилитель и делитель);
- $U_{\sim}/U_{\sim}$  – переменного напряжения в переменное (усилитель, трансформатор, частотонезависимый делитель);
- $U_{\sim}/U_{-}$  – переменного напряжения в постоянное (выпрямитель);
- $R/U_{-}$  – сопротивления в постоянное напряжение.

Конкретный режим измерения определяется положениями переключателей:  $SW1$ ,  $SW2$  и  $SW3$ . При измерении напряжений переключатель  $SW3$  разомкнут, а переключатели  $SW1$  и  $SW2$  устанавливаются в верхнее (при постоянном входном напряжении) или в среднее (при переменном входном напряжении) положение. Для измерения сопротивления включается преобразователь сопротивления в постоянное напряжение  $R/U_{-}$  (переключатели  $SW1$  и  $SW2$  установлены в нижнем положении, а переключатель  $SW3$  разомкнут).

В режиме измерения тока используется внутренний шунт (точный резистор малого сопротивления  $R_{ш}$ ). При этом переключатель  $SW3$  замкнут и измеряемый ток, протекая по резистору  $R_{ш}$ , создает пропорциональное току падение напряжения. Если входной ток постоянный, то переключатели  $SW1$  и  $SW2$  устанавливаются в верхнее положение. Если же входной ток переменный, то переключатели  $SW1$  и  $SW2$  устанавливаются в среднее положение.

Структура ЦМ может содержать узел интерфейсной связи с внешними устройствами.

Как и многие другие ЦИП, современные ЦМ можно разделить на две группы (количественно и качественно сильно различающиеся):

- автономные – сравнительно простые, дешевые, малогабаритные и массовые приборы для экспресс-измерений;
- системные – сложные, прецизионные, или быстродействующие, дорогостоящие приборы, предназначенные для работы в составе различных измерительно-вычислительных систем и(или) систем управления.

Типичный набор измеряемых мультиметрами широкого применения величин включает постоянные и переменные напряжения, постоянные и переменные токи, сопротивление постоянному току. Диапазоны основных измеряемых величин таковы:

- напряжения (постоянного и переменного тока) – от долей милливольт до киловольта;
- токи (без внешних шунтов или трансформаторов токов) – от десятков миллиампер до десяти ампер;
- сопротивления – от долей ома до десятков мегаом.

Классы точности разных моделей ЦМ (как и других ЦИП) в общем случае могут быть заданы по-разному. Как правило, используются предельные значения основных абсолютных и относительных погрешностей. Классы точности обычных ЦМ лежат в диапазоне от 0,1 до 5,0% (в зависимости от возможностей, измеряемых параметров, диапазонов, стоимости прибора). Разрешающая способность  $R$ : от 1:200 до 1:20 000. Масса приборов: 100 г...1 кг.



## 4. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

---

### 4.1. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Единство магнитных измерений в РФ обеспечивается государственными первичными эталонами магнитной индукции, магнитного потока и магнитного момента, государственными специальными эталонами магнитной индукции и напряженности магнитного поля. В основу построения эталонов положена связь между магнитными, электрическими, механическими величинами и величинами пространства и времени, которая описывается фундаментальными уравнениями физики.

Эталоны единиц магнитных величин хорошо согласованы между собой, а также с эталонами единиц международной системы и эталонами других ФВ.

Для передачи размера основных единиц магнитных величин от эталонов рабочим СИ разработаны и стандартизованы поверочные схемы, включающие, помимо эталонов и образцовых средств измерений первого, второго и третьего разрядов, также некоторые образцовые средства измерений, заимствованные из других схем.

Государственный первичный эталон магнитной индукции состоит из эталонной катушки на кварцевом каркасе, ток в обмотке которой поддерживается с помощью стабилизатора. Измерение тока производится с помощью специальной установки. В состав эталона входят также ядерно-прецессионный тесламетр для контроля стабильности эталона и передачи размера теслы и устройство для автоматической компенсации магнитного поля Земли и его вариаций.

Передача размера теслы от государственного первичного эталона магнитной индукции образцовым и рабочим средствам измерения осуществляется в соответствии с общесоюзной поверочной схемой от  $5 \cdot 10^{-12}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл в диапазоне частот от 0 до 0,1 Гц.

Государственный первичный эталон единицы магнитного потока представляет собой катушку взаимной индуктивности. Катушка состоит из коаксиально расположенных и жестко скрепленных между собой первичной однослойной и вторичной многослойной обмоток; первичная обмотка выполнена из двух одинаковых частей, соединенных последовательно; вторичная обмотка, большего диаметра, находится в плоскости симметрии первичной обмотки, соосно с ней. Обмотки размещены на кварцевых каркасах с малым температурным коэффициентом линейного расширения. Постоянная катушка по потоку

рассчитана с точностью до тысячных долей процента (постоянная катушечной меры – это коэффициент пропорциональности между величиной, воспроизводимой мерой и током в катушке).

Государственный первичный эталон единицы магнитного момента содержит четыре расчетные меры магнитного момента в виде катушек. Катушки намотаны на каркасы из кварцевых труб. Постоянные меры равны суммарным площадям витков. Кроме того, в состав эталона входят стабилизатор тока и компаратор, предназначенный для сличения эталонных мер между собой и с мерами магнитного момента первого разряда.

В поверочную схему, кроме средств измерений магнитного момента, включены также средства измерений магнитной восприимчивости и намагниченности.

Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции для диапазона 0,1...1,2 Тл предназначен для воспроизведения и передачи размера единицы магнитной индукции в области средних магнитных полей.

Воспроизведение и хранение единицы магнитной индукции основано на связи между значением магнитной индукции постоянного поля и частотой прецессии протонов в воде, помещенной в измеряемое поле. Для эталона принято значение коэффициента связи между магнитной индукцией и частотой ядерного магнитного резонанса, известное с точностью до десятитысячных долей процента и равное  $2,348739 \cdot 10^{-8}$  Тл/Гц.

Поверочная схема обеспечивает передачу размера единицы магнитной индукции образцовым и рабочим средствам измерения в диапазоне 0,05... 2,00 Тл.

Государственный специальный эталон магнитной индукции для диапазона 2...6 Тл воспроизводит единицу магнитной индукции в области сильных магнитных полей. Эталон включает в себя тесламетр, источник магнитного поля, выполненный в виде сверхпроводящей катушки, и установку, состоящую из стабилизатора тока и устройства для измерения тока в катушке.

Измерение магнитной индукции в рабочем пространстве катушки основано на связи индукции поля с частотой протонного магнитного резонанса в проточной дистиллированной воде. Для индикации резонанса используется метод нутации.

Эталон обеспечивает метрологическое обслуживание средств измерений в диапазоне 2...10 Тл совместно с поверочной схемой.

Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции от  $1 \cdot 10^{-8}$  до  $2,5 \cdot 10^{-4}$  Тл в диапазоне частот от 1 до 10 000 Гц включает в себя устройства для стабилизации и измерений силы переменного тока. Кроме того,

в состав эталона входят компенсационные установки с компараторами для передачи размера единицы магнитной индукции мерам магнитной индукции и измерительным катушкам.

Государственный специальный эталон единицы напряженности магнитного поля в диапазоне частот 0,01...30 МГц обеспечивает единство измерений напряженности магнитного поля в широком диапазоне частот, включая радиочастотный и СВЧ-диапазоны. Эталон представляет собой сложный радиотехнический измерительный комплекс. Воспроизведение единицы напряженности основано на измерении геометрических размеров и тока.

Передача размера единицы напряженности магнитного поля от эталона образцовым и рабочим средствам измерения производится в соответствии с общесоюзной поверочной схемой в диапазоне частот от 0,01 до 300 МГц.

Основные сведения о воспроизводимых государственными эталонами значениях магнитных величин и их точности даны в табл. 4.1.

Значительное место среди образцовых и рабочих средств измерения занимают меры магнитных величин.

Меры магнитных величин предназначены для воспроизведения соответствующей величины с погрешностью, определяемой классом точности. Значение величины, воспроизводимой мерой, устанавливается сличением с государственным эталоном этой величины. Сличение осуществляется с помощью промежуточной меры более высокого разряда. Класс точности присваивается мере в зависимости от погрешности аттестации стабильности параметров меры.

В качестве мер магнитной индукции, магнитного потока и магнитного момента применяют катушки различной конструкции, а также постоянные магниты. Основным параметром катушечной меры – постоянной меры.

В настоящее время известен ряд магнитоизмерительных преобразователей, действие которых основано на явлении электромагнитной индукции, модуляции магнитного состояния, гальваномагнитных эффектах, взаимодействии микрочастиц с магнитным полем и т.д. Электрические величины на выходе преобразователей измеряются методами прямых измерений или сравнения с мерой.

Магнитоизмерительные приборы могут иметь градуировку шкалы в значениях либо измеряемых магнитных величин, либо пропорциональных выходным электрическим величинам преобразователей. В последнем случае значение измеряемой магнитной величины определяют расчетным путем на основании известной зависимости между входной и выходной величинами.

Таблица 4.1

Эталон	Номинальное значение или диапазон значений	Среднеквадратическое отклонение значения величины, воспроизводимой эталоном, %, не более	Неисключенная систематическая погрешность, %, не более	Номер ГОСТ эталона и общесоюзной поверочной схемы
Государственный первичный эталон единицы магнитной индукции	$5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ Тл	0,001	0,00025	8.095–81
Государственный первичный эталон единицы магнитного потока	0,0100176 Вб при токе 1 А	0,001	0,0007	8.030–75
Государственный первичный эталон единицы магнитного момента	$1 \cdot 10^{-2} \dots 1,5 \cdot \text{А} \cdot \text{м}^2$	0,02	0,03...0,05	8.123–74
Государственный первичный эталон единицы магнитной индукции	0,1...1,2 Тл	0,0003	0,001	8.144–75
Государственный первичный эталон единицы магнитной индукции	2...6 Тл	0,003	0,001	8.188–76
Государственный первичный эталон единицы магнитной индукции переменного поля	$1 \cdot 10^{-6} \dots 2,5 \times 10^{-4}$ Тл в диапазоне частот 1...10 000 Гц	0,01...0,05	0,03	8.093–80
Государственный первичный эталон единицы напряженности магнитного поля в диапазоне от 0,01 до 30 МГц	$2 \cdot 10^{-3} \dots 0,5 \times 10^{-5}$ А/м	0,4	1,0	8.097–73

#### 4.1.1. Магнитные материалы и их основные характеристики

К магнитным материалам относятся кристаллические вещества, состоящие из областей, называемых доменами, результирующие магнитные моменты которых в отсутствие внешнего магнитного поля отличны от нуля.

