

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

## **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

**сборник учебно-методических материалов**  
для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Благовещенск, 2017

Печатается по решению  
Редакционно-издательского совета  
Энергетического факультета  
Амурского государственного университета

*Составитель: Карпова Т.В.*

Информационно-измерительная техника: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

©Амурский государственный университет, 2017  
©Кафедра автоматизации производственных  
процессов и электротехники, 2017  
©Карпова Т.В., составитель

## Содержание

### Введение

Краткий курс лекций

Методические рекомендации к практическим занятиям

Методические рекомендации к лабораторным работам

Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов

Библиографический список

## ВВЕДЕНИЕ

*Целью освоения дисциплины* является освоение принципов действия полупроводниковых приборов, усилительных, импульсных, логических, цифровых и преобразовательных устройств и основным особенностям их использования в электротехнических и электромеханических установках, освоение современных средств и методов электрических измерений, обработки и представления их результатов.

*Задачами в результате изучения дисциплины* студентом является следующее: умение четко представлять принцип действия электронных элементов и устройств, экспериментальным путем определить их параметры и характеристики, а также оценивать технико-экономическую эффективность применения этих устройств, оптимально выбрать средство измерения для поставленной задачи измерения, выполнить измерение, обработать и надлежащим образом представить его результаты.

В результате освоения дисциплины «Информационно-измерительная техника» студенты должны:

*Знать:*

- характеристики средств измерений;
- виды и методы измерений;
- измерительные преобразователи и электромеханические приборы;
- электронные аналоговые и цифровые приборы;
- мосты и компенсаторы;
- приборы и преобразователи для измерения неэлектрических величин;
- физическую сторону электромагнитных явлений в электронных устройствах;
- методы анализа простейших электронных устройств и основные направления развития современной электроники.

*Уметь:*

- проводить эксперименты в электротехнических установках;
- использовать средства информационно-измерительной техники;
- использовать основные приемы обработки экспериментальных данных;
- оценивать погрешности измерений;
- измерять электрические и неэлектрические величины;
- определять параметры и характеристики типовых электронных элементов и устройств;
- анализировать экспериментально полученные результаты и сравнивать с теоретическими расчетами.

*Владеть:*

- навыками создания электронных устройств и их экспериментального исследования;
- навыками оценки характеристик средств измерений;
- навыками расчетов погрешностей измерений;
- навыками составления схем для электронных устройств.

# 1. КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ

## Тема 1. Введение.

Стремительное развитие «Информационно-измерительной техники» связано с появлением полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, которые находят широкое применение в энергетике, вычислительной технике, космонавтике, автоматике, радиотехнике, телевидении, медицине, биологии и др.

В современной измерительной технике нашли широкое применение большинство типов электронных устройств, выполняющих функции выработки и преобразования информационных электрических сигналов, формирования управляющих воздействий и сигналов индикации, например: аналоговые электронные устройства, логические электронные устройства, микропроцессорные устройства и ЭВМ. В различные исторические периоды состояние мер и измерительной техники находилось в прямой зависимости от хозяйственной деятельности, общественных, религиозных и других факторов жизни общества. В связи с этим студенты должны знать:

- содержание дисциплины;
- цели и задачи изучения дисциплины;
- современное состояние и направления информационно-измерительной техники и электроники;
- методы электрических измерений, обработки их результатов;
- основные этапы развития информационно-измерительной техники и электроники.

Система распределения и потребления электроэнергии, получаемой от энергосистем, строится таким образом, чтобы удовлетворялись основные требования электрооборудования, находящегося у потребителей.

Надёжность электроснабжения достигается благодаря бесперебойной работе всех элементов энергосистемы и применению ряда технических устройств как в системе, так и у потребителей: устройств релейной защиты и автоматики, автоматического ввода резерва (АВР) повторного включения (АПВ), контроля и сигнализации.

Качество электроснабжения определяется поддержанием на установленном уровне значений напряжения и частоты, а также ограничением значений в сети высших гармоник и несимметричности напряжений.

Для обеспечения постоянного контроля за работой отдельных элементов системы электроснабжения и учёта вырабатываемой и потребляемой электроэнергии подлежат измерению значения тока, напряжения, частоты, мощности и электроэнергии, для чего используют информационно-измерительную технику.

Информационно-измерительная техника (ИИТ) – совокупность функционально объединённых в одном (или в ряде) устройстве средств измерений, предназначенная для измерения.

В ИИТ важную роль имеет процесс измерения, являющийся основным путём получения количественной информации.

Измерение – познавательный процесс. В результате получаем информацию о количественном значении исследуемой физической величины. Измерения проводятся при проведении пусконаладочных работ и в лабораториях КИП и автоматики. При эксплуатации энергетических объектов постоянно или периодически осуществляется контроль.

Контроль – установление соответствия между величиной физического параметра и заданной нормой. Контроль осуществляется при помощи преобразователей и измерительных приборов – средств измерений (СИ).

Совокупность преобразователя, средств передачи информации и измерительный прибор образуют локальную (местную) измерительную систему. Приборы устанавливают на щитах управления электростанций и диспетчерских пунктах энергосистем. Приборы устанавливаются также в распределительных устройствах. В настоящее время получили развитие информационно-измерительные системы (ИИС). Отличительным признаком этих систем является наличие вычислительной техники и микро-ЭВМ. В таких системах связь между функциональными блоками осуществляется посредством интерфейса.

Средства измерений – это технические устройства с наперед заданными характеристиками. Они подразделяются на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные системы.

Мера – техническое устройство, воспроизводящее определённое значение физической величины. Например: 1 Ом, 10 Ом. Показателями меры как средства измерений является её номинальное значение и класс точности.

Измерительный преобразователь – это СИ, предназначенное для преобразования одной физической величины в другую, удобную для передачи и измерения. Большие напряжения и токи в электроустановках можно измерить только с помощью преобразователей.

Измерительные приборы – это нормированные технические средства для измерений. Применяются различные приборы: показывающие, регистрирующие, интегрирующие.

Самые распространённые измерительные приборы для измерения тока, напряжения и мощности входят в состав электромеханической группы приборов. Все они состоят из неподвижной и подвижной частей. Взаимодействие этих частей под действием измеряемой величины приводит к перемещению указателя-стрелки. Оператор считывает число делений по шкале. Шкала в данном случае играет роль многозначной меры, деления которой были нанесены на заводе-изготовителе при помощи образцовых устройств – компараторов тока, напряжения и мощности.

Совокупность подвижной и неподвижной частей образует измерительный механизм (ИМ). Существует большое разнообразие конструкций и типов измерительных механизмов электромеханических приборов, однако все они содержат ряд общих деталей и узлов. К ним относятся корпус и отсчётное устройство прибора. Размеры корпуса и формы отсчётных устройств стандартизированы. Наибольшее распространение получили секторная и угловая формы.

На рисунке представлены условные обозначения системы ИМ: 1 – магнитоэлектрический, 2 – электромагнитный, 3 – электродинамический, 4 – ферродинамический, 5 – электростатический, 6 – индукционный. Эти названия распространяются и на приборы, например, амперметр магнитоэлектрической системы, электростатический вольтметр.

Измерения могут выполняться различными методами. Метод измерения – совокупность использования физических явлений, принципов сравнения с мерой и используемых средств измерений. Измерительные системы, в которых результат определяется по шкале прибора, получили наибольшее распространение. В этих системах применяется метод непосредственной оценки. Метод непосредственной оценки (отсчёта) заключается в непосредственном определении значения физической величины по отсчётному устройству прибора непосредственной оценки.

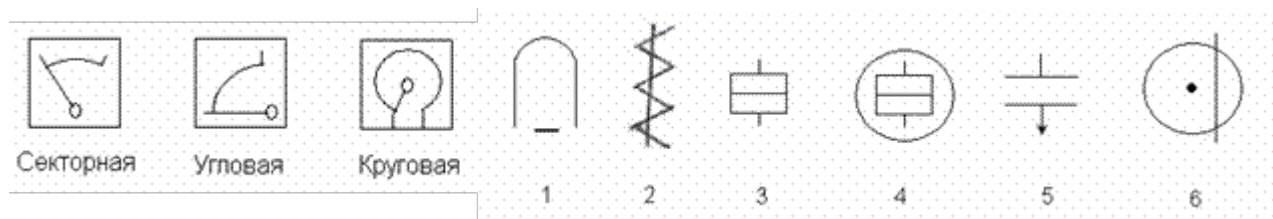


Рисунок – Типы шкал и обозначений системы приборов

ИС эксплуатируются при наличии внешних воздействий влияющих величин. В соответствии с установленными для конкретных ситуаций диапазонами значений влияющих величин различают нормальные, рабочие и предельные условия эксплуатации.

Рабочими называются условия измерений, при которых влияющие величины находятся в пределах своих рабочих областей. Рабочая область значений влияющей величины – это область, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность. Предельные условия измерений – это условия, характеризуемые экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые СИ может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

Измерительные приборы обозначаются на принципиальных схемах специальными условными символами: РА – амперметр, РV – вольтметр, РW – ваттметр, РR – омметр, РS – регистрирующий прибор, РF – частотомер, РТ – часы, РI – счётчик активной энергии, РK – счётчик реактивной энергии.

## **Тема 2. Измерения, средства измерения.**

### *Погрешности измерений.*

Основные понятия и виды погрешностей. Систематические и случайные погрешности. Вероятностный подход к описанию погрешностей. Вероятностные оценки погрешностей. Обработка результатов измерений при различных видах измерений.

*Погрешность* – это оценка достоверности результатов измерений.

*Классификация погрешностей.*

*По способу численного выражения* различают абсолютную и относительную погрешности.

Относительная погрешность характеризует качество измерений. Погрешности считаются положительными, если результат измерения превышает действительное значение.

*В зависимости от источника возникновения*, погрешности делятся на методические, инструментальные, субъективные, внешние.

Методические погрешности могут возникать из-за недостаточной разработанности теории явлений, положенной в основу методов измерений, а также неточности соотношений, используемых для нахождения оценки измеряемой величины. К методическим погрешностям относятся погрешности воздействия на объект измерения измерительного прибора; погрешности, связанные с некоторой неопределенностью параметров самого объекта измерения.

Инструментальные (аппаратурные) погрешности – погрешности применяемых средств измерения, вызванные схемными и конструктивными недостатками измерительных приборов, а также состоянием прибора в процессе эксплуатации.

Субъективные погрешности – погрешности, связанные с несовершенством органов чувств оператора, его тренированностью, вниманием при измерениях и его индивидуальными особенностями.

Внешние погрешности – обусловленные влиянием внешних условий, как на измеряемый объект, так и на измерительный прибор.

*По закономерностям применения* погрешности делятся на систематические, случайные, грубые, промахи.

Систематические погрешности измерения – это составляющие погрешности, которые остаются постоянными и закономерно изменяются при повторных измерениях одной и той же величины.

Погрешности бывают: прогрессирующие (возрастающие, убывающие), периодические, изменяющиеся по непериодическому закону.

К постоянным систематическим погрешностям относят погрешность градуировки шкалы, температурная погрешность и т.д.

К переменным систематическим погрешностям относят погрешность, обусловленную нестабильностью источника питания.

Погрешность обусловлена влиянием электромеханических полей и других влияющих величин.

Случайные погрешности измерений – это составляющие погрешности измерения, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Значение и знак случайной погрешности определить невозможно, т. к. случайные погрешности обязаны своим происхождением причинам, действия которых не одинаково в каждом эксперименте и не может быть учтено. Обнаруживаются случайные погрешности при многократных измерениях одной и той же величины, следовательно, их влияние на результат измерений учитывается методами математической статистики и теории вероятности.

Грубые погрешности – погрешности, существенно превышающие ожидаемые при данных условиях погрешности.

Промахи – погрешности, которые явно и резко искажают результаты измерений. Это следствие неправильных действий экспериментатора и неисправности в схемах и приборах (пробой трансформатора тока).

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

Или *измерение* – процесс, заключающийся в определении значения физической величины с помощью специальных технических средств.

*Результат измерения* – некоторое число, принятое для данной физической величины единиц, дающее количественную информацию о свойствах измеряемой физической величины.

Физическая величина имеет два значения – истинное и действительное.

Истинное значение физической величины – значение, идеально отражающее в качественном и количественном отношении соответствующее свойство данного физического объекта.

Действительное значение физической величины – значение, определенное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что может быть использовано вместо него.