Различают две группы магнитных материалов – ферромагнетики и ферримагнетики (ферриты). В первую группу входят чистое железо, а также его соединения и сплавы с кремнием, никелем, хромом, кобальтом, молибденом, ванадием, алюминием и другими элементами; во вторую – материалы на основе оксидов железа, цинка, никеля, лития и других металлов.

Ферромагнетики применяются в качестве магнитопроводов в диапазоне низких частот. Из порошков ферромагнетика с помощью материала-связки (лаки, смолы, жидкое стекло и т.п.) получают магнитодиэлектрики. Магнитодиэлектрики могут работать в диапазоне частот до сотен килогерц.

Рабочий диапазон частот ферромагнетиков весьма широк и простирается до сотен мегагерц. Они находят применение в разнообразных высокочастотных и импульсных устройствах.

## 4.2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статические характеристики магнитных материалов – это характеристики, полученные в постоянных или медленно изменяющихся полях.

При отсутствии внешнего поля результирующий магнитный момент материала вследствие беспорядочной ориентации магнитных моментов отдельных доменов равен нулю. Во внешнем поле магнитные моменты доменов располагаются в направлении поля. После прекращения действия поля магнитное состояние материала отличается от первоначального. Для исключения этого фактора, который оказывает влияние на определение характеристик, магнитные материалы перед испытанием размагничивают.

Наиболее полным является термическое размагничивание, состоящее в нагреве материала выше точки Кюри (температура, при которой магнитный материал становится парамагнетиком) с последующим охлаждением в отсутствие магнитного поля. Другой способ размагничивания заключается в плавном уменьшении знакопеременного поля, создающего в материале предельно возможную намагниченность, до 0.

К основным характеристикам магнитного материала относятся начальная кривая намагничивания, основная кривая намагничивания и предельная петля магнитного гистерезиса.

Указанные характеристики могут быть представлены в двух видах: по индукции или намагниченности.

Начальную кривую намагничивания, т.е. зависимость  $B = f(H)$  или  $J = f(H)$  (рис. 4.1), определяют при медленном изменении напряженности от нуля до максимального значения в термически размагниченном материале. Если затем плавно изменять напряженность поля от  $H_{\max}$  до  $-H_{\max}$  и снова до  $H_{\max}$ , можно получить симметричную петлю магнитного гистерезиса; на рис. 4.2 показана симметричная петля гистерезиса по индукции. Для того

чтобы стабилизировать магнитное состояние материала, необходимо 8 – 10 раз изменить напряженность поля от  $H_{\max}$  до  $-H_{\max}$  и обратно. Петлю гистерезиса, полученную после стабилизации магнитного состояния, называют установившейся. При этом значение  $B_{\max}$ , соответствующее данному  $H_{\max}$ , будет наибольшим.

Симметричную петлю гистерезиса называют предельной, если при ее нахождении напряженность поля изменяют до значения  $H_{\max}$ , при котором намагниченность достигает насыщения. Другими словами, дальнейшее увеличение напряженности  $H_{\max}$  уже не влияет на параметры петли. Из предельной петли (рис. 4.2) можно определить остаточную индукцию  $B_r$  и коэрцитивную силу по индукции  $H_{cb}$ . Аналогично находят остаточную намагниченность  $J_r$  и коэрцитивную силу по намагниченности  $H_{cj}$ .

В зависимости от значения коэрцитивной силы магнитные материалы делятся на магнитомягкие с  $H_{cb} < 4$  кА/м и магнитотвердые с  $H_{cb} \geq 4$  кА/м. Важной характеристикой магнитотвердых материалов является максимальная удельная магнитная энергия материала, равная  $(BH/2)_{\max}$ . Максимальную магнитную энергию можно вычислить, располагая кривой размагничивания. Кривая размагничивания – это участок предельной петли гистерезиса во втором квадранте.

Под воздействием влияющих величин состояние предварительно намагниченных материалов изменяется по частным гистерезисным петлям, называемым кривыми возврата.

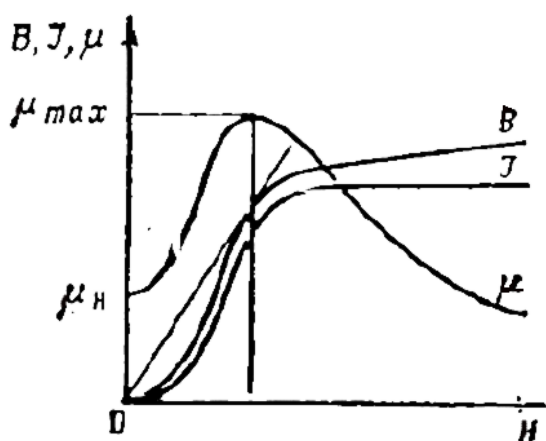


Рис. 4.1. Начальная кривая намагничивания и зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

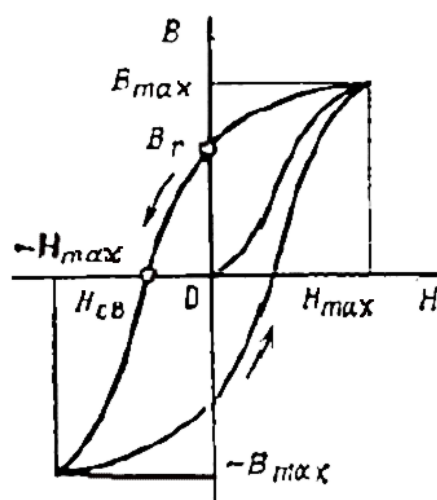


Рис. 4.2. Симметрическая петля гистерезиса

Кривую  $B = f(H)$ , или  $J = f(H)$ , называют основной кривой намагничивания.

По начальной или основной кривой намагничивания можно найти начальную магнитную проницаемость

$$\mu_H = \lim_{H \rightarrow 0} (B / \mu_0 H), \quad (4.1)$$

а также максимальную магнитную проницаемость  $\mu_{\max}$  (см. рис. 4.1).

Иногда важно также знать дифференциальную магнитную проницаемость, т.е. проницаемость в данной точке кривой намагничивания или петли гистерезиса по индукции:

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{dB / dH}{0}. \quad (4.2)$$

Разновидностью магнитных материалов являются материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, которые находят широкое применение в вычислительной технике. Они характеризуются остаточным магнитным потоком, коэффициентом прямоугольности петли  $K_H = B_r / B_{\max}$ , временем перемагничивания и другими параметрами.

При определении характеристик магнитных материалов используют образцы этих материалов в виде замкнутых или разомкнутых магнитных цепей.

### 4.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Динамическими называют характеристики магнитных материалов, полученные в переменных полях.

Если динамическая петля гистерезиса может быть заменена эквивалентным эллипсом, пользуются понятием комплексной магнитной проницаемости, которая определяется следующим образом:

$$\mu_T = B / (\mu_0 H) = \mu_m e^{-j\delta} = \mu_1 - j\mu_2, \quad (4.3)$$

где  $B$  и  $H$  – соответственно комплексы эквивалентных синусоидальных индукции и напряженности;  $\delta$  – угол сдвига фаз между мгновенными значениями  $H_t$  и  $B_t$  (угол магнитных потерь);  $\mu_m = |\mu_T| = B_m / \mu_0 H_m$  – амплитудная магнитная проницаемость; при этом  $\text{tg}\delta = \mu_2 - \mu_1$ , называемый тангенсом угла магнитных потерь, является важной характеристикой материалов, работающих на повышенных и высоких частотах.

Иногда пользуются также понятием максимальной амплитудной магнитной проницаемости  $(\mu_m)_{\max} = [\mu_m(H_m)]_{\max}$  или  $(\mu_m)_{\max} = [\mu_m(B_m)]_{\max}$ .

### 4.3.1. Аппаратура и образцы для испытаний.

#### Испытания образцов, выполненных в виде замкнутой магнитной цепи

Часто при определении характеристик магнитных материалов применяют образцы, имеющие кольцевую форму.

Если намагничивающая обмотка нанесена равномерно по периметру образца, то напряженность поля внутри образца на основании закона полного тока может быть рассчитана по формуле

$$H = (\omega_1 I) / (2\pi R_{\text{cp}}), \quad (4.4)$$

где  $\omega_1$  – число витков намагничивающей обмотки;  $I$  – ток в намагничивающей обмотке;  $R_{\text{cp}}$  – средний радиус, определяемый как среднеарифметическое внешнего и внутреннего радиусов кольца  $(R_{\text{вн}} + R_{\text{вт}})/2$ .

Чем больше относительная разность между внешним и внутренним радиусами, тем больше радиальная неоднородность поля в образце, поскольку плотность намотки внутри кольца больше. Так, при отличии внутреннего радиуса от внешнего на 10 и 20% напряженности поля вблизи внешней и внутренней поверхности кольца отличаются соответственно на 5 и 10%.

Чтобы более точно определить радиус окружности, вдоль которой напряженность поля равна среднеарифметическому максимальной и минимальной напряженностей, следует вместо среднеарифметического радиуса использовать среднегармонический:

$$R_{\text{срг}} = \frac{R_{\text{вн}} - R_{\text{вт}}}{\ln(R_{\text{вн}} / R_{\text{вт}})}. \quad (4.5)$$

Обычно на практике применяют кольца с отношением  $R_{\text{вн}}/R_{\text{вт}} = 1,2$ .

В случае, когда необходимо обеспечить малое значение напряженности намагничивающего поля, например при испытаниях магнитных материалов с большой магнитной проницаемостью (пермаллоев), применяют намагничивание кольцевых образцов с помощью одиночного провода с током, располагаемого вдоль осевой линии образца.

Применение кольцевых образцов при испытаниях магнитных материалов ограничивается трудностями, связанными с их изготовлением и нанесением обмотки. Поэтому на практике применяют технические средства, позволяющие



определять магнитные характеристики образцов, которые сами по себе не являются замкнутой цепью.

Испытания образцов, из которых составлена замкнутая магнитная цепь, для испытаний образцов из листового материала применяют замкнутые магнитные цепи, имеющие форму квадрата. Сторонами квадрата являются пакеты, содержащие равное количество полос из исследуемого материала одинакового размера; при этом для исключения влияния анизотропии материала одна половина полос в каждом пакете нарезана вдоль проката, другая – поперек. Намагничивание такой цепи осуществляется с помощью четырех катушек. Поскольку катушки не могут охватить всю магнитную цепь, намагничивание по периметру получается неоднородным и возникают потоки рассеяния. Кроме того, в местах соединения пакетов образуются воздушные зазоры. В связи с этим расчет напряженности поля в образце на основании закона полного тока является приближенным. Для более точного определения напряженности ее следует измерять на ограниченном участке магнитной цепи, где поле можно считать однородным.

Испытания образцов, являющихся частью замкнутой магнитной цепи, при необходимости испытаний образцов в виде параллелепипедов, цилиндров и полос применяют аппараты, называемые пермеаметрами. С их помощью можно проводить исследования образцов магнитных материалов при напряженностях поля более 25 кА/м, что недостижимо при использовании кольцевых образцов.

Существует много разновидностей конструкций пермеаметров. Рассмотрим одну из них.

Показанный на рис. 4.3 пермеаметр состоит из двух П-образных магнитопроводов 1 из магнитомягкого материала, называемых ярмом, между которыми зажимается образец 2. Образец находится внутри намагничивающей катушки  $\omega_1$  с переменной плотностью намотки для повышения однородности поля. Измерительная катушка индукции  $\omega_3$  размещена на каркасе под намагничивающей. Для компенсации влияния магнитного потока в воздушном зазоре между образцом и измерительной катушкой имеется дополнительная обмотка (на рис. 4.3 не показана). Измерительная катушка напряженности  $\omega_2$ , подобная потенцилометрической, прилегает к поверхности образца.

Пермеаметры мало пригодны для испытаний материалов с высокой магнитной проницаемостью, а также для испытаний в переменных магнитных полях из-за значительных искажений, вносимых ярмом.

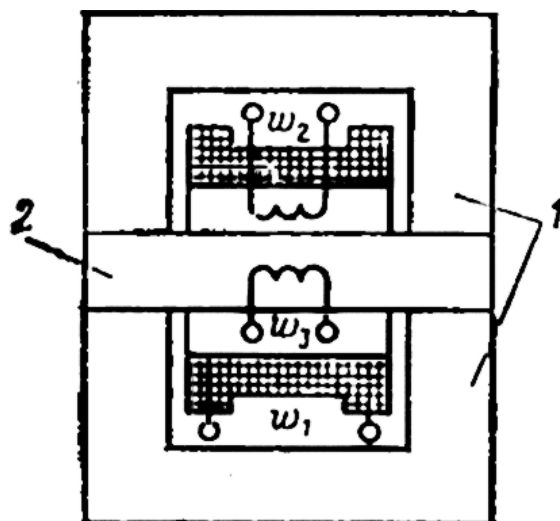


Рис. 4.3. Устройство пермеаметра

#### 4.4. ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ В РАЗОМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Под разомкнутой магнитной цепью условно понимают цепь, состоящую только из образца, причем поток, создаваемый в образце намагничивающим устройством, замыкается по воздуху.

Испытания в разомкнутой магнитной цепи, с одной стороны, являются наиболее простыми и удобными, а с другой – наименее точными вследствие неоднородности поля в образце и погрешности определения напряженности. Это обусловлено тем, что образец, помещенный в однородное магнитное поле, если только он не является эллипсоидом вращения, одна из осей которого совпадает с направлением поля, намагничивается неоднородно. Кроме того, напряженность поля внутри образца будет меньше напряженности, определяемой внешним источником поля. Причина уменьшения напряженности заключается в поляризации образца и создании им собственного поля, направленного в сторону, противоположную по отношению к направлению внешнего поля:

$$H_{\text{вт}} = H_{\text{вн}} - JN, \quad (4.6)$$

где  $H_{\text{вн}}$  – напряженность внешнего поля;  $H_{\text{вт}}$  – напряженность внутри образца;  $N$  – коэффициент размагничивания, зависящий от формы и относительных размеров образца.

Коэффициент размагничивания выражается аналитически и может быть точно вычислен только для образца, имеющего форму эллипсоида вращения.

При испытаниях магнитных материалов с низкой магнитной проницаемостью вторым слагаемым в выражении (4.6) можно пренебречь в связи с малой намагниченностью образца. В остальных случаях коэффициент размагничивания находят экспериментально или рассчитывают приближенно.

Наиболее часто образцы из испытуемого материала с разомкнутой магнитной цепью применяют при определении коэрцитивной силы и магнитного момента.

## 4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 4.5.1. Получение точек основной кривой намагничивания

Для статических испытаний магнитных материалов широко используется индукционно-импульсный метод. На рисунке 4.7 показана принципиальная схема установки, реализующей этот метод. Намагничивание образца производится в пермеамetre. Измерение напряженности магнитного поля и магнитной индукции в образце основано на интегрировании с помощью баллистического гальванометра *БГ* импульсов тока, наводимых в цепи, состоящей из измерительных катушек  $\omega_1$  или  $\omega_3$ , добавочных резисторов  $R_{д1}$  или  $R_{д2}$  и гальванометра, при коммутации намагничивающего тока в катушке  $\omega_1$ .

Постоянные измерительных катушек и, что более существенно, импульсы тока в цепях измерения напряженности и индукции могут значительно отличаться друг от друга. Это обстоятельство требует применения различных значений сопротивлений добавочных резисторов  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ . Следовательно, разными будут и постоянные гальванометра по потокосцеплению  $C_{фн}$  и  $C_{фв}$ .

Перед испытаниями образец размагничивают, для чего переключатель *SA3* ставят в положение *1* и при замкнутом ключе *SA2* плавно уменьшают реостатом  $R_1$  намагничивающий ток от максимального значения до нуля, непрерывно изменяя переключателем *SA1* его направление.

В течение всего эксперимента по определению основной кривой намагничивания ключ *SA2* должен быть замкнут, а переключатель *SA3* должен находиться в положении *1*.

Для получения координат точки  $A_1$  (рис. 4.5, *a*) устанавливают некоторое значение намагничивающего тока  $I_1$  с помощью реостата  $R_1$  и амперметра *РА1*. Затем стабилизируют магнитное состояние образца. С этой целью намагничивающий ток коммутируют 8 – 10 раз; перед коммутацией тока гальванометр *БГ* отключают, ставя переключатель *SA4* в нейтральное положение.