Точность измерения отражает близость результатов измерений к истинному значению измеряемой величины.

*Виды измерений.*

*По способу нахождения* числового значения физической величины измерения делятся на прямые, косвенные, совокупные измерения, совместные измерения.

Прямые измерения – измерения, при которых искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных.

*Косвенные измерения* – измерения, при которых искомое значение физической величины находят на основании известной математической зависимости между искомой величиной и величинами аргументами, получаемыми при их прямом измерении.

Совокупные измерения – одновременное измерение нескольких одноименных величин.

Обыкновенные измерения – измерения, выполняемые с однократными наблюдениями.

Статические измерения – измерения, выполняемые с многократными наблюдениями.

*По характеру зависимости измеряемой величины от времени* некоторые из измерений делятся на статические и динамические.

Статические измерения – измерения, при которых измеряемая величина постоянна во времени и в процессе измерения.

Динамические измерения – измерения, при которых измеряемая величина изменяется в процессе измерения.

*По условиям, определяющим точность результата измерения делятся на:*

- измерения максимально возможной точности;
- контрольно-проверочные, погрешность которых не должна превышать некоторого заданного значения;
- технические, погрешность которых определяется характеристиками средств измерения.

*Методы измерений.*

*Метод измерения* – совокупность приемов использования физических явлений, на которых основаны измерения принципов сравнения измеряемой величины с мерой и средств измерений.

Методы измерений делятся на:

- *метод непосредственной оценки* – непосредственное определение физической величины по отсчетному устройству измерительного прибора заранее градуированного в единицах измеряемой величины;
- *метод сравнения* – определение значения физической величины сравнением измеряемой величины с величиной, воспроизводимой мерой. (дифференциальный метод, метод совпадения, нулевой метод, метод противопоставлений).

Дифференциальный метод: на измерительный прибор воздействует разность  $\delta X$  между измеряемой величиной  $X$  и  $X_0$   $\delta X = X - X_0$ .

Нулевой дифференциальный метод. Результирующий эффект воздействия измеряемой величины и известной величины на прибор сравнения доводят до нуля.

Метод противопоставления- метод, в котором измеряемая и известная величины одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью показаний, которого устанавливается соотношение между ними. Применяется для измерения ЭДС, напряжения, тока.

Метод замещения - метод, при котором измеренную величину замещают известной величиной, равной по значению замещенной.

Метод совпадений – метод, при котором используется разность между измеряемой величиной и величиной воспроизводимой мерой. Используются совпадения отметок шкал или периодических сигналов.

*Методика измерения* – намеченный порядок измерений, регламентирующий методы, средства, алгоритм выполняемых измерений, которые в определенных условиях обеспечивают измерения с заданной точностью.

*Алгоритм измерения* – точное предписание о выполнении в определенном порядке совокупности операций, обеспечивающих измерение значения физической величины.

#### *Классификация средств измерений.*

Эталоны, образцовые и рабочие меры. Измерительные преобразователи, приборы и установки. Измерительные, информационные системы. Государственная система обеспечения единства измерений.

*Средства измерений* – технические средства, используемые при измерении и имеющие нормированные метрологические свойства, т.е. свойства, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерения.

*По назначению средства измерений классифицируются на:*

- меры;
- измерительные преобразователи;
- измерительные приборы;
- измерительные установки;
- измерительные системы.

*Меры* – средства измерения, предназначенные для воспроизведения физической величины заданного размера с определенной точностью.

*Измерительные преобразователи* – средства измерений, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи дальнейшего преобразования, обработки (хранения), но неподдающееся непосредственному восприятию наблюдателя.

*Измерительные приборы* – средства измерений, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для восприятия наблюдателем (например, вольтметр).

*Измерительная установка* – совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме удобной для восприятия наблюдателем, и расположенных в одном месте.

*Измерительные системы (ИС)* – совокупность функционально объединенных средств измерений, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления. Примерами могут служить системы, развернутые на крупных предприятиях и предназначенные для контроля технологического процесса производства какого-либо изделия.

В зависимости от назначения ИС разделяют на измерительные, контролирующие, управляющие. По числу измерительных каналов системы подразделяют на одно-, двух-, трех- и многоканальные.

Важной их разновидностью являются информационно-измерительные системы. Под информационно-измерительными системами (ИИС) понимаются системы, предназначенные для автоматического получения количественной информации непосредственно от изучаемого объекта путем процедур измерения и контроля, обработки этой информации и выдачи ее в виде совокупности именованных чисел, высказываний, графиков и т.д., отражающих состояние данного объекта. ИИС должны воспринимать изучаемые величины непосредственно от объекта, а на их выходе должна получаться количественная информация об исследуемом объекте.

В ИИС объединяются технические средства, начиная от датчиков и кончая устройствами выдачи информации, а также все программы, как необходимые для управления работой собственно системы, так и позволяющие решать в ИИС измерительные и вычислительные задачи, а также управлять конкретным экспериментом.

#### *Классификация ИИС.*

По организации алгоритма функционирования различают системы:

- с заранее заданным алгоритмом работы, правила функционирования которых не меняются, поэтому они могут использоваться только для исследования объектов, работающих в постоянном режиме;
- программируемые, алгоритм работы которых меняется по заданной программе, составляемой в соответствии с условиями функционирования объекта исследования;
- адаптивные, алгоритм работы которых, а в ряде случаев и структура, изменяются, приспосабливаясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта.

ИИС делятся на:

- ИИС последовательного действия, когда один датчик последовательно помещается в поле однородных физических величин;
- ИИС параллельного действия, имеющая множество датчиков, каждый из которых воспринимает свою физическую величину.

Таким образом, существует несколько разновидностей ИИС:

Собственно информационно-измерительные системы – получение количественной информации о значениях контролируемых физических величин путем их прямых совокупных измерений с последующей ее обработкой, предоставлением оператору и передачей другим потребителям.

Информационно-измерительные системы автоматического контроля – установление соответствия между состоянием объекта и заданной нормой и выработка суждения о данном и (или) будущем состоянии объекта.

Информационно-измерительные системы технической диагностики – контроль состояния различных технических устройств, обнаружение их отказов и определение неисправных элементов.

Информационно-измерительные системы распознавания образов – определение соответствия между исследуемым объектом и заданным образом, в качестве которого может быть «человек», «символ», «нормальное состояние объекта» и т.п.

Телеизмерительные системы – информация о значениях измеряемых величин передается от объекта контроля, расположенного на значительном расстоянии.

#### *Обобщенная структурная схема ИИС.*

Для описания ИИС, объяснения состава функциональных частей и элементов, их назначения и взаимосвязи в системе применяются структурные схемы. Описание ИИ и входящих в них функциональных элементов может производиться с помощью функциональных схем, разъясняющих протекающие в них процессы.

#### *Классификация средств измерений по метрологическим функциям:*

- образцовые средства измерения;
- рабочие средства измерения;
- эталонные средства измерения.

*Государственный эталон измерения* – комплекс средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и (или) хранение единиц измерения с наибольшей достигнутой в метрологии точностью измерения.

*Проверка средств измерений* – определение метрологической организации погрешностей средств измерений и установление его пригодности к применению.

*Образцовое средство измерения* – мера, измерительный преобразователь, измерительный прибор, служащие для проверки по ним других средств измерений и утвержденные в качестве образцовых.

*Рабочее средство измерения* – средство, применяемое для измерений в широкой практике и не связанные с передачей размера единиц

#### *Характеристики средств измерений.*

Основные метрологические характеристики средств измерений - статические и динамические. Нормирование метрологических характеристик. Способы выражения пределов допускаемых погрешностей. Классы точности средств измерений.

##### *Характеристики измерительных приборов.*

Основными характеристиками измерительных приборов являются:

- уравнение преобразования;
- чувствительность;
- порог чувствительности;
- диапазон измерений;
- область рабочих частот;
- статические и динамические погрешности;
- собственная мощность, потребляемая прибором;
- быстродействие;
- надежность;
- экономичность.

*Уравнение преобразования* – градуировочная характеристика:

$Y = f(X)$  – это функциональная зависимость между входным сигналом  $Y$  и выходным сигналом  $X$ .

*Чувствительность* - характеризует способность прибора реагировать на изменение входного сигнала.

Чувствительность определяется из уравнения преобразования:

$S = Y/X$  – изменение сигнала  $Y$  на выходе прибора к вызвавшему ему изменению  $X$  на входе сигнала.

*Порог чувствительности* – это изменение входного сигнала, вызывающего наименьшее изменение выходного сигнала, который может быть обнаружен наблюдателем с помощью данного прибора без дополнительных устройств.

*Диапазон измерений* – область значений измеряемого сигнала, для которого нормированы измеряемые погрешности. Эта область ограничена пределами измерений наибольшими и наименьшими значениями диапазона измерений.  $D = X_{кз}/X_{п}$ , где  $X_{кз}$  – конечное значение шкалы приборов,  $X_{п}$  – порог чувствительности приборов.

*Показания измерительных приборов* – это значение измеряемой величины, определяемой по отчетному устройству прибора.

*Вариация показаний* – это наибольшая возможная разность между отдельными показаниями прибора, соответствующие одному и тому же действительному значению измеряемой величины при неизменяемых внешних условиях (вариация характеризует устойчивость прибора).

*Область рабочих частот* – это полоса частот, в пределах которой погрешность прибора, вызванная изменением частоты, не превышает допускаемого предела.

По способу выражения различают абсолютную, относительную, основную и дополнительную погрешности измерительных приборов.

*Абсолютная погрешность измерительных приборов* – это разность между показаниями прибора и истинным значением измеряемой величины.

$$\Delta = X_{\text{п}} - X_0 = \text{const}$$

Абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком – поправка.

$$\Delta = - \Delta$$

*Относительная погрешность прибора* – отношение абсолютной погрешности прибора к истинному значению измерительной величины.

$$\delta_{\text{отн.}} = (X_{\text{п}} - X_0) / X_0$$

*Приведенная погрешность прибора* – это отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению.

$$\Delta_{\text{п}} = (X_{\text{п}} - X_0) / X_N$$

Нормирующее значение принимается равным конечному значению шкалы прибора, если нулевая отметка прибора находится на краю или вне шкалы; равным номинальному значению, если прибор предназначен измерить величины, имеющие значение 220В.

*Основная погрешность прибора* – приведенная погрешность при нормальных условиях применения прибора (мощность, влажность, частота, помехи).

*Дополнительная погрешность прибора* – это погрешность, вызываемая действием отдельных влияющих величин, вследствие отклонения их значений от нормального.

*Класс точности прибора.*

Его характеристика определяется пределами допускаемых, основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами, влияющими на точность. Значение класса точности устанавливается в стандартах на отдельные виды средств измерений. Класс точности характеризует свойства приборов в отношении точности, но не являются непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью этих приборов.

*Аддитивная погрешность (погрешность нуля)* – это погрешность независимая от чувствительности прибора и постоянная для всех значений входной величины в пределах диапазона измерений.

*Мультипликативная погрешность* – погрешность, зависящая от чувствительности прибора и измеряемая пропорционально текущему значению входной величины.

*Статические погрешности* – это погрешности, возникающие при постоянной во времени величины.

*Динамические погрешности* – это разность между погрешностью приборов в динамическом режиме и его статической погрешностью. Динамическая погрешность зависит как от свойств прибора, так и от характера изменения измеряемой величины во времени.

*Быстродействие* – это время, затрачиваемое на одно измерение.

*Время установления показаний* – это промежуток времени с момента изменения измеряемой величины до момента установления показаний прибора. Для цифровых приборов быстродействие (Б.) определяется как отношение числа измерений  $n$  к промежутку времени  $t$ , в течение которого эти измерения были приведены:

$$Б = n / t$$

Быстродействие цифровых приборов от 1 до 100000 измерений в секунду.

*Надежность* – в способность прибора сохранять эксплуатационные параметры заданных пределах в течение заданного интервала времени.

Существует государственная система приборов – ГСП, по которой есть специальные критерии надежности:

- вероятность безотказной работы в течение заданного времени ;
- интенсивность отказов;
- среднее время безотказной работы.

*Экономичность* – это простота конструкций в обращении и оправданная экономическая стоимость.

*Структурные схемы средств измерений.*

Средства измерений прямого и уравнивающего преобразования.

*Виды измерительных приборов.*

Приборы, используемые для измерения электрических величин, можно разделить на электроизмерительные и электронные. Электроизмерительные приборы в большинстве случаев являются электромеханическими.