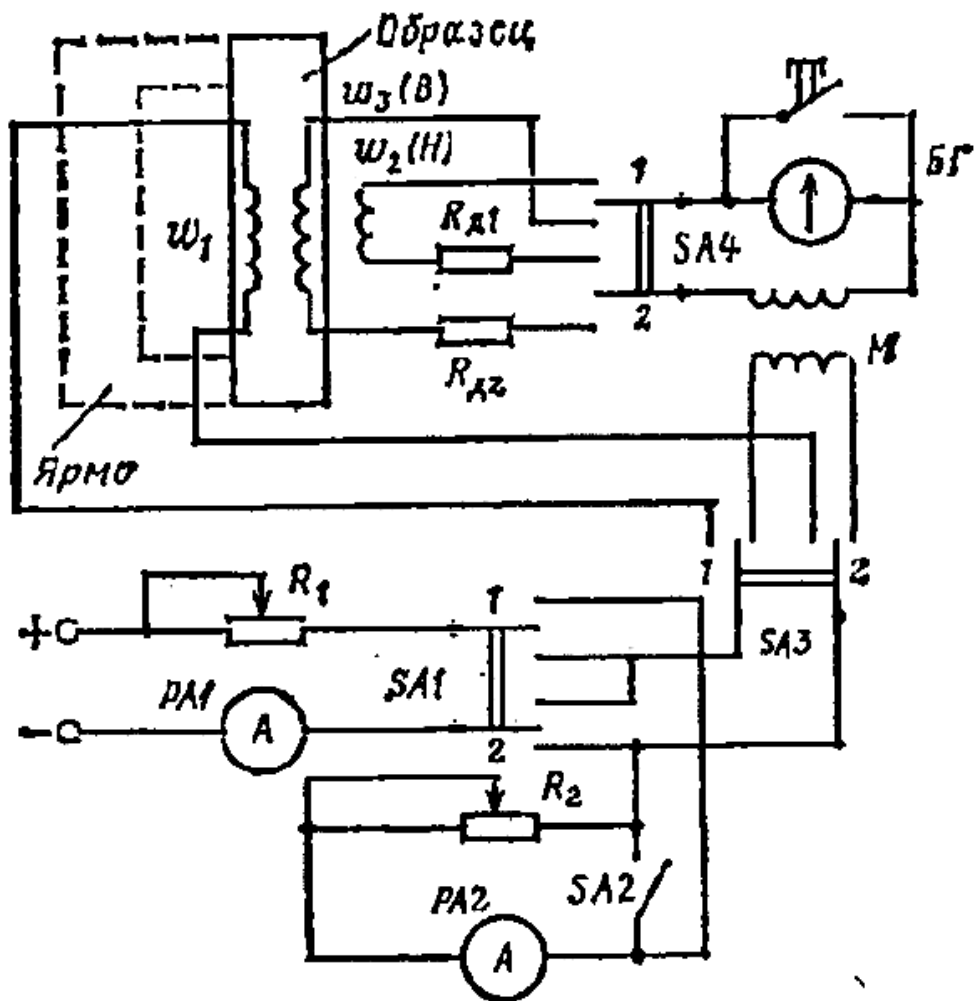


Рис. 4.4. Принципиальная схема баллистической установки

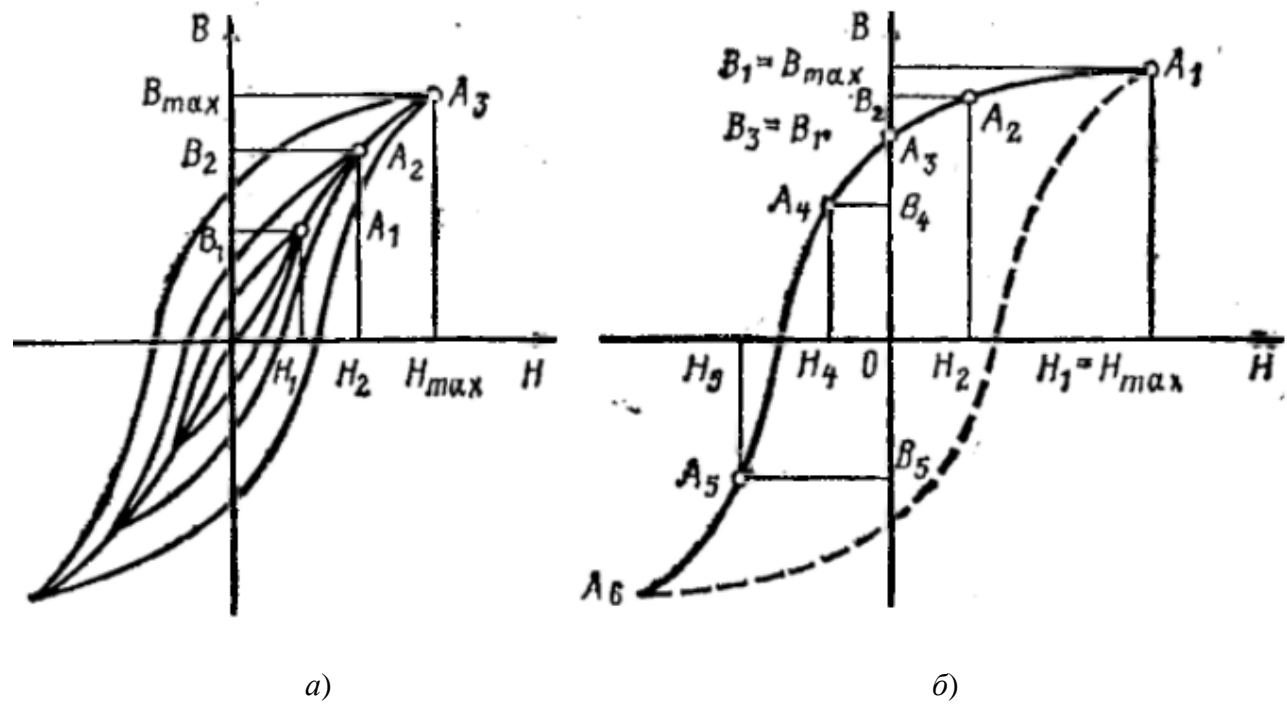


Рис. 4.5. Определение статистических характеристик магнитных материалов:  
 а – основной кривой намагничивания; б – симметричной петли гистерезиса

Чтобы измерить напряженность  $H_1$ , переключатель SA4 переводят в положение 1, быстро изменяют направление тока в катушке  $\omega_1$  и замечают максимальное отклонение указателя гальванометра  $a_{1mH}$ . Так как катушка  $\omega_2$  прилегает к поверхности образца, не охватывая его, изменение связанного с ней потока, вызванное коммутацией намагничивающего тока, равно  $2\mu_0\omega_2s_2H_1$ , где  $\omega_2s_2$  – постоянная измерительной катушки напряженности. Следовательно, напряженность поля в образце

$$H_1 = \left[ C_{\text{фн}} / (2\mu_0\omega_2s_2) \right] a_{1mH}. \quad (4.7)$$

Таким же образом измеряют индукцию  $B_1$ , но при этом переключатель SA4 должен находиться в положении 2. Индукцию определяют по максимальному отбросу указателя гальванометра  $a_{1mB}$ , учитывая, что катушка доз с постоянной  $\omega_3$  охватывает образец и поэтому изменение сцепленного с ней потока равно  $2B_1\omega_3s_3$ , т.е.

$$B_1 = \left[ C_{\text{фв}} / (2\omega_3s_3) \right] a_{1mB}. \quad (4.8)$$

Напряженность поля  $H_1$  можно также рассчитать, зная постоянную намагничивающей катушки  $K_{\text{н.к}}$  и ток в ней  $I_1$ :

$$H_1 = K_{\text{н.к}} I_1. \quad (4.9)$$

Аналогично определяют остальные точки основной кривой намагничивания.

#### 4.5.2. Получение точек петли гистерезиса

Установка, схема которой приведена на рис. 4.4, позволяет также определять точки магнитной петли гистерезиса.

Как и при нахождении точек основной кривой намагничивания, замкнув ключ SA2, поставив переключатель SA3 в положение 1 и отключив гальванометр, образец предварительно размагничивают, после чего реостатом  $R_1$  устанавливают ток в катушке  $\omega_1$ , соответствующий максимальной для данной петли напряженности  $H_{\text{max}}$  (рис. 4.5, б).

Точки  $A_1$  ( $A_6$ ) определяют тем же способом, что и точки основной кривой намагничивания. Для получения точки  $A_2$  в первом квадранте, не изменяя сопротивления реостата  $R_1$ , размыкают ключ SA2 и устанавливают реостатом  $R_2$

по амперметру  $PA2$  намагничивающий ток, обеспечивающий напряженность  $H_2$ ; при этом переключатель  $SA1$  должен находиться в положении  $1$ , а переключатель  $SA4$  – в нейтральном положении. Затем снова замыкают ключ  $SA2$  и стабилизируют магнитное состояние образца при напряженности  $H_{\max}$ . И, наконец, поставив переключатель  $SA1$  в положение  $1$  и подключив гальванометр к измерительной катушке напряженности  $\omega_2$ , размыкают ключ  $SA2$  и замечают максимальное отклонение указателя гальванометра  $a_{1mH}$ , пропорциональное изменению напряженности поля в образце. Очевидно, что:

$$H_{\max} - H_2 = \left[ C_{\text{фн}} / (\mu_0 \omega_2 s_2) \right] a_{1mH}, \quad (4.10)$$

откуда

$$H_2 = H_{\max} - \left[ C_{\text{фн}} / (\mu_0 \omega_2 s_2) \right] a_{1mH}.$$

Индукцию  $B_2$  определяют так же, как и напряженность  $H_2$ , с той лишь разницей, что гальванометр подключают к измерительной катушке индукции  $\omega_3$ :

$$B_2 = B_{\max} - \left[ C_{\text{фн}} / (\omega_3 s_3) \right] a_{1mB}. \quad (4.11)$$

Для измерения остаточной индукции  $B_r$  (точка  $A_3$ ) после подготовительных операций, обеспечивающих стабилизацию магнитного состояния образца в точке  $A_1$ , и при замкнутом ключе  $SA2$  размыкают цепь намагничивающего тока, для чего переводят переключатель  $SA1$  в нейтральное положение. По полученному максимальному отбросу указателя гальванометра  $a_{1mB}$ , используя выражение (4.11), находят остаточную индукцию  $B_r$ .

Получение точек  $A_4$  и  $A_5$  во втором и третьем квадрантах отличается от определения точки  $A_2$  в первом квадранте тем, что при коммутации намагничивающего тока напряженность поля меняет свой знак. Для этого после установки намагничивающего тока, соответствующего напряженности  $H_4$  или  $H_5$ , и стабилизации магнитного состояния образца переключатель  $SA1$  оставляют в положении  $2$ , размыкают ключ  $SA2$ , включают гальванометр, переводят переключатель  $SA1$  из положения  $2$  в положение  $1$  и фиксируют максимальное отклонение указателя гальванометра  $a_{1mH}$  или  $a_{1mB}$ . Значения напряженностей  $H_4$  и  $H_5$ , а также индукций  $B_4$  и  $B_5$  рассчитывают соответственно по формулам (4.9) и (4.10).

Найденные точки позволяют построить одну половину петли гистерезиса. Другую половину петли достраивают из соображений симметрии.

Найденные точки позволяют построить одну половину петли гистерезиса. Другую половину петли достраивают из соображений симметрии.

Для определения статических характеристик магнитных материалов промышленностью выпущен ряд специальных измерительных установок. Установка типа У5045 предназначена для статических испытаний образцов магнитомягких материалов кольцевой формы при коммутационном режиме намагничивания (индукционно-импульсный метод) и позволяет определять основную кривую намагничивания, начальную магнитную проницаемость, максимальную магнитную проницаемость, петлю гистерезиса, остаточную индукцию, коэффициент прямоугольной петли гистерезиса и коэрцитивную силу по индукции; погрешность измерений напряженности, индукции и коэрцитивной силы не более  $\pm 3\%$ ; в качестве измерителя применен цифровой микроверметр типа Ф5050.

Установка типа У5056 предназначена для статических испытаний образцов магнитотвердых материалов длиной от 4 до 100 мм с импульсным намагничиванием и плавным изменением тока при определении характеристик и позволяет определять остаточную индукцию и коэрцитивную силу с погрешностью не более  $\pm 3\%$ , а также кривую размагничивания и кривые возврата с погрешностью не более  $\pm 4\%$ ; в установке применены цифровые измерители напряженности и индукции типов Ф5155/1 и Ф5155/2.

Установка типа У5032 предназначена для испытаний магнитомягких материалов в режиме намагничивания, близком к статическому при  $dB/dT = \text{const}$ , и позволяет определять петлю гистерезиса, остаточную индукцию, коэрцитивную силу и магнитную проницаемость с погрешностью не более  $\pm 4\%$ ; результат измерения может быть представлен в цифровом виде или графически; время определения характеристик 5 мин.

#### **4.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРОВ**

Динамические испытания магнитных материалов наиболее просто осуществить, располагая амперметром действующих и вольтметрами амплитудных и средних значений.

Амперметр  $PA$  и вольтметры  $PV1$  и  $PV2$  включают в электрические цепи намагничивающей  $\omega_1$  и измерительной  $\omega_2$  обмоток испытуемого образца, как показано на рис. 4.б.

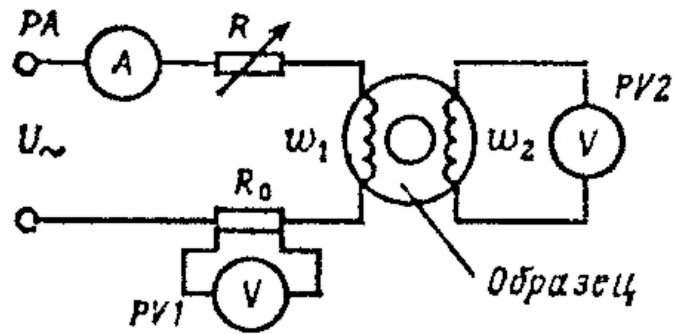


Рис. 4.6. Схема соединений при определении динамических характеристик магнитных материалов с помощью амперметра и вольтметров

Если активное сопротивление  $R$  в цепи намагничивающей обмотки велико, то при синусоидальном напряжении питания форма кривой напряженности поля в образце близка к синусоидальной. В этом случае напряженность  $H_m$  вычисляют по формуле

$$H_m = \sqrt{2I\omega_1 / l_{cp}}, \quad (4.12)$$

где  $I$  – действующее значение намагничивающего тока;  $\omega_1$  – число витков намагничивающей обмотки;  $l_{cp}$  – средняя длина окружности образца.

Если же активное сопротивление  $R = 0$ , то близкой к синусоидальной оказывается форма кривой индукции, и для определения напряженности поля в образце измеряют вольтметром амплитудных значений  $PV1$  падение напряжения  $U_m$  на образцовом резисторе  $R_0$ . Очевидно, что

$$H_m = \frac{U_m \omega_1}{R_0 l_{cp}}. \quad (4.13)$$

Магнитная индукция  $B_m$  в любом случае выражается через среднее значение ЭДС, наводимой в обмотке  $\omega_2$  и измеряемой вольтметром средних значений  $PV2$ , следующим образом:

$$B_m = E_{2cp} / (4\pi\omega_2 s_0) \approx U_{2cp} / (4f\omega_2 s_0), \quad (4.14)$$

где  $U_{2cp}$  – показание вольтметра;  $f$  – частота;  $\omega_2$  – число витков измерительной обмотки;  $s_0$  – площадь поперечного сечения образца.

Изменяя намагничивающий ток и измеряя  $H_m$  и  $B_m$ , можно по полученным значениям построить зависимость  $B_m = f(H_m)$ , а также определить амплитудную магнитную проницаемость  $\mu_m = B_m / (\mu_0 H_m)$ .

**Использование вольтметра с управляемым выпрямителем.** Схема установки для определения динамических характеристик магнитных материа-



лов, содержащей названный вольтметр, представлена на рис. 4.7. Вольтметр  $PV$  с управляемым выпрямителем  $UB$  позволяет измерять средние значения переменных ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ , которые связаны известной зависимостью с напряженностью магнитного поля и магнитной индукцией в образце.

Пусть кривая намагничивающего тока  $i_1$  (рис. 4.8) несинусоидальна, но симметрична относительно оси времени. Очевидно, что форма кривой напряженности поля в образце будет повторять форму кривой тока. Найдем среднее за период значение ЭДС  $e_1 = -M((di_1)/dt)$  на выводах вторичной обмотки катушки взаимной индуктивности  $M$ , считая, что контакт  $S$  управляемого выпрямителя замкнут в течение интервала времени  $t_2 - t_1 = T/2$ , совпадающего, например, с положительным полупериодом управляющего напряжения  $u_y$ :

$$a_{1cp} = -\frac{M}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} di_1 = -\frac{M}{T} [i_1]_{i_1(t_1)}^{i_1(t_1 + \frac{T}{2})} = 2Mfi_1(t_1), \quad (4.15)$$

так как  $i_1(t_1) = -i_1(t_1 + T/2)$ , где  $f = 1/T$  – частота.

Зная  $E_{1cp}$ , нетрудно выразить через него напряженность поля в образце в рассматриваемый момент времени:

$$H_{t1} = [i_1(t_1)]\omega_1/l_{cp} = E_{1cp}\omega_1/(2Mfl_{cp}). \quad (4.16)$$

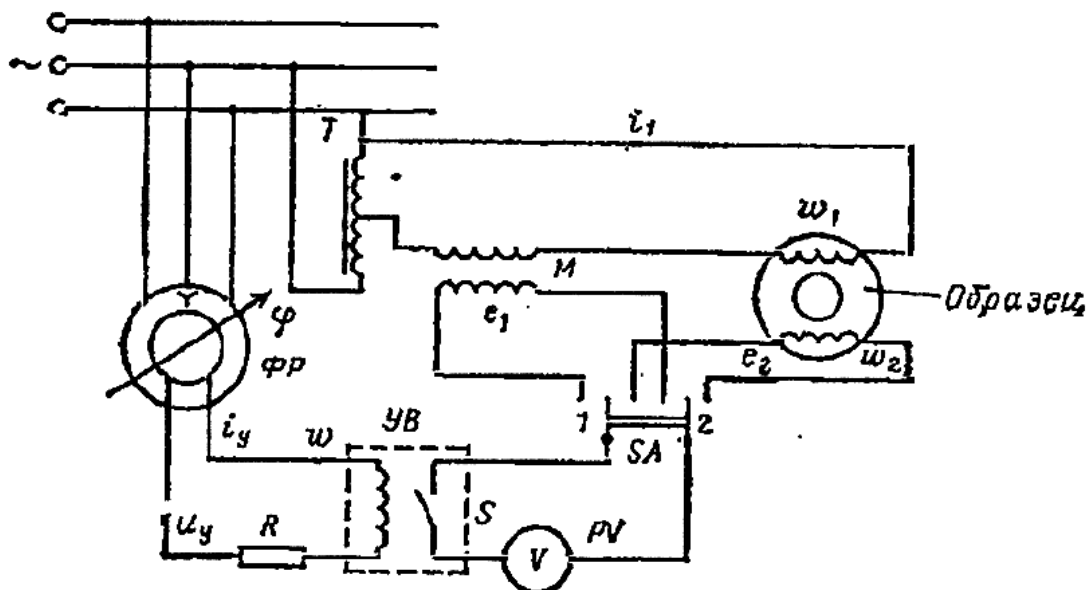


Рис. 4.7. Упрощенная принципиальная схема установки для определения динамических характеристик магнитных материалов, в которой использован вольтметр с управляемым выпрямителем

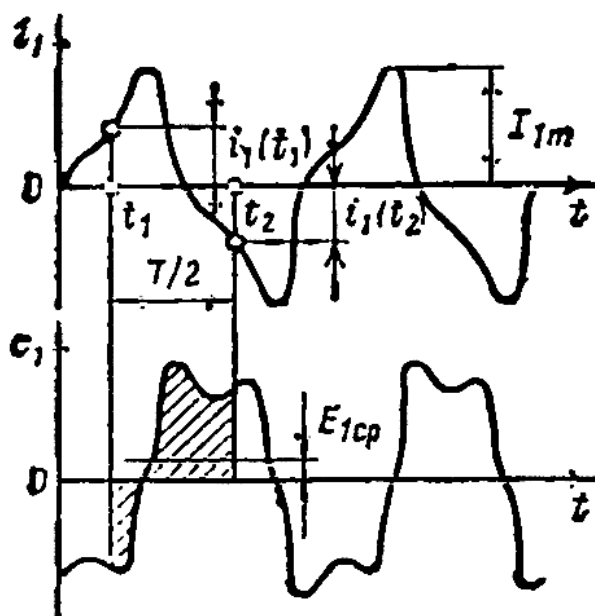


Рис. 4.8. Временные диаграммы, поясняющие принцип измерения мгновенных значений напряженности магнитного поля

Из формулы (4.16) следует, что по показаниям вольтметра средних значений  $U_{1cp} \approx E_{1cp}$ , например вольтметра магнитоэлектрической системы с достаточно большим входным сопротивлением, можно, изменяя фазорегулятором  $\Phi P$  фазу управляющего напряжения  $u_y$ , определить другие мгновенные значения напряженности поля в образце, и в частности амплитудное:

$$H_m = E_{cp\max} \omega_1 / (2M f l_{cp}), \quad (4.17)$$

при этом переключатель  $SA$  должен находиться в положении 1.

Аналогично определяют мгновенное значение индукции в образце путем измерения среднего значения ЭДС  $e_1 = -\omega_1 s_0 (dB/dt)$  (переключатель  $SA$  необходимо поставить в положение 2)

$$E_{2cp} = -\frac{\omega_2 s_0}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} dB = -\frac{\omega_2 s_0}{T} \left| B \right|_{B(t_1)}^{B\left(t_1 + \frac{T}{2}\right)} = 2\omega_2 s_0 f B_{t1}, \quad (4.18)$$

откуда

$$B_{t1} = E_{2cp} / (2\omega_2 s_0 f). \quad (4.19)$$

В частном случае

$$B_m = E_{2cp\max} / (2\omega_2 s_0 f). \quad (4.20)$$

Зависимость  $B_t = f(H_t)$  представляет собой динамическую петлю гистерезиса. Координаты точек петли можно найти из формул (4.17) и (4.18), предварительно измерив  $E_{1cp}$  и  $E_{2cp}$  при различных фазовых сдвигах  $u_y$  относительно  $i_1$  в пределах от 0 до  $180^\circ$ .

Для получения точек основной динамической кривой намагничивания  $B_m = f(H_m)$  измеряют  $E_{1cp\max}$  и  $E_{2cp\max}$ , последовательно увеличивая ток  $I_1$  от значений, соответствующих начальному участку кривой, до значений, при которых дальнейшее возрастание индукции становится монотонным (наступает состояние магнитного насыщения), а затем по формулам (4.18) и (4.30) вычисляют  $H_m$  и  $B_m$ .

Установки для определения динамических характеристик магнитных материалов, в которых используется описанный выше принцип измерения, называют феррометрами.

Выпускаемый промышленностью цифровой феррометр типа Ф5063 имеет следующие основные характеристики: пределы измерения средних значений напряжения 0,01...10,00 В; пределы измерения амплитудных значений тока 0,01...10,00 А; диапазон частот при определении петель гистерезиса и измерении амплитудных значений тока 50...1000 Гц; диапазон частот при измерении средних значений напряжения 25...10 000 Гц; погрешность измерений 0,5...1,0%.

**Применение ваттметра для определения магнитных потерь.** Широко распространенным ваттметровым способом испытывают образцы кольцевой формы, а также образцы в виде полос, из которых собирают замкнутую магнитную цепь. Схема включения нанесенных на образец обмоток и измерительных приборов изображена на рис. 4.9, а.