По схеме преобразования различают структурные схемы измерительных приборов прямого и компенсационного преобразования.

Цепь прямого преобразования обеспечивает передачу значения величины  $X$ , к показывающему выходному прибору.

Цепь обратного преобразования обеспечивает изменение величины  $X_u$ .

По способу сравнения измеряемой величины с мерой измерения приборы делятся на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения.

Приборы непосредственной оценки могут быть заранее градуированными в единицу измеряемой величины, и мера участвует в процессе градуировки. Мера присутствует в процессе каждого измерения. Приборы непосредственной оценки выполняются по схеме либо прямого преобразования, либо по схеме смешанного преобразования. Они всегда выполняются по компенсационной схеме.

По способу выдачи измерительной информации измерительные приборы делятся на показывающие и регистрирующие.

Показывающие приборы позволяют осуществить отсчетывание показателей.

Регистрационные приборы осуществляют отсчетывание, а также регистрацию измерительной величины либо в функции времени, либо в функции другой величины.

Аналоговые приборы – это измерительные приборы, показания которых непрерывными функциями измерений измеряемых величин.

Цифровые приборы – это измерительные приборы, в которых непрерывно измеряемая величина автоматически преобразовывается в дискретную и результат измерения выдается в цифровом коде.

По роду измерительные величины ИП делятся на: вольтметры, амперметры, омметры и т.д.

По характеру применения – стационарные или переносные.

По степени защищенности – водо-защищенные, герметичные, пылезащищенные и обычные.

По принципу построения электроизмерительных приборов (ЭИП) можно разделить на 4 группы:

1) Измерительные генераторы – это маломощные источники сигналов различной формы, амплитуды и частоты, предназначенные для калиброванного воздействия на исследуемую настраиваемую аппаратуру, а также для питания измеряемых цепей и использования в качестве меры.

2) Приборы, предназначенные для измерения значения физических величин, параметров и характеристик сигналов.

К этой группе относятся: электронные осциллографы, вольтметры, фазометры, анализаторы спектров и другие.

3) Приборы, предназначенные для измерения характеристик и параметров компонент, входящих в радиоэлектронные цепи: измерители емкостей, конденсаторов, индуктивностей катушек, сопротивлений резисторов, добротности контуров и резонаторов, параметров электронных ламп и т.д.

4) Специальные элементы измерителей: ослабители сигналов (аттенюаторы), фазовраща-

ли и т.д.

### Тема 3. Электромеханические приборы и преобразователи.

#### *Меры электрических величин.*

*Мерой* называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины данного размера, например измерительная катушка сопротивления, конденсатор, гиря.

*Набор мер* представляет собой специально подобранный комплект мер для воспроизведения ряда одноименных величин различного размера (например, магазины сопротивлений, емкостей и т.д.).

В зависимости от степени точности и области применения меры подразделяются на эталоны, образцовые меры и рабочие меры.

*Эталон* – это средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физической величины для передачи ее размера другим средствам измерений.

Эталоны в свою очередь подразделяются на первичные обеспечивающие воспроизведение единицы с наивысшей достижимой в стране точностью и вторичные, значение которых устанавливается по первичному эталону. Вторичные эталоны обычно являются рабочими эталонами и предназначены для поверки образцовых средств измерения.

*Образцовые меры* – это средства измерений, предназначенные для поверки и градуировки рабочих мер и измерительных приборов. Они могут быть также использованы для выполнения точных измерений.

В зависимости от точности образцовые меры подразделяются на три разряда:

- первого разряда – наиболее точные, которые поверяются непосредственно по рабочим эталонам;
- второго разряда – точные, которые проверяются по образцовым мерам первого разряда;
- третьего разряда – точные, которые поверяются по образцовым средствам второго разряда.

*Рабочие меры* – это средства измерений, которые используются для поверки измерительных приборов, а также для выполнения измерений на промышленных предприятиях и в научных организациях.

Для нас наибольший интерес представляют меры единиц электрических величин, к которым можно отнести меры электродвижущей силы (ЭДС), меры электрического сопротивления, меры индуктивности и взаимной индуктивности, меры емкости.

В качестве мер ЭДС применяются нормальные элементы различных классов точности. Это специальные гальванические элементы, ЭДС которых точно известна. Различают элементы с насыщенным и ненасыщенным раствором сернокислого кадмия. Предпочтение отдается элементам с насыщенным раствором кадмия, т.к. у них стабильность ЭДС значительно выше. Она находится в пределах 1,0185 – 1,0187 В и в течение года не должна измениться более, чем на 50 мкВ. Классы точности таких элементов 0,001, 0,002 и 0,005.

У элементов с ненасыщенным раствором кадмия меньше внутреннее сопротивление и они меньше зависят от изменений температуры. Их ЭДС лежит в пределах 1,0186 – 1,0194 В при допустимом изменении в течение года не более, чем на 200 мкВ.. Они имеют класс точности 0,02.

Нормальные элементы нельзя трясти и опрокидывать, они должны быть защищены от сильных источников света и тепла. Температура хранения должна быть постоянна.

Образцовые и рабочие меры электрического сопротивления выполняются в виде катушек сопротивления.

Номинальное сопротивление образцовой катушки должно удовлетворять условию  $R = 10^n$  Ом, где  $n$  – целое число. Минимальное сопротивление катушки равно  $10^{-5}$  Ом, максимальное равно  $10^{10}$  Ом.

Образцовые катушки сопротивления изготавливаются из манганиновой проволоки или ленты. Манганин – это сплав меди (84%), марганца (12%) и никеля (4%). Он обладает малым температурным коэффициентом сопротивления ( $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ), большим удельным сопротивлением (0,45 Мом м) и малой термоэдс при контакте с медью (2 мкВ НА  $1^{\circ}\text{C}$ ). Образцовым катушкам сопротивления присваивается один из следующих классов точности: 0,0005; 0,001; 0,005; 0,01;

0,02; 0,05; 0,1; 0,2. Данные числа определяют наибольшую допустимую относительную погрешность, выраженную в процентах.

Набор различных катушек сопротивлений, смонтированных в одном корпусе, образуют магазин сопротивлений.

Образцовые и рабочие меры индуктивности и взаимной индуктивности представляют собой катушки. Такие катушки должны иметь постоянство индуктивности с течением времени и обладать малым активным сопротивлением. Их индуктивность не должна зависеть от величины тока, протекающего через них, а также от частоты и температуры.

Образцовые катушки индуктивности представляют собой пластмассовый или фарфоровый каркас с наложенной на него обмоткой из медной изолированной проволоки. Использование каркаса из немагнитного материала исключает зависимость индуктивности от тока в катушке. Для уменьшения влияния внешних магнитных полей катушки экранируют. Образцовые катушки индуктивности изготавливают с пятью номинальными значениями: 1; 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001 Г.

Катушки индуктивности и взаимной индуктивности предназначены для работы в цепях переменного тока с частотой до 10 кГц.

В качестве образцовых и рабочих мер переменной индуктивности служат вариометры. Вариометр состоит из двух катушек индуктивности, одна из которых подвижная. Путем изменения взаимного расположения катушек можно плавно изменять значение индуктивности или взаимной индуктивности.

Наборы различных катушек индуктивности, смонтированных в одном корпусе, называются магазином индуктивностей.

Образцовые и рабочие меры емкости представляют собой конденсаторы постоянной или переменной емкости. К ним предъявляются следующие основные требования: минимальная зависимость емкости от времени, температуры и частоты; малые потери в диэлектрике, характеризующиеся тангенсом угла потерь; высокое сопротивление и прочность изоляции.

В наибольшей степени этим требованиям отвечают воздушные конденсаторы. Они выпускаются как постоянной, так и переменной емкости. Но воздушные конденсаторы имеют большие массу и габариты. Из-за этого меры емкости, сформированные с помощью воздушных конденсаторов, имеют значение в пределах от 0,01 до 110 пФ. Для увеличения образцовых значений емкости используют конденсаторы, у которых в качестве диэлектрика используется слюда. Такие конденсаторы позволяют получить большие емкости (до 1 мкФ) при небольших габаритах, но обладают большим тангенсом угла диэлектрических потерь.

Слюдяные конденсаторы выпускаются как в виде отдельных мер, так и в виде магазинов емкостей. Для получения суммарной емкости нескольких конденсаторов их соединяют в магазинах параллельно.

*Измерительные преобразователи электрических величин: шунты, добавочные резисторы, делители напряжения, измерительные усилители, измерительные трансформаторы тока и напряжения.*

*Измерительный преобразователь* – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающийся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительный преобразователь, к которому подводится измеряемая величина, называется *первичным измерительным преобразователем*.

В зависимости от характера преобразуемых величин различают следующие виды измерительных преобразователей:

- преобразователи электрических величин в электрические (делители напряжения, измерительные трансформаторы);
- преобразователи магнитных величин в электрические (измерительные катушки);
- преобразователи неэлектрических величин в электрические (термо- и тензопреобразователи, реостатные, емкостные).

В зависимости от вида входного и выходного сигналов различают измерительные преобразователи:

- *аналоговые преобразователи*, у которых на входе и выходе аналоговые сигналы;
- *аналого-цифровые преобразователи*, имеющие на входе аналоговый сигнал, а на выходе цифровой (кодированный) сигнал;
- *цифро-аналоговые преобразователи*, у которых на входе цифровой, а на выходе – аналоговый сигнал.

Первичные измерительные преобразователи, размещаемые непосредственно на объекте исследования и удаления от места обработки, отображения и регистрации измерительной информации, называют *датчиками*.

#### *Измерение электрических величин.*

**Масштабные преобразователи (МП).** Эти преобразователи относятся к группе измерительных преобразователей электрических величин в электрические и предназначены для изменения значения размера физической величины в заданное число раз без изменения рода величины. К ним относят шунты, делители напряжения, измерительные трансформаторы тока и напряжения.

**Шунты** применяются для уменьшения силы тока в определенное число раз. Шунт представляет собой резистор, включаемый параллельно средству измерения. Если сопротивление шунта

$R_0 = \frac{R}{n-1}$ , где  $R$  – сопротивление средства измерений;  $n = I_1/I_2$  – коэффициент шунтирования, то ток  $I_2$  в  $n$  раз меньше тока  $I_1$ .

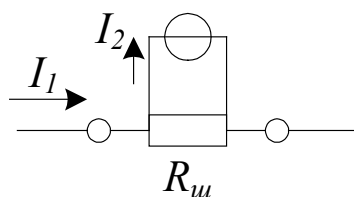


Схема включения измерительного механизма с шунтом

**Делители напряжения** предназначены для уменьшения напряжения в определенное число раз. В зависимости от рода напряжения могут быть выполнены на элементах, имеющих чисто активное сопротивление, емкостное или индуктивное сопротивление.

**Измерительные трансформаторы (ИТ)** используют как преобразователи больших переменных токов и напряжений в относительно малые токи и напряжения, допустимые для измерений приборами с небольшими стандартными пределами измерения (5 или 1 А, 100 В). Применением ИТ в цепях высокого напряжения достигается безопасность для персонала, обслуживающего приборы.

Их делят на трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН). Принцип действия ИТ совпадает с принципом действия трансформаторов. ИТ состоят из двух изолированных друг от друга обмоток: первичной с числом витков  $\omega_1$  и вторичной –  $\omega_2$ , помещенных на ферромагнитный сердечник.

В ТТ  $\omega_1 < \omega_2$ , а в ТН –  $\omega_1 > \omega_2$ . Первичную обмотку ТТ включают в измеряемую цепь последовательно, а ТН – параллельно. Измерительные приборы включают во вторичную обмотку трансформаторов.

Во вторичную цепь ТТ включают амперметры, последовательные обмотки счетчиков, ваттметров, цепи релейной защиты и управления; к вторичной обмотке ТН подключают вольтметры, параллельные цепи ваттметров, счетчиков и других приборов.

По показаниям приборов можно определить значения измеряемых величин. Для этого необходимо показания приборов умножить на коэффициенты  $K_I$  и  $K_U$ . Для ТТ –  $K_I = I_1/I_2$ , а для ТН –  $K_U = U_2/U_1$ . Коэффициенты  $K_I$  и  $K_U$  называют действительными коэффициентами трансформа-

ции. В действительности, значения коэффициентов  $K_I$  и  $K_U$  непостоянны. Они зависят от значений токов и напряжений, характера и значения нагрузки вторичной цепи, частоты тока, а также от конструкции трансформатора и материала сердечника. Поэтому показания приборов умножают не на действительные, а на постоянные номинальные коэффициенты трансформации:

$$K_{Ii} = I_{1i} / I_{2i}, K_{Ui} = U_{2i} / U_{1i}.$$

ТТ работает в режиме, близком к режим короткого замыкания, т.к. в его вторичную обмотку включаются приборы с малым сопротивлением.

ТН работают в режиме, близком к режиму холостого хода, т.к. во вторичную обмотку включают приборы с относительно большим внутренним сопротивлением.

### *Электромеханические приборы.*

Основы теории электромеханических приборов: общие сведения, классификация, обозначения. Принцип действия магнитоэлектрических, электромагнитных электромеханических приборов. Их достоинства и недостатки.

#### *Общие сведения.*

В аналоговых электромеханических измерительных приборах (ЭИП) непосредственной оценки электромагнитная энергия, подведенная к прибору непосредственно из измеряемой цепи, преобразуется в механическую энергию углового перемещения относительно неподвижной.

ЭИП применяют для измерения тока, напряжения, мощности, частоты, фаз сдвигов, сопротивления и других электрических величин на постоянном и переменном токах преимущественно промышленной частоты 50 Гц.

ЭИП относятся к приборам прямого преобразования. Состоят ЭИП из:

- электрического преобразователя (измерительной цепи);
- электромеханического преобразователя (измерительного механизма);
- отчетного устройства.

Измерительная цепь прибора обеспечивает преобразование электрической измеряемой величины  $X$  в некоторую промежуточную величину  $Y$  (ток или напряжение), функционально связанную с измеряемой величиной  $X$ . Величина  $Y$  непосредственно воздействует на измерительный механизм.

В зависимости от характера преобразования измерительная цепь может представлять собой совокупность элементов (резисторов, конденсаторов, выпрямителей, термопар).

Различные измерительные цепи позволяют использовать один и тот же измерительный механизм при измерениях разнородных величин, напряжения, тока, сопротивления, меняющихся в широких пределах. Измерительный механизм, являясь основной частью конструкции прибора, преобразует электромагнитную энергию, необходимую для угла отклонения  $\alpha$  его подвижной части относительно неподвижной.

#### *Уравнение отклонения подвижной части измерительного механизма.*

Угол отклонения  $\alpha = f(Y) = F(X)$ .

В зависимости от способа преобразования электромагнитной энергии в механическое угловое перемещение подвижной части измерительного механизма приборы делятся на магнитоэлектрические, электродинамические, ферродинамические, электромагнитные, электростатические, индукционные.

#### *Отсчетное устройство аналоговых ЭИП.*

Оно состоит из указателя, жестко связанного с подвижной частью измерительного механизма и неподвижной шкалы.

Шкала представляет собой совокупность отметок, которые расположены вдоль какой – либо линии и изображают ряд последовательных чисел, соответствующих значениям измеряемой величины.

#### *По начертанию шкалы бывают:*

- прямолинейные (горизонтальные, вертикальные);

- дуговые (при дуге до 180 градусов включительно);
- круговые (при дуге более 180 градусов).

По характеру расположения отметок различают шкалы равномерные и неравномерные, односторонние относительно нуля, двусторонние и безнулевые.

Числовое значение измеряемой величины равно произведению числа делений, прочитанных по шкале, на цену деления (постоянную) прибора.

*Цена деления* – значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы.

*Узлы и детали измерительных приборов.*

Для большинства ЭИП, несмотря на разнообразие измерительных приборов, можно выделить общие узлы и детали:

- устройство для установки подвижной части измерительного механизма, для создания противодействующего момента, уравнивания и успокоения;
- успокоители;
- арретир;
- корректор.

Так как измерительный механизм ЭИП состоит из подвижной и неподвижной части, то для обеспечения свободного перемещения подвижной части ее устанавливают на опорах, растяжках, подвесе.

*Установка подвижной части измерительного механизма на растяжках* наиболее распространена в измерительных приборах. Наличие растяжек обеспечивает отсутствие трения в опорах, облегчает подвижную систему, повышает виброустойчивость. Растяжки используют для подведения тока к обмотке рамки и создания противодействующего момента.

*Установка подвижной части измерительного механизма на подвесах* используется в слабочувствительных приборах. Подвижную часть измерительного механизма подвешивают на тонкой металлической (иногда кварцевой) нити. Ток в рамку подвижной части подводят через нить подвеса и специальный безмоментный токоподвод из золота или серебра.

*Арретир* – устройство, которое закрепляет эту рамку.

Противодействующий момент в измерительном механизме создается плоскими спиральными пружинами.

Для создания необходимого успокоения измерительный механизм снабжают успокоителями, развивающими момент, направленный навстречу движению (время успокоения не более 4 с). В измерительных механизмах наиболее часто применяют магнитоиндукционные и воздушные успокоители, реже – жидкостные (когда требуется очень большое успокоение).

### **Магнитоэлектрические измерительные приборы.**

Работа магнитоэлектрических измерительных механизмов (ИМ) основана на принципе взаимодействия катушки с током и магнитного потока постоянного магнита. Один из взаимодействующих моментов – катушка (рамка) с током или постоянный магнит. Наиболее распространены ИМ с подвижной рамкой.

Магнитоэлектрические приборы бывают с внешним или внутренним магнитом.

При протекании по обмотке рамки постоянного тока на активные стороны обмотки действует пара сил, создающая вращающий момент.

Вращающий момент ИМ с равномерным радиальным магнитным полем в воздушном зазоре не зависит от угла отклонения  $\alpha$  подвижной части. Под действием момента  $M$  подвижная часть поворачивается вокруг оси, тем самым, закручивая спиральные пружины, создающие противодействующий момент.

Повышение чувствительности ИМ может быть достигнуто за счет увеличения индукции  $B$  в зазоре, числа витков рамки или уменьшения удельного противодействующего момента  $W$  пружин.

При изменении направления тока изменяется направление отклонения подвижной

части ИМ.

Достоинства магнитоэлектрических ИМ:

- 1) высокая чувствительность (ИМ сильным собственным магнитным полем, поэтому даже при малых токах создается достаточный вращающий момент)
- 2) большая точность (из – за высокой стабильности элементов ИМ, незначительного влияния внешних магнитных полей)
- 3) незначительные влияния на режим измеряемой цепи, т.к. мощность потребляемая ИМ мала.
- 4) хорошее успокоение
- 5) равномерность шкалы

Недостатки ИМ:

- 1) сложность изготовления
- 2) плохая перегрузочная способность, обусловленная легким перегревом пружин и изменением их свойств
- 3) температурное влияние на точность измерения

*Магнитоэлектрические ИМ используют:*

- в многопредельных, широкодиапазонных магнитоэлектрических амперметрах , вольтметрах для непосредственных измерений в цепях постоянного тока.

- в гальванометрах, светолучевых осциллографах (при наблюдении и записи мгновенных значений тока, напряжения, мощности и частоты)
- в аналоговых омметрах, электронных вольтметрах, частотомерах, фазометрах.

Электромагнитные измерительные приборы.

В электромагнитных машинах для создания вращающего момента используется действие магнитного катушки с током на подвижный пермаллоевый лепесток. Противодействующий момент создается спиральной пружиной. При прохождении по неподвижной плоской катушке измеряемого тока возникает магнитное поле, которое, воздействуя на лепесток, стремится расположить его так, чтобы энергия магнитного поля была наибольшая, т.е. втянуть лепесток внутрь катушки. Подвижная часть механизма поворачивается до тех пор, пока вращающий момент не станет равным противодействующему моменту.

Шкала прибора квадратична. Т.к. угол  $\alpha$  - функция квадрата тока, знак угла поворота не зависит от направления тока в катушке, поэтому э/м приборы одинаково пригодны для проведения измерений в цепях как переменного, так и постоянного тока.

Прибор реагирует на среднее значение вращающего момента.

Отклонение подвижной части механизма пропорционально среднеквадратичному значению измеряемого тока.

В э/м измерительных приборах применяется воздушное или магнитоиндукционное успокоение.

К достоинствам э/м приборов можно отнести:

- простота и надежность исполнения;
- хорошая перегрузочная способность;
- одинаковая пригодность для измерения в цепях постоянного и переменного тока.

К недостаткам э/м приборов можно отнести:

- большое собственное потребление энергии;
- невысокая точность (при измерениях в цепях постоянного тока сказывается явление гистерезиса в пермаллоевом лепестке;
- малая чувствительность;
- влияние внешних магнитных полей из-за слабого собственного магнитного поля.

Э/м приборы применяют как измерители тока, напряжения преимущественно в цепях изменяемого тока промышленной частоты в качестве считовых приборов классов точности 1, 1.5 и многопредельных лабораторных приборов классов точности 0.5, 1. Использование данных при-

боров в цепях повышенной частоты недопустимо из-за больших дополнительных частотных погрешностей.

### **Электромагнитные амперметры и вольтметры.**

В э/м амперметрах диапазон измерения токов весьма широк. Для стационарных измерений используют однопредельные амперметры, для переносных многопредельные с секционированными катушками. Переключение одинаковых секций катушки с последовательного соединения на параллельное позволяет получать пределы измерения у амперметра в соотношениях 1:2:4. Секции катушки можно выполнять с разным числом витков из проволоки разного диаметра. Применение шунтов для расширения пределов измерения э/м амперметрами нерационально, т.к. приводит к увеличению мощности потребления приборами, их дороговизне и громоздкости.

Измерительная цепь э/м вольтметра представляет собой последовательное соединение подвижной катушки и добавочного резистора. Ток полного отклонения вольтметра равен 25-50 мА. С понижением предела измерения это значение возрастает и достигает 100-200 мА при напряжении 15-30 В. Добавочные резисторы применяют в многопредельных вольтметрах с наибольшим пределом измерения 600В. Пределы измерения э/м вольтметров могут быть расширены с помощью трансформатора напряжения. Расширение пределов измерения э/м амперметров и вольтметров сопряжено с ростом их погрешности.

### **Электродинамические измерительные приборы.**

Электродинамические ИМ работают на принципе взаимодействия магнитных потоков двух катушек, по которым протекают токи. Измерительные механизмы состоят из пары неподвижных катушек, соединенных последовательно или параллельно.

Внутри этих катушек на оси находится бескаркасная рама. Для подвода тока в подвижную катушку и создания противодействующего момента используют спиральные пружины.

При повороте подвижной катушки на угол  $\alpha$  изменяется взаимная индуктивность  $\mu$ , зависящая от формы и взаимного расположения катушек, а индуктивности **L1** и **L2** остаются постоянными.

Под действием вращающего момента подвижная катушка стремится занять такое положение, при котором направление ее магнитного поля совпадало бы с направлением магнитного поля неподвижных катушек. При этом она будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий и противодействующие моменты не сравняются.

Электродинамические ИМ содержат две цепи тока, поэтому являются множительными устройствами и обладают фазочувствительностью. Данная особенность позволяет применять их не только для измерения тока, напряжения, но мощности и фазы.

*Достоинства электродинамических ИМ:*

- высокая точность
- возможность использования в цепях как постоянного, так и переменного тока

*Недостатки электродинамических ИМ:*

- малая чувствительность
- влияние внешних магнитных полей на показания ИМ
- большая потребляемая мощность
- ограниченный диапазон частот (до 1.5 кГц)

Для уменьшения влияния внешних магнитных полей на показания приборов применяют магнитное экранирование ИМ, или астазирование.

При астатическом исполнении имеются два измерительных механизма с общей осью. Собственные магнитные поля ИМ направлены в противоположные стороны. Внешнее равномерное магнитное поле, усиливая поле одного измерительного механизма на какое-то другое значение, на это же значение ослабляет поле другого, но не изменяет их суммарного вращающего момента.

### **Электродинамические амперметры и вольтметры.**

Электродинамические амперметры используют для измерения токов 0.1 – 10 А. Использо-

вание их для измерения токов миллиамперного диапазона ограничивается большой мощностью потребления и малой чувствительностью. Изменение пределов измерения достигается секционированием неподвижных катушек, а также комбинацией последовательно – параллельного соединения секций неподвижных катушек с подвижной катушкой.

В электродинамических вольтметрах неподвижная и подвижная катушки соединяются последовательно с добавочным резистором и по ним проходит один и тот же ток.