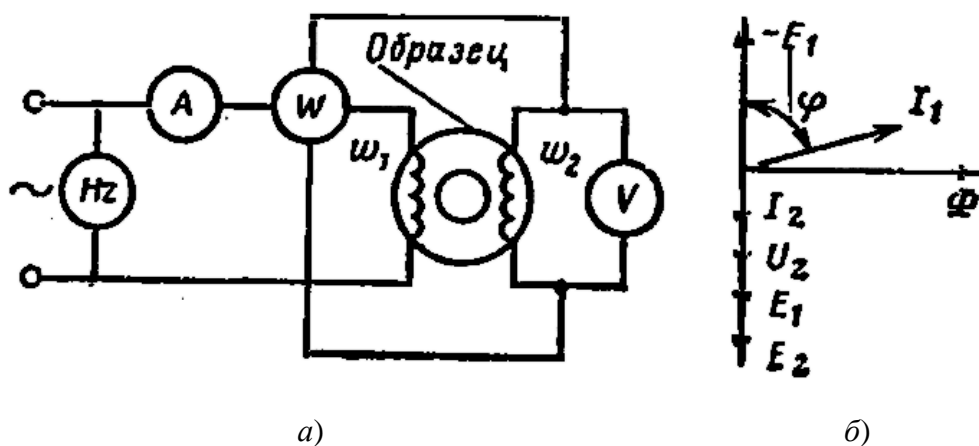


Рис. 4.9. Определение магнитных потерь:

а – схема соединений; б – векторная диаграмма электрических и магнитных величин

Если пренебречь потоками рассеяния магнитной цепи и индуктивными сопротивлениями вольтметра и цепи напряжения ваттметра, которые малы по сравнению с их активными сопротивлениями, то мощность магнитных потерь и мощность, расходуемую на нагрев активных сопротивлений в цепи обмотки  $\omega_2$ , можно выразить следующим образом:

$$E_1 I_1 \cos \varphi = P_{\text{п}} + E_2 I_2, \quad (4.21)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – соответственно ЭДС индукции в намагничивающей  $\omega_1$  и измерительной  $\omega_2$  обмотках (рис. 4.9, б);  $I_1$  и  $I_2$  – токи в обмотках  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между векторами  $E_1$  и  $I_1$ ;  $P_{\text{п}}$  – мощность потерь на перемагничивание.

Учитывая, что  $E_1 = E_2(\omega_1 / \omega_2)$ ;  $E_2 = U_2(1 + R_2 / R)$ ;  $I_2 = U_2 / R$ ;  $R = R_V R_U (R_V + R_U)$ , где  $\omega_1 / \omega_2$  – отношение чисел витков намагничивающей и измерительной обмоток;  $U_2$  – напряжение на обмотке  $\omega_2$ ;  $R_2$  – активное сопротивление обмотки  $\omega_2$ ;  $R_V$  – активное сопротивление вольтметра;  $+R_U$  – активное сопротивление цепи напряжения ваттметра, на основании формулы (4.21) получим

$$P_{\text{п}} = \left[ (U_2 I_2 \cos \varphi) \frac{\omega_1}{\omega_2} - \frac{U_2^2}{R_V} - \frac{U_2^2}{R_U} \right] (1 + R_2 / R). \quad (4.22)$$

Обозначив в выражении (4.22) мощность, измеренную ваттметром,  $U_2 I_1 \cos \varphi = P_w$ , мощность, потребляемую вольтметром,  $U_2^2 / R_V = P_V$ , мощность, потребляемую цепью напряжения ваттметра,  $U_2^2 / R_U = P_U$  и разделив обе его части на массу образца  $G$ , приходим к выражению, определяющему удельные магнитные потери:

$$P_{\text{по}} = \frac{\left[ P_w \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) - (R_V + R_U) \right] (1 + R_2 / R)}{G}. \quad (4.23)$$

Множитель  $1 + R_2 / R$  в выражении (4.23) можно опустить, если  $R_2 \ll R$ . Удельные магнитные потери находят в зависимости от магнитной индукции  $B_m$  на разных частотах.

Значение  $B_m$ , при котором измерялись потери, рассчитывают по формуле

$$B_m = U_2 / (4kf\omega_2 s_0), \quad (4.24)$$

где  $U_2$  – действующее значение напряжения на обмотке  $\omega_2$ ;  $k = 1,11$  – коэффициент формы для синусоидальной индукции;  $s_0$  – площадь поперечного сечения образца.

Магнитные потери складываются из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. В области низких частот потери на гистерезис пропорциональны первой степени частоты, а потери на вихревые токи – квадрату частоты, т.е.  $P_{\Gamma} = af$ ;  $P_{\text{в}} = bf^2$ .

Для определения отдельно потерь  $P_{\Gamma}$  и  $P_{\text{в}}$  достаточно измерить общие потери на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$ , а затем, решив систему уравнений

$$P_{\text{п1}} = af_1 + bf_1^2; \quad P_{\text{п2}} = af_2 + bf_2^2 \quad (4.25)$$

аналитически или графически, найти коэффициенты  $a$  и  $b$ .

Для измерения удельных потерь на перемагничивание в электротехнической стали промышленностью выпущен ряд ваттметровых установок. В частности, на установке типа У5033 можно определять потери на частоте 50 Гц при максимальной индукции 1,0; 1,5 и 1,7 Тл и на частоте 400 Гц при максимальной индукции 0,75 и 1,0 Тл. Установка типа У5034 позволяет определять потери в диапазоне частот 25...1000 Гц [4].

## 5. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

Измерительный сигнал в измерительно-информационных системах (ИИС) с момента его формирования до индикации или регистрации результата измерения либо до его ввода в вычислительное или запоминающее устройство испытывает ряд преобразований. Такие преобразования осуществляются последовательно включенными измерительными преобразователями, которые образуют измерительный канал ИИС.

### 5.1. ВИДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В ИИС

Основными видами преобразования измерительных сигналов в ИИС являются: дискретизация, коммутация, фильтрация, масштабирование, линеаризация, выборка и хранение информации, аналого-цифровое преобразование. В измерительных каналах ИИС могут реализоваться все указанные виды преобразования либо отдельные виды в различных комбинациях и различной последовательности.

Рассмотрим кратко содержание основных способов преобразования измерительных сигналов в ИИС применительно к сигналам вида напряжение постоянного тока как наиболее распространенных.

Дискретизация – это способ преобразования непрерывных процессов, заключающийся в замене зависимости  $x(t)$ , характеризующей процесс, некоторой дискретной во времени последовательностью чисел  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (результатов измерений), отражающих значения  $x(t)$  в фиксированные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  (рис. 5.1). Последовательность чисел выбирается так, чтобы по ним впоследствии можно было восстановить исходный процесс с заданной погрешностью.

Дискретизация позволяет использовать один измерительный канал для обслуживания группы источников измерительной информации, что упрощает конструкцию и снижает стоимость системы. Дело в том, что большинство технологических процессов, в которых сбор информации производится посредством ИИС, обладает сравнительно большой постоянной времени (от нескольких секунд до нескольких часов), а время преобразования сигнала измерительным каналом обычно не превышает сотых долей секунды.

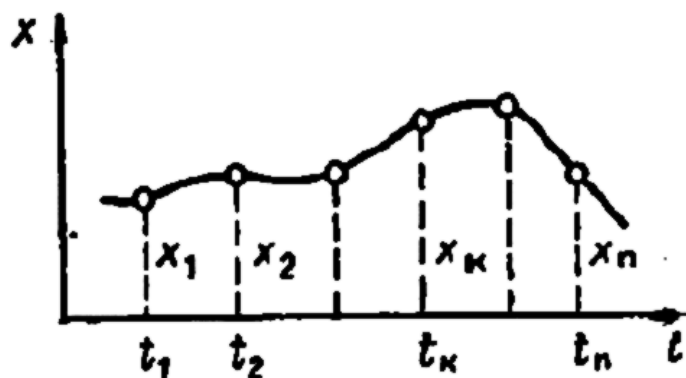


Рис. 5.1. Дискретизация процесса

Спорадическая дискретизация заключается в измерении значений  $x(t)$  в моменты времени, зависящие от его развития. Пусть  $0 \leq x \leq A$ , а  $q = A/N = \text{const}$ . При спорадической дискретизации, пока  $x(t)$  находится внутри кванта  $(i - 1)q < x(t) < iq$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ , измерение не производится. В момент времени  $t_1$ , при котором процесс выходит за границы кванта,  $x(t_1) < (i - 1)q$  или  $x(t_1) > iq$ , возникает заявка на измерение.

Между тем физические процессы, которые исследуются на практике, всегда имеют начало и конец, т.е. ограничены во времени. Следовательно, и функции, их отражающие, ограничены, а последние, как известно, обладают неограниченным спектром. Данные обстоятельства принципиально ограничивают возможность применения теорем В. А. Котельникова на практике. Указанное затруднение можно было бы преодолеть путем разумного ограничения ширины спектра исследуемого процесса, вне которого его спектральная плотность пренебрежимо мала. Но при этом неизбежно будут возникать методические погрешности восстановления исходного процесса. Кроме того, не все функции, которые используются для изображения исследуемых процессов, хорошо разлагаются в ряд вида  $(\sin x)/x$  при ограниченном числе членов разложения, например экспоненциальная функция.

При решении задачи восстановления исходного процесса по дискретной последовательности отсчетов учитывают практическую реализуемость интерполирующего устройства и простоту его изготовления.

Коммутация – это процесс, при котором источники измерительной информации (датчики) в определенной последовательности подключаются ко входу измерительного канала (ИК). Процесс коммутации реализуется посредством коммутаторов. На рисунке 5.2 показана схема коммутатора с однополюсными ключами.

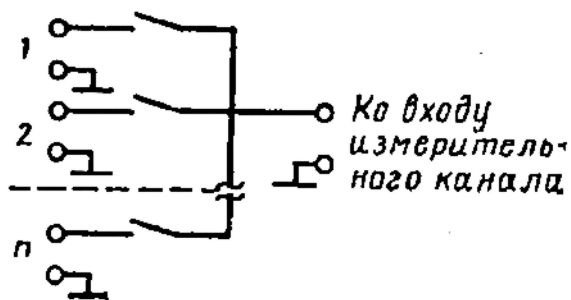


Рис. 5.2. Коммутатор с однополюсными ключами

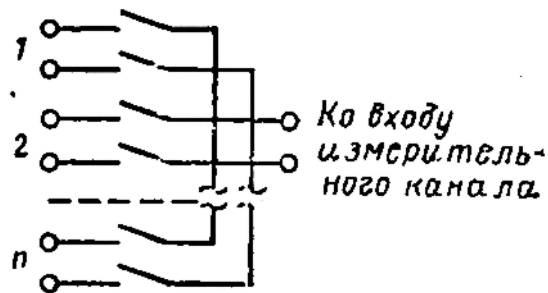


Рис. 5.3. Коммутатор с двухполюсными ключами

Коммутатор имеет  $n$  входов, к каждому из которых подключается свой источник информации. Выход коммутатора подключается ко входу ИК. Данный коммутатор используется, если все источники информации имеют одну общую точку заземления. При нормальной работе коммутатора в замкнутом состоянии всегда находится только один ключ, подключающий заданный источник информации к измерительному каналу; остальные ключи разомкнуты. Если источники информации не имеют общей точки заземления, то применяют коммутаторы с двухполюсными ключами (рис. 5.3).