Электродинамические вольтметры впускают на несколько пределов напряжения (до 300 В) и используют в основном для точных измерений. Внутреннее сопротивление их мало (до 1 кОм).

Пределы измерения амперметров и вольтметров могут быть расширены с помощью измерительных трансформаторов токов и напряжений.

### **Электростатические измерительные приборы.**

Принцип работы э/с измерительных приборов на взаимодействии заряженных электродов, разделенных диэлектриком.

Конструктивно э/с приборы представляют собой разновидность плоского конденсатора, т.к. в результате перемещения подвижной части изменяется емкость системы. Практическое применение нашли приборы с поверхностным механизмом, т.е. когда изменение емкости осуществляется за счет изменения активной площади электродов. В приборах с линейным механизмом изменение емкости осуществляется за счет изменения расстояния между электродами.

Электростатические силы взаимодействия заряженных электродов создают вращающий момент, под действием которого подвижные электроды втягиваются в пространство между неподвижными и изменяют активную площадь электродов тем самым, меняя емкость  $C$ . Подвижные электроды втягиваются до тех пор, пока вращающий момент не станет равным противодействующему моменту.

Шкала прибора квадратичная, поэтому изменение полярности приложенного напряжения не изменяет направление вращения. При приложенном переменном напряжении прибор реагирует на среднее значение момента за период.

*Достоинства э/с приборов:*

- высокое входное напряжение;
- малая, но переменная входная емкость;
- малая мощность потребления;
- возможность использования в цепях постоянного и переменного тока;
- широкий частотный диапазон;
- независимость показаний от формы кривой измеряемого напряжения.
- показания прибора соответствуют среднеквадратичному значению измеряемого напряжения.

*Недостатки э/с приборов:*

- квадратичная шкала;
- чувствительность из-за слабого собственного электрического поля;
- невысокая точность;
- возможность пробоя между электродами;
- необходимость экрана.

Э/с вольтметры применяют в цепях с маломощными источниками и при лабораторных исследованиях в цепях высокого напряжения. Совместно с электронными усилителями э/с вольтметры используют как высокочувствительные электрометры и вольтметры переменного тока.

### **Ферродинамические измерительные приборы.**

Назначение, схемы включения и принцип действия - те же, что и у ЭД - приборов. Конструктивное различие заключается в том, что с целью усиления электромагнитного поля неподвижной катушки, она снабжена магнитопроводом из листовой наборной электротехнической стали. По аналогии с МЭ - приборами, магнитопровод снабжен наконечниками и - для уменьшения маг-

нитного сопротивления - сердечником, так что для подвижной катушки обеспечивается равномерный воздушный зазор.

За счет указанных мероприятий вращающий момент ФД - приборов существенно увеличен, а вся магнитная система оказывается экранированной от действия внешних магнитных полей, которые могут возникать на энергоемких предприятиях, особенно в местах расположения приборных щитов. Поэтому чаще всего ФД - приборы применяются, как щитовые приборы для вертикального расположения. Из-за сравнительно большого вращающего момента ФД - приборы устойчивы к тряске и вибрациям и успешно применяются на железнодорожных, морских и воздушных транспортных средствах. Стрелка и шкала и иные индикаторы ФД - приборов обычно делаются хорошо видимыми с обычного расстояния от щита 1 - 2,5 м, за которым следит технолог, управляющий производственным процессом.

С другой стороны, наличие магнитопровода значительно увеличивает индуктивность неподвижной катушки, и поэтому частотный диапазон ФД - приборов существенно уже частотного диапазона ЭД - приборов.

Диапазоны измерений действующих значений тока, напряжения и активной мощности те же, что и у ЭД - приборов. Точность ФД - приборов ниже и не бывает лучше, чем 0,5%. Частотный диапазон 0 Гц, 45 , 500 Гц. Собственное сопротивление ФД вольтметров составляет (100 , 2000) Ом. Большое значение вращающего момента дает возможность использовать ФД механизм для построения самопишущих приборов. Для этого на стрелке устанавливается пишущий инструмент (перо, чернильница), и в прибор встраивается лентопотяжный механизм, перемещающий бумажную ленту - диаграмму.

#### **Индукционные измерительные приборы.**

Приборы индукционной системы получили широкое распространение для измерения электрической энергии.

Принцип действия индукционной системы основан на взаимодействии магнитных потоков, создаваемых катушками тока и напряжения с вихревыми токами, наводимыми магнитным полем в алюминиевом диске.

Электрический счетчик содержит магнитопровод сложной конфигурации, на котором размещены две катушки: напряжения и тока. Между полюсами электромагнита помещен алюминиевый диск с осью вращения.

Противодействующий момент создается тормозным магнитом и пропорционален скорости вращения диска.

В установившемся режиме  $M_{вр} = M_{тр}$  диск вращается с постоянной скоростью.

Таким образом, угол поворота диска счетчика пропорционален активной энергии. Следовательно, число оборотов диска  $n$  тоже пропорционально активной энергии.

*Электромеханические приборы с преобразователями. Общие сведения, выпрямительные приборы, термоэлектрические приборы. Устройство, принцип действия, условное обозначение, применение.*

Высокая чувствительность и точность, малое собственное потребление энергии и другие положительные свойства магнитоэлектрических приборов выгодно отличают их от других электромеханических приборов. Задача использования их для измерений в цепях переменного тока решена путем преобразования переменного тока в постоянный с помощью преобразователей. В соответствии с используемым преобразователем, приборы называют выпрямительными, термоэлектрическими, электронными.

#### **Выпрямительные приборы.**

Они представляют собой сочетание выпрямительного преобразователя и магнитоэлектрического ИП. В качестве преобразователей (выпрямителей) используются полупроводниковые выпрямители (диоды) на основе кремния или германия. В зависимости от числа применяемых диодов и схемы их включения осуществляется одно- и двухполупериодное выпрямление (преобразование) переменного тока. В цепи однополупериодного выпрямления (рис. 2.11, а) ток через измеритель (микроамперметр), включенный последовательно с диодом  $VD1$ , протекает только в поло-

жительный полупериод напряжения  $U(t)$ . В отрицательный полупериод ток протекает через диод  $VD2$ . Подвижная часть магнитоэлектрического микроамперметра из-за своей инерционности реагирует на среднее значение момента.

Шкалу прибора градуируют обычно в действующих значениях синусоидального тока  $I_d$ .

Коэффициент формы для синусоиды равен  $K_f = I / I_{cp} = 1,11$ .

В цепи двухполупериодного выпрямления ток через измеритель (микроамперметр) протекает в одном и том же направлении оба полупериода.

*Достоинства:* высокая чувствительность, малое собственное потребление мощности, широкий частотный диапазон —

возможность работы без частотной компенсации на частотах до 2000 Гц, с частотной компенсацией — до 20 кГц.

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

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

**Термоэлектрические приборы.** Эти приборы представляют собой сочетание магнитоэлектрического механизма с отсчетным устройством и термоэлектрического преобразователя. Термоэлектрический преобразователь состоит из одной или нескольких термопар и нагревателя, по которому протекает измеряемый ток. Нагреватель обычно изготавливается из материала с большим удельным сопротивлением (нихром, константан, вольфрам) с допустимой температурой 600... 800 °С. Для термопары подбирают материалы, дающие в паре высокую термо-ЭДС, обладающие устойчивыми термоэлектрическими характеристиками (хромель—копель, медь—копель и др.). Различают контактные термоэлектрические преобразователи, у которых горячий спай термопары 2 приварен к нагревателю 1 (рис. 2.12, а), и бесконтактные термоэлектрические преобразователи (рис. 2.12, б), у которых нагреватель 1 и горячий спай разделены изолятором 3 (капель стекла), что уменьшает чувствительность и увеличивает инерционность преобразователя. Преимуществом бесконтактных преобразователей является изоляция цепи термопары от нагревателя и возможность создания термобатарей.

Под действием теплоты, выделяемой нагревателем, и при разности температур горячего и холодного спаев термопары возникает термо-ЭДС, пропорциональная величине тока, протекающего по нагревателю, и измеряемая магнитоэлектрическим ИМ.

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

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

#### Тема 4. Электронные аналоговые приборы и преобразователи.

Электронные аналоговые приборы и преобразователи представляют собой средства измерений, в которых преобразование сигналов измерительной информации осуществляется с помощью аналоговых электронных устройств. Выходной сигнал таких средств является непрерывной функцией измеряемой величины. Электронные приборы и преобразователи применяют при измерениях практически всех электрических величин: напряжения, тока, частоты, мощности, сопротивления и т.д.

*Достоинства* электронных измерительных приборов:

- 1) высокая чувствительность обусловлена применением усилителей;
- 2) малое потребление энергии из цепи, в которой производят измерение, что определяется высоким входным сопротивлением данных приборов;

- 3) широкий диапазон частот, в котором чувствительность неизменна.

*Недостатки:*

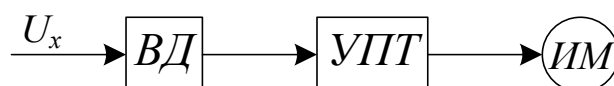
- 1) сложность, обусловленная большим числом деталей и элементов;
- 2) необходимость в источниках питания электронных устройств, входящих в прибор;
- 3) сравнительно невысокая надежность, обусловленная большим числом элементов.

### Электронные вольтметры.

В электронных вольтметрах измеряемое напряжение преобразуется с помощью аналоговых электронных устройств в постоянный ток, который подается на магнитоэлектрический измерительный механизм со шкалой, градуированный в единицах напряжения. Электронные вольтметры обладают высокой чувствительностью и широким диапазоном измеряемых напряжений (от десятков нановольт на постоянном токе до десятков киловольт), большим входным сопротивлением (более 1 Мом), могут работать в широком частотном диапазоне (от постоянного тока до частот порядка сотен МГц).

Существуют множество различных типов вольтметров. По своему назначению и принципу действия наиболее распространенные вольтметры могут быть подразделены на вольтметры постоянного тока, переменного тока, универсальные, импульсные и селективные.

Вольтметры постоянного тока. Упрощенная структурная схема таких вольтметров показана на структурной схеме, где *ВД* – входной делитель напряжения; *УПТ* – усилитель постоянного тока; *ИМ* – магнитоэлектрический измерительный механизм;  $U_x$  – измеряемое напряжение.



Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока.

Последовательное соединение делителя напряжения и усилителя позволяет делать вольтметры высокочувствительными и многопредельными за счет изменения в широких пределах их общего коэффициента преобразования. Повышение чувствительности вольтметров постоянного тока путем увеличения коэффициента усиления  $УПТ k_{УПТ}$  наталкивается на технические трудности из-за нестабильности работы *УПТ*, характеризующейся изменением  $k_{УПТ}$  и самопроизвольным изменением выходного сигнала усилителя (дрейф "нуля"). Поэтому в таких вольтметрах  $k_{УПТ} \approx 1$ , а основное назначение *УПТ* – обеспечить большое входное сопротивление вольтметра.

Данная структурная схема вольтметра постоянного тока используется в составе универсальных вольтметров, поскольку при незначительном усложнении – добавлении преобразователя переменного напряжения в постоянное, появляется возможность измерения и переменного напряжения.

Вольтметры переменного тока. Такие вольтметры состоят из преобразователя переменного напряжения в постоянное, усилителя и магнитоэлектрического измерительного механизма. Возможны две обобщенные структурные схемы вольтметров переменного тока, различающиеся своими характеристиками. В вольтметрах по схеме *а* измеряемое напряжение  $u_x$ , сначала преобразуется в постоянное напряжение, которое затем подается на *УПТ* и *ИМ*, являющиеся, по существу, вольтметром постоянного тока. Преобразователь *Пр* представляет собой нелинейное звено, поэтому вольтметры с такой структурой могут работать в широком частотном диапазоне. В то же время указанные недостатки *УПТ* и особенности работы нелинейных элементов при малых напряжениях не позволяют делать такие вольтметры высокочувствительными.



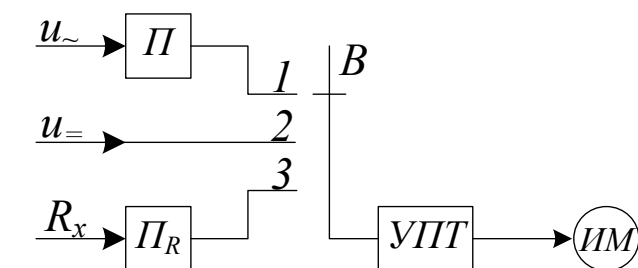
Структурные схемы вольтметров переменного тока

В вольтметрах, выполненных по схеме *б*, благодаря предварительному усилению удастся повысить чувствительность. Однако создание усилителей переменного тока с большим коэффициентом усиления, работающих в широком диапазоне частот, – трудная техническая задача. Поэтому такие вольтметры имеют относительно низкий частотный диапазон (1 – 10 МГц).

Различают вольтметры амплитудного, среднего или действующего значения.

*Вольтметры амплитудного значения* имеют преобразователи амплитудных значений (пиковые детекторы) с открытым входом, где  $u_{вх}$  и  $u_{вых}$  – входное и выходное напряжение преобразователя. В амплитудных преобразователях с открытым входом конденсатор заряжается практически до максимального  $u_{хmax}$  положительного (при данном включении диода) значения входного напряжения. Пульсации напряжения  $u_{вых}$  на конденсаторе объясняются его подзарядом при открытом диоде, когда  $u_{вх} > u_{вых}$ , и его разрядом через резистор  $R$  при закрытом диоде, когда  $u_{вх} < u_{вых}$ .

*Универсальные вольтметры.* Такие вольтметры предназначены для измерения напряжений постоянного и переменного токов. На обобщенной структурной схеме:  $B$  – переключатель. В зависимости от положения переключателя  $B$  вольтметр работает по схеме вольтметра переменного тока с преобразователем  $\Pi$  (положение 1) или вольтметра постоянного тока (положение 2).



Структурная схема универсального вольтметра

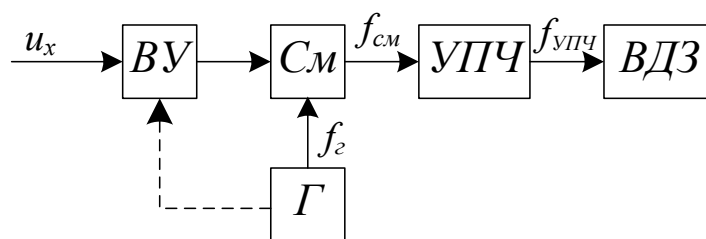
В универсальных вольтметрах, называемых также комбинированными, часто предусматривается возможность измерения сопротивлений  $R_x$ . В таких вольтметрах имеется преобразователь  $\Pi_R$ , выходное напряжение которого зависит от неизвестного сопротивления:  $U_{вых} = f(R_x)$ . На основании этой зависимости шкала прибора градуируется в единицах сопротивления. При измерении резистор с неизвестным сопротивлением подключается к входным зажимам преобразователя, а переключатель ставится в положение 3.

*Импульсные вольтметры.* Для измерения амплитуды импульсных сигналов различной формы применяют импульсные вольтметры. Особенности работы импульсных вольтметров определяются малой длительностью  $\tau$  измеряемых импульсов (от 10-100 нс) и значительной скважностью  $S = \frac{T}{\tau}$  (до  $10^9$ ), где  $T$  – период следования импульсов.

*Селективные вольтметры.* Такие вольтметры предназначены для измерения действующего значения напряжения в некоторой полосе частот или действующего значения отдельных гармонических составляющих измеряемого сигнала.

Принцип действия селективного вольтметра заключается в выделении отдельных гармонических составляющих сигнала или сигнала узкой полосы частот с помощью перестраиваемого полосового фильтра и измерении действующего значения выделенных сигналов.

Физически реализуемый полосовой фильтр не обладает строго прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). Это может привести к тому, что через такой фильтр пройдут соседние гармонические составляющие с некоторым коэффициентом передачи. В этом случае селективный вольтметр измеряет действующее значение суммы гармонических составляющих, прошедших через фильтр, с учетом реальных коэффициентов передачи для каждой составляющей.



Структурная схема селективного вольтметра

Измеряемый сигнал  $u_x$  через избирательный входной усилитель ВУ подается на смеситель См, предназначенный для преобразования частотного спектра измеряемого сигнала. На выходе смесителя появляется сигнал, пропорциональный измеряемому сигналу. Г - синусоидальный генератор (гетеродина). УПЧ - усилитель промежуточной частоты УПЧ. Вольтметр действующего значения - ВДЗ.

Функцию полосового фильтра в этой схеме выполняет УПЧ. Благодаря фиксированному (неперестраиваемому) значению частоты настройки УПЧ этот усилитель имеет большой коэффициент усиления и узкую полосу пропускания, что обеспечивает высокую чувствительность и избирательность селективного вольтметра.

#### Приборы и преобразователи для измерений частоты.

В электронных аналоговых частотомерах применяются в основном два способа измерения частоты. Первый, используемый в области звуковых частот, основан на формировании импульсов, имеющих постоянную площадь, ограниченную кривой импульса тока и осью времени на диаграмме. Частота этих импульсов должна быть равна частоте измеряемого сигнала.

Известны схемы измерительных преобразователей частоты в напряжение (ПЧН), реализующие этот способ. В упрощенную схему преобразователя с использованием перезаряда конденсатора входят: ФИ – формирователь импульсов постоянной длительности  $\Delta t$  с частотой  $f_x$  входного сигнала  $u$ ; ИСН – источник стабильного напряжения  $U_0$ ; В – переключатель; С – конденсатор; R – нагрузка, в качестве которой может быть использован магнитоэлектрический измерительный механизм.

Выходные импульсы формирователя управляют работой переключателя В, поочередно подключая его к ИСН и к нагрузке R. Если постоянные времени цепей заряда и разряда подобраны так, что он практически полностью успевает зарядиться от ИСН и разрядиться на R, то среднее значение выходного напряжения будет  $U_{cp} = R \cdot U_0 \cdot C \cdot f_x$ , где  $U_0 \cdot C = q$  - заряд конденсатора, отдаваемый в нагрузку при каждом импульсе.

В основе второго, резонансного, способа измерения лежит сравнение частоты колебаний исследуемого источника с собственной частотой колебаний резонансного контура. Источник напряжения  $u$  неизвестной частоты  $f_x$  может быть непосредственно подключен в колебательный контур или связан с ним через элемент связи М. Источник напряжения измеряемой частоты является источником ЭДС в контуре. Изменяя емкость конденсатора С, можно по показаниям индикатора резонанса ИР настроить контур в резонанс. При известной индуктивности L контура шкала конденсатора С градуируется в единицах частоты. Резонансные частотомеры используют для измерений в области высоких частот.

#### Электронные осциллографы.

Электронные осциллографы предназначены для визуального наблюдения, измерения и регистрации электрических сигналов. Возможность наблюдения изменяющихся во времени сигналов делает осциллографы чрезвычайно удобными при определении различных амплитудных и временных параметров наблюдаемых сигналов. Важными достоинствами осциллографов являются широкий частотный диапазон, высокая чувствительность и большое входное сопротивление. Все это обусловило их широкое практическое применение.

Осциллографы могут быть предназначены для наблюдения и измерения непрерывных или импульсных процессов; большое распространение получили универсальные осциллографы для периодических и непериодических сигналов непрерывного и импульсного характера в широком (до 100 МГц) диапазоне частот. По количеству одновременно исследуемых сигналов осциллографы могут быть одноканальными и многоканальными (в основном двухканальные). В последнее время широкое распространение получили цифровые электронные осциллографы.

### **Тема 5. Мосты и компенсаторы (потенциометры).**

Рассмотренные ранее приборы электромеханической группы являются приборами непосредственной оценки измеряемого параметра и все (в большей или меньшей степени) потребляют мощность из измерительной цепи, что может приводить к нарушению работы исследуемого объекта. Измерение тока и напряжения аналоговыми электромеханическими приборами возможно в лучшем случае с погрешностью 0,1 % (класс точности прибора 0,1). Более точные измерения можно выполнить методом сравнения с мерой. Средства измерений, использующие метод сравнения, называются компенсаторами или потенциометрами.

**Компенсаторы** — приборы, в которых измерение производится методом сравнения измеряемой величины с эталонной. Принцип действия компенсатора основан на уравнивании (компенсации) измеряемого напряжения известным падением напряжения на образцовом резисторе. Момент полной компенсации фиксируется индикаторным прибором (нуль-индикатором). Разработаны компенсаторы переменного и постоянного тока. Компенсационный метод применяется также в цифровых измерительных приборах.

Источник, постоянного напряжения  $E_0$  обеспечивает протекание рабочего тока  $I_p$  по цепи, состоящей из последовательно включенных измерительного  $R_{и}$ , установочного (образцового)  $R_y$  и регулировочного  $R_{рег}$  резисторов.

Установочный резистор  $R_y$ , представляет собой катушку сопротивлений специальной конструкции с точно известным и стабильным сопротивлением. В схеме элемент НИ — нуль-индикатор, реагирующий на очень маленькие постоянные токи. С помощью переключателя нуль-индикатор вначале включается в цепь установочного сопротивления  $R_y$  (положение переключателя 1). При этом регулировочным сопротивлением  $R_{рег}$  добиваются отсутствия тока в цепи НИ.

Затем нуль-индикатор включается в измерительную цепь (положение переключателя 2) и изменением измерительного сопротивления  $R_{и}$  добиваются нулевого тока.

Итак, измеряемое напряжение определяется с достаточно высокой точностью и без нарушения работы измерительной цепи, так как в момент измерения ток через индикатор не протекает.

При измерениях напряжений на производстве применение находят автоматические компенсаторы, в которых поддерживается разностное значение с помощью следящей системы.

**Мосты** широко используют для измерения сопротивления, индуктивности, емкости, добротности и угла потерь. На основе мостовых схем выпускают приборы для измерения неэлектрических величин (температуры, перемещений и др.) и различные устройства автоматики. Широкое применение мостов объясняется возможностью получения высокой точности результатов измерений, высокой чувствительности и возможностью измерения различных величин.

В зависимости от характера сопротивлений плеч, образующих мост, и рода тока, питающего мост, выделяют мосты:

- постоянного тока;
- переменного тока.

В зависимости от вида схемы (числа плеч) мосты постоянного тока бывают:

- четырехплечие (одинарные);
- шестиплечие (двойные).

Мосты выпускаются с ручным и автоматическим уравниванием.

Мост постоянного тока содержит четыре резистора, соединенных в кольцевой замкнутый контур. Резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  этого контура называются *плечами* моста, а точки соединения соседних плеч — *вершинами* моста. Цепи, соединяющие противоположные вершины, называют *диа-*

гоналями. Одна из диагоналей (3-4) содержит источник питания  $GB$ , а другая (1-2) — указатель равновесия  $PG$ .

Мост называется *уравновешенным*, если разность потенциалов между точками 1 и 2 равна нулю, т.е. напряжение на диагонали, содержащей индикатор нуля, отсутствует и ток через индикатор равен нулю.

Для того чтобы мост был уравновешен, произведения сопротивлений противолежащих плеч должны быть равны. Если сопротивление одного из плеч неизвестно (например,  $R_1 = R_x$ ), то условие равновесия будет иметь вид:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}$$

Таким образом, измерение при помощи одинарного моста можно рассматривать как сравнение неизвестного сопротивления  $R_x$  с образцовым сопротивлением  $R_2$  при сохранении неизменным отношения  $R_3/R_4$ . По этой причине плечо  $R_2$  называют *плечом сравнения*, плечи  $R_3$  и  $R_4$  — *плечами отношения*.

Применение мостов постоянного тока для определения места повреждения электрического кабеля.

При повреждении кабельной линии определяют предварительно зону повреждения, а затем уточняют и выявляют место повреждения. Применяя в зависимости от характера повреждения: индукционный (определяется зона однофазного или многофазного замыкания, зона обрыва любого количества фазных жил); акустический (позволяет определить место однофазных и многофазных замыканий в кабеле при заплывающем пробое); петлевой (применяется для определения зоны однофазных и двухфазных замыканий на землю); емкостный (позволяет определить зону обрыва фазных жил кабеля); импульсный (определяется зона однофазного или многофазного замыкания, зона обрыва любого количества фазных жил); метод колебательного разряда (применяется при заплывающих пробоях кабелей).

Мосты переменного тока. Измерение параметров конденсаторов и катушек индуктивности.

Мосты переменного тока предназначены для измерения емкости и угла потерь конденсаторов, индуктивности и добротности катушек, взаимной индуктивности. Схемы мостов могут иметь различные варианты включения в плечи измеряемых и образцовых резисторов, катушек индуктивностей и конденсаторов.