Основным элементом коммутатора является ключ. Он выполняется на основе либо электромеханических реле с герметизированными контактами (герконах), либо на транзисторах.

Геркон представляет собой стеклянную ампулу диаметром 3...5 и длиной 20...30 мм, в которую впаяны две пластины из ферромагнитного материала с защитным покрытием, обычно из тонкого слоя золота. В герконах, предназначенных для коммутации напряжений низких уровней (около 1 мкВ), газ из ампулы откачивается. Впаянные в ампулу пластины являются электромеханическими контактами. Размещается геркон внутри катушки с обмоткой, по которой протекает ток управления герконом. При наличии тока управления магнитное поле катушки намагничивает пластины геркона, которые в зависимости от конструкции геркона либо притягиваются друг к другу и замыкаются, либо отталкиваются друг от друга и размыкаются. В первом случае при отсутствии тока управления контакты геркона разомкнуты, во втором – замкнуты.

Такое положение позволяет успешно применять фильтрацию сигналов для борьбы с помехами. Фильтрация сигналов производится электрическими фильтрами или интеграторами.



## 5.2. ПРИНЦИПЫ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Известен широкий набор фильтров: пассивные и активные фильтры, фильтры на основе  $RC$ -,  $RL$ - или  $RLC$ -элементов. Однако в ИИС выбор фильтров часто ограничен экономическими соображениями. Активные фильтры содержат операционные усилители и стоят дорого, они применяются в случаях высокого уровня помех или для получения особой передаточной функции. Гораздо чаще в ИИС используются пассивные фильтры на  $RC$ -элементах. Индуктивная катушка стоит дороже резисторов или конденсаторов и практически не применяется.

Однозвенный  $RC$ -фильтр нижних частот показан на рис. 5.4. Его частотная характеристика  $|W(j\omega)|$  выражается уравнением

$$|W(j\omega)| = |W(j\omega)| = \sqrt{1 / (1 + \omega^2 T^2)},$$

где  $T = RC$ .

Принято считать полосой пропускания фильтра диапазон частот от 0 до  $f_0 = 1/T$ . На частоте  $\omega_0 = 2\pi f_0$  входной сигнал ослабляется в  $\sqrt{2}$  раз. На частотах  $\omega > \omega_0$  единицей в знаменателе выражения частотной характеристики пренебрегают и рассматривают  $|W(j\omega)| = 1/\omega T$ . Коэффициент передачи фильтра принято выражать в децибелах:

$$K = 20 \lg(U_2 / U_1). \quad (5.1)$$

На частотах  $\omega \gg \omega_0$  справедливо

$$K \approx 20 \lg(\omega / \omega_0). \quad (5.2)$$

*Пример.* Пусть однозвенным фильтром требуется обеспечить ослабление помехи промышленной частоты 50 Гц ( $\omega = 314$  рад/с) на 40 дБ. Это означает, что должно выполняться условие  $\omega = 100\omega_0$ . Но  $\omega_0 = 1/T$ , следовательно,  $T = 100 / \omega = 100 / 314 \approx 0,3$ . Фильтр не должен представлять большого сопротивления постоянному току (полезному сигналу), поэтому в данном случае выбирают  $R = 1$  кОм;  $C = 300$  мкФ. В качестве конденсатора  $C$  обычно выбирают электролитический конденсатор.

Если требования к полосе пропускания и ослаблению однозвенным фильтром не могут быть удовлетворены, то применяется двухзвенный фильтр (рис. 5.5).

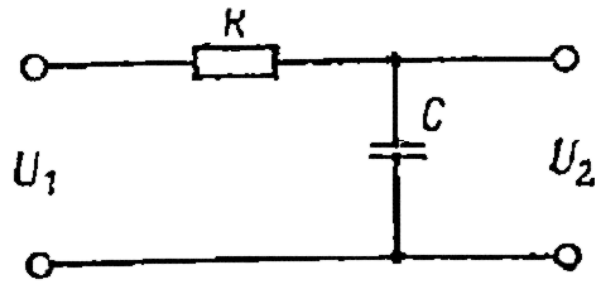


Рис. 5.4. Схема однозвенного RC-фильтра

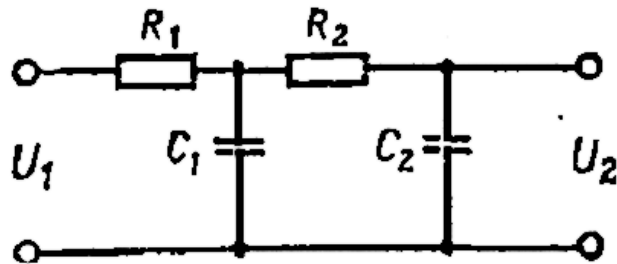


Рис. 5.5. Схема двухзвенного RC-фильтра

Часто требуется подавить помеху на какой-либо частоте, не внося заметного ослабления на других частотах. Такая задача решается с помощью полосовых фильтров. На практике в качестве полосового фильтра применяется двойной Т-образный мост (рис. 5.6, а); его частотная характеристика показана на рис. 5.6, б. На частоте  $\omega_0$  ослабление фильтром сигнала теоретически равно бесконечности. Но практически из-за отклонений параметров реальных элементов от номинальных значений это условие не реализуется, и коэффициент передачи такого фильтра редко превышает 40 дБ. При практической реализации фильтра выбирают соотношения

$$R_1 = R_2 = R; R_3 = 0,5R; C_1 = C_2 = C_3; C_3 = 2C. \quad (5.3)$$

В таком случае выражение для частоты  $\omega_0$  имеет вид  $\omega_0 = 1/RC$ .

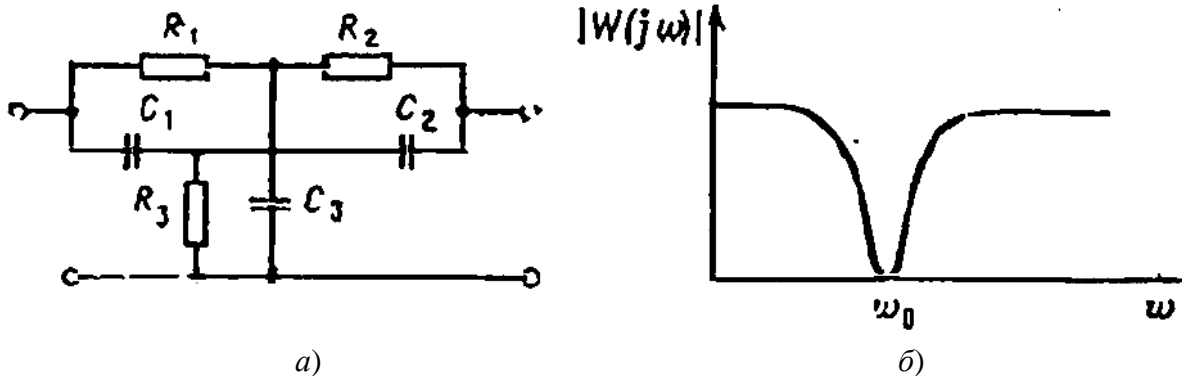


Рис. 5.6. Полосовой фильтр в виде двойного Т-образного моста:  
а – схема; б – частотная характеристика

Масштабирование – это операция, с помощью которой входной сигнал приводится к определенному (нормированному) диапазону изменения. В процессе масштабирования входной сигнал умножается на постоянное число  $K$  (масштабный коэффициент), которое может быть меньше или больше единицы. Число  $K$  является основной характеристикой масштабного преобразования. Реализуется масштабное преобразование посредством масштабного преобразователя.

В качестве масштабных преобразователей напряжения постоянного тока в ИИС применяются делители напряжения и операционные усилители, охваченные обратной связью.

На рисунке 5.7, а показан масштабный преобразователь в виде делителя напряжения на резисторах. Масштабный коэффициент делителя  $K = R_2 / (R_1 + R_2)$ , его стабильность зависит от стабильности сопротивлений резисторов делителя, поэтому резисторы выбираются проволочными на основе манганина. Требования к значению резисторов делителя определяются как источником, так и приемником сигнала.

На рисунке 5.8 представлены масштабные преобразователи на основе операционных усилителей. Преобразователь на рис. 5.8, а является инвертирующим, т.е. полярность напряжения на его выходе противоположна полярности входного напряжения. Преобразователь на рис. 5.8, б неинвертирующий, у него полярность входного и выходного напряжений одна и та же.

Если предположить, что коэффициент усиления операционных усилителей бесконечно большой, а входной ток и напряжение смещения отсутствуют, то выражение масштабных коэффициентов имеют вид для инвертирующего преобразователя  $K = R_2 / R_1$ ; для неинвертирующего преобразователя –  $K = 1 + R_2 / R_1$ .