Для уравновешивания моста две его составляющие должны быть регулируемы, чтобы обеспечить уравновешивание как по модулю, так и по фазе. Неизвестная катушка имеет собственную индуктивность  $L_x$ , взаимную индуктивность  $M_x$  и сопротивление  $R_x$ . Далее представлены схемы мостов для измерения индуктивности методом сравнения с известной индуктивностью либо известной емкостью.

## **Тема 6. Цифровые приборы и преобразователи.**

Цифровые измерительные приборы (ЦИП) имеют следующие достоинства: высокая точность, в том числе и в тяжёлых эксплуатационных условиях; возможность запоминать, передавать на расстояния и вводить в ЭВМ измеренные значения; удобство обслуживания и проведения измерений. Обобщённая структурная схема ЦИП включает в себя: входное устройство, усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок СИ, блок ПК, блок УИ.

Входное устройство (ВУ) содержит ряд добавочных резисторов и шунтов для расширения пределов измерения по напряжению и току. Для измерения переменных напряжений и токов применяются преобразователи-детекторы. Усилитель (У) предназначен для нормирования выходного сигнала ВУ. Его максимальное выходное напряжение составляет один вольт независимо от установленного предела измерения, что обеспечивает работоспособность последующих устройств. Его выполняют на базе операционного усилителя в интегральном исполнении, что обеспечивает высокую чувствительность и большое входное сопротивление порядка 1 - 10 Мом.

Самым важным звеном ЦИП является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В соответствии с классификационными признаками принято делить АЦП на три группы: последовательного счета, считывания и поразрядного кодирования.

В АЦП последовательного счёта входная аналоговая величина преобразуется в число квантов, сумма которых определяет цифровой эквивалент.

Наиболее простым является АЦП с время-импульсным преобразованием (ВИП). В АЦП ВИП выходное напряжение усилителя преобразуется в пропорциональный интервал времени, который измеряется электронно-счётным методом. Например, преобразование в интервал времени производится при помощи специального генератора линейно изменяющегося напряжения ГЛИН и устройства сравнения УС – компаратора. Взаимодействие этих элементов узла, как и всего прибора в целом, осуществляет и контролирует устройство управления УУ. ГЛИН вырабатывает и выдает в УС линейное компенсационное напряжение  $U_k$ . Используется только передний фронт импульса пилообразной формы. На второй вход УС подаётся нормированное измеряемое напряжение  $U_{нх}$ . Измерение начинается с подачи УУ импульса запуска ИЗ в момент времени  $t_1$ . Компенсационное напряжение, изменяясь линейно, в какой-то момент времени станет равным измеряемому напряжению. УС сработает как только напряжение  $U_k$  станет чуть больше напряжения  $U_{нх}$  и выдаст в схему импульс остановки ИО преобразования в момент времени  $t_2$ . Измерение полученного интервала времени производится во втором узле прибора, в котором задействованы электронные элементы: триггер  $T_T$ , электронный ключ ЭК и генератор импульсов ГИ. Триггер – электронное устройство, которое может находиться в двух устойчивых состояниях. При появлении на входе  $S$  триггера импульса запуска от УУ на его выходе формируется потенциальный импульс. При появлении на входе  $R$  триггера импульса остановки ИО от УС действие потенциального импульса на его выходе прекращается. Триггер формирует на своем выходе стробирующий импульс длительностью  $T_s$ . Генератор импульсов ГИ – образцовый кварцованный генератор, вырабатывающий прямоугольные импульсы частотой 1 МГц. Эти импульсы с периодом  $T_T = 1 \text{ мкс}$  поступают на один из входов электронного ключа ЭК постоянно сразу же, как только включили прибор. Эти импульсы изображаются в виде вертикальных чёрточек. На второй вход ЭК подаётся сигнал – стробирующий импульс. ЭК-логическая схема совпадения. Сигнал на выходе будет только в том случае, когда имеются сигналы на обоих входах. Подсчёт числа импульсов и преобразование их в цифровой эквивалент производится счётчиком импульсов СИ, преобразователем кодов ПК и устройством индикации УИ. СИ подсчитывает число импульсов и преобразует их в двоичное число. ПК преобразует двоичный код, например, в семисегментный для управления жидкокристаллическим цифровым индикатором УП.

В настоящее время наиболее распространён АЦП следящего типа. Принцип работы заключается в следующем. Импульсом запуска  $U_3$  счётчик импульсов СИ устанавливается в нулевое состояние и подключается измеряемое напряжение  $U_{нх}$  к устройству сравнения УС. На выходе УС начинает действовать напряжение  $U_{ус}$ , которое подаётся на один из входов электронного ключа ЭК. На второй его вход подаются тактовые импульсы с частотой 1 МГц от генератора импульсов ГИ. ЭК как элемент совпадения пропускает эти импульсы на вход счётчика СИ. СИ начинает считать импульсы и выдаёт на выходе кодовые двоичные комбинации. При 8-ми разрядном счётчике это последовательность кодовых чисел: 00000001; 00000010; 00000011, ..., 11111111. Эти кодовые числа поступают на вход 8-ми разрядного цифроаналогового преобразователя ЦАП. ЦАП преобразует кодовые комбинации в дискретные значения компенсационного напряжения  $U_k$ . Когда наступит момент, что  $U_{нх} - U_k = 0$ , сработает УС,  $U_{ус} = 0$  и ЭК будет закрыт для прохождения тактовых импульсов. Кодовая комбинация передаётся из счётчика на преобразователь кодов и устройство индикации. Для работы ЦАП используется источник образцового напряжения ИОН, который подаёт в схему опорное напряжение  $U_{оп}$ .

Основной характеристикой ЦАП является разрешающая способность, определяемая числом разрядов  $n$ . Теоретически ЦАП, преобразующий  $n$  – порядные коды, должен обеспечить  $2^n$  различных значений выходного сигнала с разрешающей способностью  $(2^n - 1)^{-1}$ . Абсолютное значение минимального компенсационного напряжения  $q_{ик}$  (кванта напряжения) определяется как предельным принимаемым числом  $2^n - 1$ , так и максимальным выходным напряжением ЦАП  $U_{вых}$ . Так

при 8-ми разрядах число независимых квантов (ступенек)  $U_k$  составляет  $2^8 - 1 = 255 = 100 / 255 = 0,4\%$ . Выбранное с помощью опорного источника напряжение шкалы, например, 1 В, даёт абсолютную разрешающую способность в  $1/255 = 3,9$  мВ или относительную 0,4 %.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Задачей практических занятий является закрепление знаний, полученных на лекциях, выработка практических навыков применения информации, необходимой бакалавру в процессе его деятельности. При решении задач обращается внимание на логику решения, на правильность используемых методов. После этого проводится анализ полученного решения, результат сопоставляется с реальными объектами, что вырабатывает у студентов инженерную интуицию.

К выполнению заданий следует приступать после прочтения теоретического материала, изложенного на лекциях и в рекомендуемой литературе. При возникновении затруднений с выполнением заданий необходимо проконсультироваться у преподавателя. Далее по каждой теме приводится по одному примеру или одной задаче для демонстрации разделов дисциплины «Информационно-измерительная техника».

### **Тема 1. Введение. Основные характеристики электроизмерительных приборов. Расчёт погрешностей прямых и косвенных измерений. Обработка результатов измерений.**

Результат измерения электрической (как и любой физической) величины должен содержать информацию о точности полученного значения. Для этого используются те или иные характеристики погрешности измерения.

Расчет характеристик погрешности измерения, иначе называемый оцениванием погрешности, выполняется на основе имеющихся сведений об объекте измерения и используемых средствах измерения.

В зависимости от характера проявления преобладающих составляющих погрешности измерения, систематического или случайного, используют измерения соответственно с однократными или многократными наблюдениями. Выбранная методика измерений определяет и способ оценивания погрешностей.

Задача 1. Часто при вычислении относительной погрешности  $\delta$  пользуются приближенной формулой, при этом в знаменатель вместо истинного или действительного значения измеряемой величины подставляют измеренное значение. Полученное в результате такого расчета значение относительной погрешности  $\delta'$  отличается от  $\delta$  на «погрешность погрешности»  $\delta_{\text{погр}}$ . Выразите  $\delta_{\text{погр}}$  через  $\delta$ .

Задача 2. При измерении величины  $x$  возникает систематическая погрешность, относительное значение которой  $\delta$  остается постоянным во всем диапазоне измерений. Полагая, что значение  $\delta$  известно, выведите формулу для расчета скорректированного (свободного от указанной погрешности) значения измеряемой величины  $x'$ .

Задача 3. Измеренное значение сопротивления  $R = 100,0$  Ом. Предел допускаемой относительной погрешности измерения  $\delta_n = 1,0$  %. Найдите интервал, в котором должно находиться  $R_n$  — истинное значение сопротивления.

### **Тема 2. Измерения. Средства измерения.**

Задача. Резистор, сопротивление которого требуется измерить, соединен последовательно с мерой сопротивления. Номинальное значение меры —  $R_0 = 1$  кОм. Образовавшаяся цепь подключена к источнику стабильного тока  $I$ . Вольтметром, входное сопротивление которого  $R_V = 100$  кОм, поочередно измеряют падения напряжения на обоих резисторах. Полученные значения — соответственно для измеряемого сопротивления и сопротивления меры,  $U = 3,5$  В и  $U_0 = 0,5$  В. Искомое значение вычисляют по формуле  $R = R_0 U / U_0$ , в которой не учитывается конечное значение  $R_V$ , из-за чего возникает методическая погрешность  $\delta_m$ . Рассчитайте значение  $\delta_m$ .

### **Тема 3. Электромеханические приборы и преобразователи.**

Задача 1. Определить сопротивление шунта к амперметру с внутренним сопротивлением  $0,016 \text{ Ом}$ , если показания прибора нужно увеличить в пять раз.

Задача 2. Вольтметром на  $15 \text{ В}$  нужно измерить напряжение  $120 \text{ В}$ . Определить величину добавочного сопротивления, если внутреннее сопротивление вольтметра  $2000 \text{ Ом}$ .

Задача 3. Амперметр, включенный через трансформатор тока  $150/5 \text{ А}$ , показал  $4 \text{ А}$ . Определить ток в первичной цепи.

### **Тема 4. Электронные аналоговые приборы и преобразователи.**

Задача. Верхняя граница рабочей полосы частот электронно-лучевого осциллографа определяется спадом его амплитудно-частотной характеристики (т.е. уменьшением чувствительности канала вертикального отклонения  $S_y$  при увеличении частоты входного напряжения относительно значения чувствительности на постоянном токе  $S_{y,0}$ ) на  $3 \text{ дБ}$ . Выразите соответствующее изменение чувствительности  $\delta S_y$  в процентах.

### **Тема 5. Мосты и компенсаторы.**

Задача. Какой поддиапазон измерений моста —  $(0 \dots 100) \text{ Ом}$ ,  $(0 \dots 1000) \text{ Ом}$ ,  $(0 \dots 10000) \text{ Ом}$ , следует выбрать для наиболее точного измерения сопротивления  $R$ , значение которого близко к  $50 \text{ Ом}$ , если предел допускаемой инструментальной составляющей относительной погрешности измерений  $\delta_{\text{ин}} = [1,0 + (2,0 / R)] \%$ , длина шкалы (число делений)  $a_k = 1000$ , а показания при отсчете округляются до целого числа делений?

### **Тема 6. Цифровые приборы и преобразователи.**

Задача. Предел допускаемой относительной погрешности цифрового частотомера, работающего в режиме измерения периода, определяется как  $\delta_n = 2 \cdot 10^{-5} + 10^{-7}/(nT)$ , где  $T$  — измеренное значение периода в секундах,  $n$  — значение коэффициента умножения периода, которое выбирается из ряда:  $(1; 10; 100; 1000; 10000)$ .

Требуется измерить период, приблизительно равный  $1 \text{ мс}$ , с абсолютной погрешностью, не превышающей по модулю  $0,10 \text{ мкс}$ . Определите минимально необходимое для этого значение  $n$ .

## **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ.**

Тема 1. Основные характеристики электроизмерительных приборов.

Тема 2. Измерения, средства измерения.

Тема 3. Электромеханические приборы и преобразователи.

Тема 4. Электронные аналоговые приборы и преобразователи.

Тема 5. Мосты и компенсаторы.

Тема 6. Цифровые приборы и преобразователи.

Лабораторные работы проводятся с использованием типового комплекта учебного оборудования «Электрические измерения и основы метрологии». Данное оборудование обеспечено методическими рекомендациями к выполнению работ, в которых подробно изложены: цель лабораторных работ, применяемое оборудование, краткие теоретические сведения, правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ, порядок проведения работы, обработка и анализ эксперимента, план составления отчета и контрольные вопросы.

## **4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

Самостоятельная работа представляет собой особую, высшую степень учебной деятельности. Она обусловлена индивидуальными психологическими различиями обучающегося и лично-

стными особенностями и требует высокого уровня самосознания, рефлексивности. Самостоятельная работа может осуществляться как во внеаудиторное время (дома, в лаборатории), так и на аудиторных занятиях в письменной или устной форме.

Самостоятельная работа обучающихся является составной частью учебной работы и имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, поиск и приобретение новых знаний, в том числе с использованием автоматизированных обучающих систем, а также выполнение учебных заданий, подготовку к предстоящим занятиям, зачетам и экзаменам. Организуется, обеспечивается и контролируется данный вид деятельности студентов соответствующими кафедрами.

Самостоятельная работа предназначена не только для овладения каждой дисциплиной, но и для формирования навыков самостоятельной работы вообще, в учебной, научной, профессиональной деятельности, способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решить проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т. д. Значимость самостоятельной работы выходит далеко за рамки отдельного предмета, в связи с чем выпускающие кафедры должны разрабатывать стратегию формирования системы умений и навыков самостоятельной работы. При этом следует исходить из уровня самостоятельности абитуриентов и требований к уровню самостоятельности выпускников, с тем, чтобы за весь период обучения достаточный уровень был достигнут.

При проведении самостоятельной работы, связанной с проработкой теоретического материала, студентам предлагается законспектировать рассматриваемый вопрос, в случае необходимости задать возникшие вопросы на практическом занятии или на консультации.

При изучении дисциплины «Информационно-измерительная техника» практикуются следующие виды и формы самостоятельной работы студентов:

- выполнение практических работ
- подготовка к устному опросу
- подготовка к тестированию
- подготовка к письменной контрольной работе, тестированию, контрольной точке.

Самостоятельная работа тесно связана с контролем (контроль также рассматривается как завершающий этап выполнения самостоятельной работы), при выборе вида и формы самостоятельной работы следует учитывать форму контроля.

Формы контроля при изучении дисциплины «Информационно-измерительная техника»:

- устный опрос;
- контрольная работа;
- контрольная точка;
- письменная работа;
- тестирование.

Самостоятельная работа проводится в виде подготовительных упражнений для усвоения нового, упражнений при изучении нового материала, упражнений в процессе закрепления и повторения, упражнений проверочных и контрольных работ, а также для самоконтроля.

Для организации самостоятельной работы необходимы следующие условия:

- готовность студентов к самостоятельному труду;
- наличие и доступность необходимого учебно-методического и справочного материала;
- консультационная помощь.

Самостоятельная работа может проходить в лекционном кабинете, лаборатории, компьютерном зале, библиотеке, дома. Самостоятельная работа тренирует волю, воспитывает работоспособность, внимание, дисциплину и т.д.

### **Рекомендации по организации аудиторной самостоятельной работы**

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Основными видами аудиторной самостоятельной работы являются:

- выполнение практических работ по инструкциям; работа с литературой и другими источниками информации, в том числе электронными;
- само- и взаимопроверка выполненных заданий;

Выполнение практических работ осуществляется на практических занятиях в соответствии с графиком учебного процесса. Работа с литературой, другими источниками информации, в т.ч. электронными может реализовываться на лекционных и практических занятиях. Данные источники информации могут быть представлены на бумажном и/или электронном носителях, в том числе, в сети Internet. Преподаватель формулирует цель работы с данным источником информации, определяет время на проработку документа и форму отчетности.

Само- и взаимопроверка выполненных заданий чаще используется на лекционном, практическом занятии и имеет своей целью приобретение таких навыков как наблюдение, анализ ответов сокурсников, сверка собственных результатов с эталонами.

### **Рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы**

Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

При предъявлении видов заданий на внеаудиторную самостоятельную работу рекомендуется использовать дифференцированный подход к уровню подготовленности обучающегося. Перед выполнением внеаудиторной самостоятельной работы преподаватель проводит консультацию с определением цели задания, его содержания, сроков выполнения, ориентировочного объема работы, основных требований к результатам работы, критериев оценки, форм контроля и перечня литературы. В процессе консультации преподаватель предупреждает о возможных типичных ошибках, встречающихся при выполнении задания.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня подготовленности обучающихся.

Видами заданий для внеаудиторной самостоятельной работы могут быть:

- для овладения знаниями: чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы); составление плана текста; графическое изображение структуры текста; конспектирование текста; выписки из текста; работа со словарями и справочниками; учебно-исследовательская работа; использование аудио- и видеозаписей, компьютерной техники и Интернет-ресурсов и др.;
- для закрепления и систематизации знаний: работа с конспектом лекции (обработка текста); повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио- и видеозаписей); составление плана и тезисов ответа; составление таблиц, глоссария для систематизации учебного материала; изучение словарей, справочников; ответы на контрольные вопросы; аналитическая обработка текста (аннотирование, рецензирование, реферирование, контент-анализ и др.); подготовка сообщений к выступлению на семинаре, конференции; подготовка рефератов, докладов; составление библиографии, заданий в тестовой форме и др.;
- для формирования умений: решение задач и упражнений по образцу; решение вариативных задач и упражнений; составление схем; проектирование и моделирование разных видов и компонентов профессиональной деятельности и др.

Для обеспечения внеаудиторной самостоятельной работы по дисциплине преподавателем разрабатывается перечень заданий для самостоятельной работы, который необходим для эффективного управления данным видом учебной деятельности обучающихся.

Преподаватель осуществляет управление самостоятельной работой, регулирует ее объем на одно учебное занятие и осуществляет контроль выполнения всеми обучающимися группы. Для удобства преподаватель может вести ведомость учета выполнения самостоятельной работы, что позволяет отслеживать выполнение минимума заданий, необходимых для допуска к итоговой аттестации по дисциплине.

В процессе самостоятельной работы студент приобретает навыки самоорганизации, самоконтроля, самоуправления и становится активным самостоятельным субъектом учебной деятельности.

Обучающийся самостоятельно определяет режим своей внеаудиторной работы и меру труда, затрачиваемого на овладение знаниями и умениями по каждой дисциплине, выполняет внеаудиторную работу по индивидуальному плану, в зависимости от собственной подготовки, бюджета времени и других условий.

Ежедневно обучающийся должен уделять выполнению внеаудиторной самостоятельной работы в среднем не менее 3 часов.

При выполнении внеаудиторной самостоятельной работы обучающийся имеет право обращаться к преподавателю за консультацией с целью уточнения задания, формы контроля выполненного задания.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов может проводиться в письменной, устной или смешанной форме с представлением продукта деятельности обучающегося. В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы могут быть использованы зачеты, тестирование, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и др.

### **Методические рекомендации по изучению теоретических основ дисциплин**

Изучение теоретической части дисциплин призвано не только углубить и закрепить знания, полученные на аудиторных занятиях, но и способствовать развитию у студентов творческих навыков, инициативы и организовать свое время.

Самостоятельная работа при изучении дисциплин включает:

- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;

- знакомство с Интернет-источниками;

- подготовку к различным формам контроля (тесты, контрольные работы);

- подготовку и написание рефератов;

- выполнение контрольных работ;

- подготовку ответов на вопросы по различным темам дисциплины в той последовательности, в какой они представлены.

Планирование времени, необходимого на изучение дисциплин, студентам лучше всего осуществлять весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение материала.

Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно прорабатывать и дополнять сведениями из других источников литературы, представленных не только в программе дисциплины, но и в периодических изданиях.

При изучении дисциплины сначала необходимо по каждой теме прочитать рекомендованную литературу и составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме для освоения последующих тем курса. Для расширения знания по дисциплине рекомендуется использовать Интернет-ресурсы; проводить поиски в различных системах и использовать материалы сайтов, рекомендованных преподавателем.

При подготовке к контрольной работе необходимо прочитать соответствующие страницы основного учебника. Желательно также чтение дополнительной литературы. При написании контрольной работы ответ следует иллюстрировать схемами.

При выполнении самостоятельной работы по написанию реферата студенту необходимо: прочитать теоретический материал в рекомендованной литературе, периодических изданиях, на Интернет-сайтах; творчески переработать изученный материал и представить его для отчета в форме реферата, проиллюстрировав схемами, диаграммами, фотографиями и рисунками.

Тексты контрольных работ и рефератов должны быть изложены внятно, простым и ясным языком.

При ответе на экзамене необходимо: продумать и четко изложить материал; дать определение основных понятий; дать краткое описание явлений; привести примеры. Ответ следует иллюстрировать схемами, рисунками и графиками.

### **Методические рекомендации к выполнению контрольной работы**

Контрольная работа является одной из составляющих учебной деятельности студента по овладению знаниями в области физиологии и биохимии растений. К ее выполнению необходимо приступить только после изучения тем дисциплины.

Целью контрольной работы является определения качества усвоения лекционного материала и части дисциплины, предназначенной для самостоятельного изучения.

Задачи, стоящие перед студентом при подготовке и написании контрольной работы:

1. закрепление полученных ранее теоретических знаний;
2. выработка навыков самостоятельной работы;
3. выяснение подготовленности студента к будущей практической работе.

Контрольные выполняются студентами в аудитории, под наблюдением преподавателя. Ключевым требованием при подготовке контрольной работы выступает творческий подход, умение обрабатывать и анализировать информацию, делать самостоятельные выводы, обосновывать целесообразность и эффективность предлагаемых рекомендаций и решений проблем, чётко и логично излагать свои мысли. Подготовка контрольной работы следует начинать с повторения соответствующего раздела учебника, учебных пособий по данной теме и конспектов лекций.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин : учебное пособие для вузов / О. А. Агеев [и др.] ; под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 158 с. — (Серия : Университеты России). — ISBN 978-5-534-00792-3.

Режим доступа : <https://www.biblio-online.ru/book/E9083298-A69E-4EAF-9F37-679125167739> (ЭБС ЮРАЙТ).

2. Бобровников, Л. З. Электроника в 2 ч. Часть 1 : учебник для академического бакалавриата / Л. З. Бобровников. — 6-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 288 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-00109-9. Режим доступа : <https://www.biblio-online.ru/book/846DF71E-6181-495F-9C9D-87B725011335> (ЭБС ЮРАЙТ).

3. Бобровников, Л. З. Электроника в 2 ч. Часть 2 : учебник для академического бакалавриата / Л. З. Бобровников. — 6-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 275 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-00112-9. Режим доступа : <https://www.biblio-online.ru/book/81A5D012-0D87-439A-8219-FF111CABBB2C> (ЭБС ЮРАЙТ)

4. Степанова, Е. А. Метрология и измерительная техника: основы обработки результатов измерений : учебное пособие для вузов / Е. А. Степанова, Н. А. Скулкина, А. С. Волегов ; под общ. ред. Е. А. Степановой. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 95 с. — (Серия : Университеты России). — ISBN 978-5-534-00686-5. — Режим доступа : [www.biblio-online.ru/book/90804379-5080-4A04-83DB-FE523B616B2A](http://www.biblio-online.ru/book/90804379-5080-4A04-83DB-FE523B616B2A).

5. Пронкин Н.С. Основы метрологии: практикум по метрологии и измерениям [Текст] : учеб. пособие : рек. УМО / Н. С. Пронкин. - М. : Логос, 2007. - 392 с.

6. Метрология, стандартизация и сертификация. Практикум [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.Н. Кайнова [и др.]. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 368 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/61361>. — Загл. с экрана.

7. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация в 2 ч. Часть 1. Метрология : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. Г. Сергеев. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018 — 324 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-03643-5. — Режим доступа : [www.biblio-online.ru/book/CB28A4A1-F60A-4D9F-A573-A28FE43A3506](http://www.biblio-online.ru/book/CB28A4A1-F60A-4D9F-A573-A28FE43A3506).

8. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация в 2 ч. Часть 2. Стандартизация и сертификация : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. Г. Сергеев, В. В. Терегеря. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 325 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-03645-9. — Режим доступа : [www.biblio-online.ru/book/4573F340-3BC9-4076-B475-99681B96A072](http://www.biblio-online.ru/book/4573F340-3BC9-4076-B475-99681B96A072).