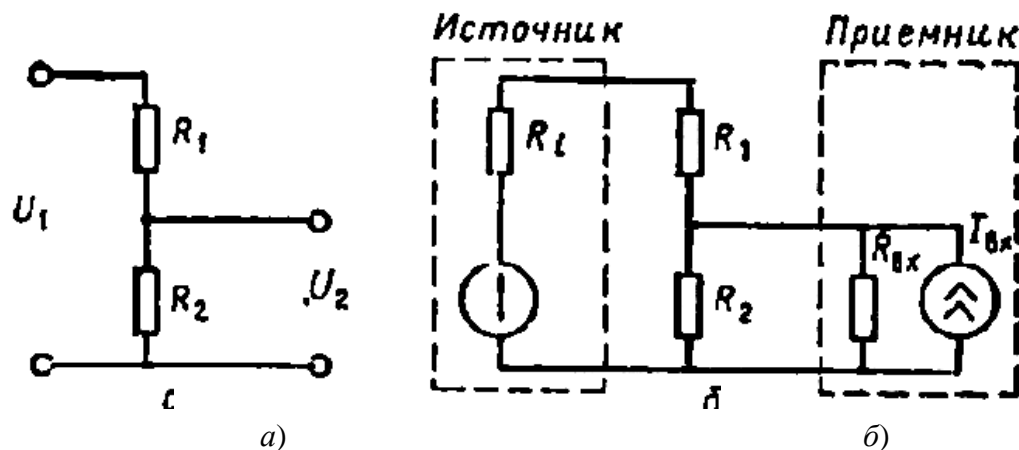


Рис. 5.7. Делитель напряжения:

а – принципиальная схема; б – место делителя напряжения в измерительном канале

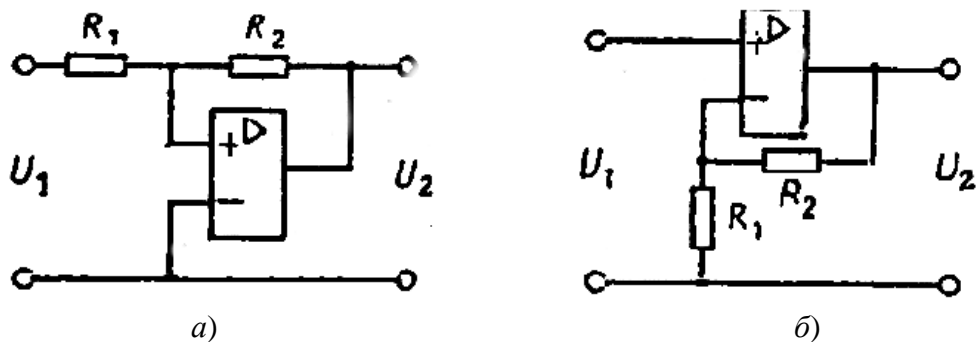


Рис. 5.8. Масштабные преобразователи на основе операционных усилителей:  
 а – инвертирующий; б – неинвертирующий

Входное сопротивление инвертирующего преобразователя равно  $R_1$ , неинвертирующего – определяется входным сопротивлением операционного усилителя и может быть весьма большим.

### 5.3. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ АЦП В ИИС

Линеаризация – это преобразование сигнала для получения линейной зависимости между выходным сигналом ИК и значением измеряемой ФВ (рис. 5.9).

Выборка и хранение аналоговой информации часто используются при исследовании быстро протекающих процессов, когда требуется определить значение измеряемой величины в заданный момент времени. Непосредственное применение для этой цели АЦП невозможно из-за сравнительно длительного времени его работы. Такие задачи решаются с помощью устройств выборки и хранения измерительной информации. Простейшая схема устройства показана на рис. 5.10.

Измеряемая величина  $U_1(t)$  через операционный усилитель  $OY_1$  и ключ  $SA$  подается на конденсатор  $C$ . Выходное сопротивление  $OY_1$  и сопротивление замкнутого ключа малы, следовательно, мала и постоянная времени цепи заряда конденсатора  $C$ . Благодаря этому напряжение на конденсаторе с пренебрежимо малым запаздыванием воспроизводит значение  $U_1$ . В момент, когда требуется произвести измерение значения  $U_1(t)$ , ключ  $SA$  размыкается и на конденсаторе  $C$  хранится требуемое значение  $U_1$ . Это напряжение передается на выход  $OY_1$  в виде  $U_2$  и может быть преобразовано в код сравнительно медленно действующим АЦП. Операционный усилитель  $OY_2$  является буферным усилителем, обладая большим входным сопротивлением и малым входным током, он обеспечивает постоянное значение напряжения на конденсаторе  $C$  в течение времени работы АЦП.

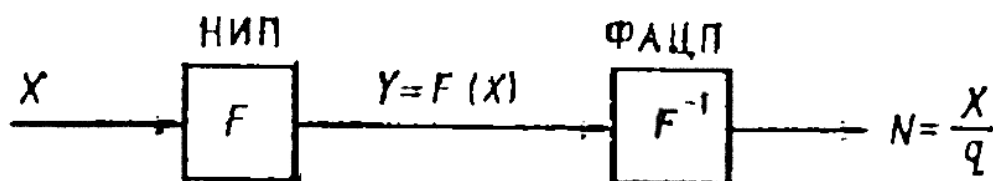


Рис. 5.9. Линеаризация нелинейного измерительного преобразователя функциональным АЦП

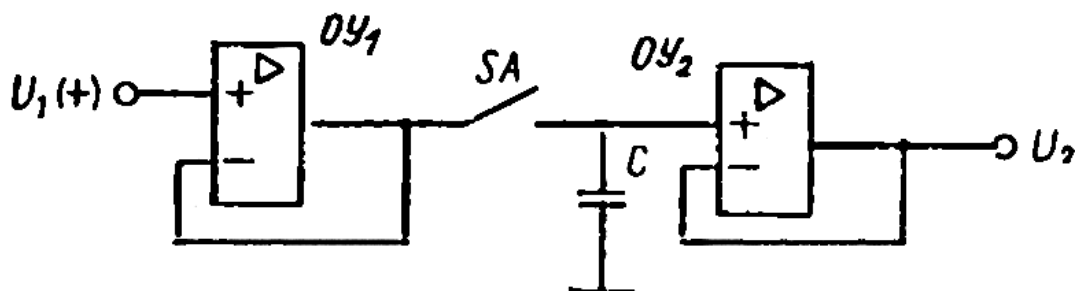


Рис. 5.10. Устройство выборки и хранения аналоговой информации

Аналого-цифровое преобразование осуществляет переход от аналоговой формы сигнала к цифровой. Реализуется это преобразование АЦП. Известен ряд способов преобразования аналогового сигнала в цифровой, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее часто применяются в ИИС методы интегрирующего и числоимпульсного преобразования.

Интегрирующий метод преобразования заключается в том, что измеряется интегральное значение входного сигнала за некоторый точно фиксированный промежуток времени. При этом периодические помехи, наложенные на сигнал, период которых равен или кратен интервалу интегрирования, не оказывают влияния на результат измерения, а действие помех, период которых не удовлетворяет указанному требованию, существенно ослабляется. Можно показать, что приемник интегрирующего типа является оптимальным приемником сигналов  $\text{const}U$  с точки зрения помехоустойчивости. В этом его основное достоинство, кроме того, он легко реализуется на современной микроэлектронной базе. Известно несколько способов реализации АЦП интегрирующего типа, однако наиболее часто применяется АЦП двухтактного интегрирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В результате изучения учебного пособия «Электрические измерения в электроэнергетических системах и комплексах», присутствия на лекционных, лабораторных и практических занятиях студент будет способен: проводить измерения электрических и неэлектрических величин; выбирать средства измерения; проводить измерения электрических и неэлектрических величин; обрабатывать результаты измерений и оценивать их погрешность; различать классификацию физических величин и видов измерений, структуру и основные характеристики средств измерений; формулировать общие представления о конструкции и эксплуатации электроизмерительных приборов; воспроизводить параметрическое и функциональное представление периодических сигналов, характеристик трехфазных электрических цепей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Тарбеев, Ю. В.** Российская метрологическая энциклопедия / под ред. Ю. В. Тарбеева. – СПб. : Лики России, 2001.
2. **РМГ 29–99.** Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
3. **Сергеев, А. Г.** Метрология : учебное пособие для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М. : Логос, 2001. – 408 с
4. **Панфилов, В. А.** Электрические измерения : учебное пособие для вузов / В. А. Панфилов. – 7-е изд., сер. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 288 с.
5. **Электрические измерения** / В. Н. Малиновский, Р. М. Демидова-Панферова и др. – М. : Энергоатомиздат, 1985.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. Исторические аспекты развития измерений .....	4
1.1. Древнерусская метрология .....	4
1.2. Метрологическая реформа Петра I .....	4
1.3. Развитие системы единиц измерений .....	6
1.4. Надзор за мерами и весами и за отсутствием злоупотреблений .....	6
1.5. Возникновение эталонной службы .....	8
1.6. Реформа метрологической службы .....	10
2. ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ .....	11
2.1. Физическая величина .....	13
2.2. Виды средств измерений .....	14
2.3. Основные этапы измерений .....	16
2.4. Классификация измерений по общим приемам получения результатов измерений .....	17
2.5. Принципы, методы и методики измерений .....	18
2.6. Погрешности измерений .....	19
2.7. Классификация условий проведения измерений .....	25
2.8. Единство измерений .....	26
2.9. Стандартизация .....	26
2.10. Качество электрической энергии .....	27
2.11. Коэффициент мощности .....	29
3. СРЕДСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ .....	31
3.1. Аналоговые электроизмерительные приборы .....	31
3.2. Измерение электрических величин цифровыми измерительными приборами .....	32
3.3. Характеристики аналого-цифровых преобразователей .....	33
3.4. Методы аналого-цифрового преобразования .....	37
3.5. Цифровые частотомеры .....	40
3.6. Цифровые вольтметры и мультиметры .....	43



3.7. Структура цифрового мультиметра .....	45
4. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН .....	48
4.1. Метрологическая основа магнитных измерений .....	48
4.2. Статические характеристики магнитных материалов .....	52
4.3. Динамические характеристики магнитных материалов .....	54
4.4. Испытания образцов в разомкнутой магнитной цепи .....	57
4.5. Определение статических характеристик магнитных материалов .....	58
4.6. Определение динамических характеристик магнитных материалов с использованием амперметра и вольтметров .....	62
5. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ .....	69
5.1. Виды преобразования измерительных сигналов в ИИС .....	69
5.2. Принципы фильтрации сигналов в информационно-измерительных системах .....	72
5.3. Линеаризация нелинейного измерительного преобразования функциональным АЦП в ИИС .....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	77
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	78

Учебное электронное издание

КАМЕНСКАЯ Мария Анатольевна  
КОБЕЛЕВ Александр Викторович  
КАГДИН Алексей Николаевич  
АРТЕМОВА Светлана Валерьевна  
ЧЕРНЫШОВА Татьяна Ивановна

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И КОМПЛЕКСАХ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова  
Графический и мультимедийный дизайнер Н. И. Кужильная  
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-2611-8



Подписано к использованию 03.07.2023.

Тираж 50 шт. Заказ № 71

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Тел./факс (4752) 63-81-08.  
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru