

З. М. СЕЛИВАНОВА

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ



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

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

З. М. СЕЛИВАНОВА

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Утверждено Ученым советом университета
в качестве учебного пособия для студентов 2, 3 курсов дневного,
очно-заочного, ускоренного и дистанционного обучения
по направлениям 11.03.03 «Конструирование и технология
электронных средств», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии
и системы связи», 11.03.01 «Радиотехника»

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2023

УДК 621.18.08(075.8)
ББК ж105я73+з221.я73
С29

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Радиотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ»
А. П. Пудовкин

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Теоретическая и экспериментальная физика»
ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина»
И. И. Пасечников

Селиванова, З. М.

С29 Измерительная техника и электрические измерения [Электронный ресурс] : учебное пособие / З. М. Селиванова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дискковод ; 1,97 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-2591-3

Представлены теоретические сведения по основам метрологии и электрическим измерениям, основы построения и эксплуатации измерительной техники, методические рекомендации для проведения практических занятий по дисциплине «Измерительная техника и электрические измерения».

Предназначено для студентов 2, 3 курсов дневного, очно-заочного, ускоренного и дистанционного обучения по направлениям 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.01 «Радиотехника».

УДК 621.18.08(075.8)
ББК ж105я73+з221.я73

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

ISBN 978-5-8265-2591-3

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

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Измерительная техника и электрические измерения» предназначено для студентов, изучающих измерительную технику и методику проведения электрических измерений в рамках учебной программы в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования направлений подготовки бакалавров 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.01 «Радиотехника».

В пособии представлены теоретические сведения по основам метрологии и электрическим измерениям, а также материалы для выполнения практических занятий.

В теоретических сведениях по метрологии рассмотрены основные понятия и определения метрологии, классификация методов и средств измерений, метрологические характеристики средств измерений, теория погрешностей измерений, методика обработки результатов измерений, государственные стандарты в области метрологии.

В теории электрических измерений изложены вопросы измерения параметров электрических цепей, методы и средства измерения электрических величин, методика измерения неэлектрических величин, основы измерений с использованием цифровых средств.

Учебное пособие содержит необходимую информацию для изучения основ построения и эксплуатации измерительной техники – электронных вольтметров и осциллографов, измерительных генераторов, которые применяются для определения параметров и характеристик электронных устройств.

В учебном пособии приведены методические указания к практическим занятиям по изучению основных методов измерений физических величин, расчета погрешностей измерений, обработки экспериментальных данных при многократном измерении, выбора средств измерений по точности при измерении и контроле параметров. Представлены методические рекомендации по измерению параметров электрических сигналов с использованием осциллографа, изучению принципа действия и устройства электроизмерительных приборов измерительной техники, методики измерения физических величин с помощью аналоговых и цифровых датчиков, измерительных приборов.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТРОЛОГИИ

1.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В МЕТРОЛОГИИ

Основные термины и определения приведены в рекомендациях по межгосударственной стандартизации РМГ 29–2013 [1 – 4].

Метрология включает научные исследования в области методов и средств обеспечения точности результатов измерений. Для единства измерений законодательно устанавливаются теоретической метрологией единицы величин и эталоны при проведении измерений.

Величина характеризует качественные свойства исследуемых объектов или явлений и в количественном виде отражает измеряемую характеристику индивидуального объекта.

К *задачам метрологии относятся*: создание теоретических и практических основ метрологии, номенклатуры единиц физических величин, методов нормирования, оценки точности результатов измерений и метрологических характеристик средств измерений.

Единство измерений обеспечивается метрологическими организациями, которые согласно законодательным актам, государственным стандартам и нормирующим документам устанавливают единство измерений. При единстве измерений полученные результаты физических величин при проведении измерений оцениваются в установленных единицах, которые определены пределами размеров единиц, соответствующих первичным эталонам. Погрешность измерений должна соответствовать установленным пределам с заданной вероятностью.

Метрологический контроль и надзор для обеспечения единства измерений осуществляются государственными метрологическими службами как государственных органов управления, так и юридическими лицами в организациях и на промышленных предприятиях.

Метрологические службы выполняют следующие основные задачи: способствуют повышению метрологического уровня результатов измерений при выпуске продукции на промышленном предприятии; контролируют обеспечение единства измерений; предлагают для использования современные методы и средства измерений в целях повышения качества выпускаемой продукции и эффективности предприятий; организуют и осуществляют ремонт, калибровку и своевременную поверку измерительных средств; выполняют метрологическую аттестацию методик измерений и измерительных средств и др.

Физическая величина характеризует как качественное свойство физических объектов, так и количественную характеристику индивидуального объекта, которая определяет размеры физических величин в виде чисел установленных для них единиц [3].

Истинное значение характеризует качественное свойство и количественное значение физической величины, которое устанавливается на основе множественных процессов измерений, с использованием рекомендованных метода и средства измерения.

Действительное значение устанавливается по результатам экспериментов физической величины, которое приближается к истинному значению.

Процесс измерения включает процедуры применения измерительных средств физической величины, в которых используются единицы физических величин для нахождения соответствия измеряемых величин их единицам и установления значений величин.

Основные характеристики измерений: принципы и методы измерения; результаты и погрешности измерения; точность, достоверность и воспроизводимость результатов измерения.

Принципы измерения отражают физические явления, эффекты, которые составляют основы измерения физических величин.

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

Результаты измерений определяют значения физических величин, которые получают в результате измерительных процедур.

Погрешности результатов измерения характеризуют отличие результатов измерений физической величины от истинных (действительных) значений измеряемых величин.

Точность результатов измерения оценивает качество измерения, которое характеризуется приближением к нулевому значению погрешностей результатов измерений физической величины. В количественном выражении точность равна обратной величине модуля относительной погрешности.

Сходимость результатов измерений определяет отличие результатов измерений физической величины при неоднократных измерениях с использованием тех же измерительных средств и методов и условий измерения. Сходимость результатов измерений физической величины отражает влияние случайных погрешностей на результат измерения.

Воспроизводимость результатов измерения физических величин показывает, насколько близки результаты измерения физических величин, которые получены различными измерительными средствами, методами и временными промежутками, но в одинаковых условиях.

Достоверность определяет качество измерения, отражает доверие к результатам измерения физической величины. Достоверность отражает доверительную вероятность нахождения истинного значения измеряемой физической величины в указанных доверительных границах.

1.2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ВИДОВ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Метод измерения заключается в сравнении измеряемых физической величины и ее единицы согласно применяемому принципу измерения.

По классификационным признакам методы измерения подразделяются на следующие виды [5 – 7]:

1) *по принципу действия* – магнитные, электрические, механические и др.;

2) *по типу контакта объекта исследования и измерительного средства* – бесконтактные и контактные;

3) *по виду формируемых сигналов при измерении* – цифровые и аналоговые;

4) *по режиму измерений параметров объекта* – динамические и статические;

5) *по сравнению с мерой* – непосредственной оценки и методы сравнения (сравнение измеряемых величин объекта и меры), которые классифицируются на нулевой, в котором результат сравнения меры и измеряемой величины сводят к нулю; дифференциальный, при котором определяется разность измерительных величин объекта и меры; замещения, в котором измеряемая величина замещается известной величиной меры; совпадения, использующим измерение разности измеряемых сигналов объекта и образцовой меры и контроль совпадения сигналов.

Средство измерения предназначено для измерения физических величин исследуемых объектов. Характеризуется нормированными метрологическими характеристиками, хранит неизменными размеры единиц физических величин с заданной погрешностью в установленном временном интервале.

Классификация средств измерений осуществляется по назначению и метрологическим функциям.

Средства измерений по назначению классифицируются на следующие виды:

1) *мера* – измерительное средство, которое воспроизводит физическую величину заданного размера, единицы измерений и точности. Меры бывают различных видов: однозначная, которая воспроизводит физические величины одного размера; многозначная, которая предна-

значена для воспроизведения физических величин разных размеров; набор мер различных размеров для размера одной физической величины; магазин мер, содержащий устройства для различных вариантов соединения мер;

2) *измерительный преобразователь*, имеющий нормативные технические характеристики, который преобразует измеряемую величину в другую физическую величину. Измерительные преобразователи применяются в различных измерительных приборах и средствах. По функциональному назначению измерительные преобразователи бывают следующих типов: первичный, промежуточный, масштабный, передающий. В измерительных преобразователях осуществляется преобразование магнитной величины в электрическую; электрической величины в электрическую; неэлектрической величины в электрическую;

3) *измерительный прибор* служит для измерения физических величин для установленного диапазона.

Классификация измерительных приборов: по виду представления измеряемых величин – цифровые и аналоговые; по функциональному назначению – измерение электрической и неэлектрической физических величин; по предметной области применения – вольтметры, частотомеры, осциллографы и др.; по принципу действия – суммирующие и интегрирующие; по способу индикации полученного значения физической величины – регистрирующие, показывающие, сигнализирующие; по методам преобразований измеряемых физических величин – прямого преобразования и сравнения; по конструктивно-технологическим особенностям – стационарные, переносные и щитовые; по способу защиты от дестабилизирующих факторов – влагозащищенный прибор, пылезащищенный, взрывобезопасный и др.;

4) *измерительная установка* служит для измерения физических величин. В своем составе функционально объединяет меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи и другие устройства. Измерительная установка выполняет функции поверки (поверочная) и может входить в состав эталона (эталонная);

5) *измерительная система* предназначена для многоканального приема, обработки и хранения измерительной информации, поступающей с первичных измерительных преобразователей. Измерительная система включает следующие структурные компоненты: измерительные преобразователи, меры, измерительные приборы и другие технические средства, которые служат для контроля заданных физических величин при определении свойств исследуемого объекта. Первичные измерительные преобразователи и измерительные средства расположены в нескольких точках контроля заданных параметров объекта для получения измерительной информации для последующей ее обработки в измерительной системе.

По функциональному назначению измерительные системы бывают контролирующими, информационными, управляющими и т.д.

При функциональном объединении электронно-вычислительной машины, измерительных устройств и других технических средств формируется измерительно-вычислительный комплекс, который входит в состав измерительной системы для реализации решаемых измерительных задач.

Средства измерений *по метрологическим свойствам* классифицируются на следующие виды: рабочие средства измерений и эталоны.

Рабочее средство измерений используется в процессе измерений физических величин без передачи размера физической величины другому измерительному средству.

К эталонам единиц физических величин относятся измерительные средства, утвержденные как эталоны, которые выполняют функции воспроизведения и хранения единицы, а также передают ее размер нижестоящим измерительным средствам с использованием поверочной схемы.

Эталоны характеризуются рядом признаков: воспроизводимость, неизменность, сличаемость. Воспроизводимость характеризует степень воспроизведения единицы физической величины при минимальной погрешности. Неизменность отражает возможность сохранять большой промежуток времени стабильный размер единицы физической величины. Сличаемость позволяет обеспечить сравнение с достаточной точностью результатов измерения физических величин с эталонами иных измерительных средств, а также на вторичных эталонах, которые находятся ниже в поверочной схеме.

Эталоны согласно существующей классификации могут быть первичными, вторичными и международными.

Международной основой при согласовании размеров единиц физической величины, которые воспроизводятся и хранятся национальными эталонами, является *международный эталон*. Исходным эталоном для страны служит *первичный* национальный эталон, который применяется при калибровке вторичных эталонов и находится на хранении в национальной лаборатории страны.

Эталон, который получает размер единицы физической величины от первичных эталонов соответствующих единиц, называется вторичным. Эталон вторичный применяется при контроле и калибровке рабочего эталона, хранится в отраслевой испытательной лаборатории.

Классификация вторичных эталонов в соответствии с метрологическими свойствами: исходный, сравнения, рабочий. От исходного эталона, имеющего точные метрологические параметры, размеры единиц передаются подчиненному эталону и измерительному средству.

Первичные эталоны являются исходными для страны, а рабочие и вторичные эталоны – для предприятия, региона, республики. Сличение эталонов осуществляется с использованием эталонов сравнения. Передача размеров единиц рабочему средству измерения выполняется в результате применения рабочего эталона. В целях применения единой терминологии в соответствии с международными требованиями и стандартами выполнена замена в терминологии «Образцовое средство измерения» на «Рабочий эталон».

Классификация измерительных средств по значимости: основные и вспомогательные. Основные средства измерений предназначены для измерения основной физической величины согласно поставленной измерительной задаче. Вспомогательные средства измерений предназначены для измерения физической величины, влияющей на точность измерения используемых основных средств измерения или измеряемых физических величин.

Классификация измерительных средств по стандартизации: стандартизованные и нестандартизованные средства измерений. Стандартизованные средства измерений производятся и эксплуатируются согласно требованиям государственных или отраслевых стандартов, проходят необходимые испытания и включаются в Государственный реестр измерительных средств. Нестандартизованные средства измерения не соответствуют требованиям, предъявляемым к стандартизированным средствам измерений.

1.3. ВИДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Согласно ГОСТ 8.009–84 расчет и оценка метрологических характеристик измерительного средства позволяют выполнять: расчет инструментальных составляющих погрешностей измерений с использованием приборов, метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем; осуществлять оценку и выбирать оптимальное средство измерений в реальных условиях эксплуатации; выполнять сравнение измерительных средств с учетом их метрологических характеристик в условиях влияния внешних факторов [8 – 13].

Метрологические характеристики измерительного средства определяют погрешности и результаты измерений физической величины, а также точностные свойства измерительного средства.

В результате определения метрологических характеристик рассчитывают: диапазоны измерения, пороги чувствительности; функции

преобразования, чувствительность, цену деления шкалы электронного устройства, вариацию показаний, погрешности измерительного средства и ряд других.

Диапазон измерений – интервал значений физических величин, в котором нормирована допускаемая погрешность измерительного средства. Верхнее и нижнее значения измеряемых величин соответствует верхнему и нижнему пределам измерения. Диапазоны измерения средства измерений разбиваются на ряд поддиапазонов для обеспечения точности измерения. Если результат измерения представляется в цифровом коде в цифровых измерительных устройствах, то приводится цена единиц младших разрядов, используемый цифровой код – двоичный или двоично-десятичный, а также применяемое количество разрядов кодов.

Порогом чувствительности называется то значение физических величин, при котором возможно его восприятие и измерение средством измерения в заданных единицах физических величин.

Функции преобразования относятся к статическим характеристикам преобразований. Определяются функциональными зависимостями информативных параметров выходных и входных сигналов измерительных средства. Функции преобразования задаются табличным, аналитическим и графическим способами.

Чувствительностью называют характеристику измерительных средств, которая определяется изменением выходных сигналов электронного устройства в зависимости от изменений измеряемых величин. Абсолютная чувствительность определяется зависимостью

$$S = \frac{bY}{kX},$$

где b – изменение сигнала Y на выходе измерительного прибора; k – изменение измеряемой величины X на входе прибора

Для линейной характеристики преобразования чувствительность измерительного прибора постоянна, и шкала равномерна, отличающаяся одинаковыми промежутками делений шкалы прибора. Если статическая характеристика преобразования измерительного прибора нелинейная, то чувствительность измерительного прибора будет зависеть от изменения измеряемой величины X .

Ценой деления различных видов шкал измерительных приборов называют разности значений измерительных величин, которые соответствуют рядом находящимся отметкам шкалы. При равномерной шкале измерительной прибор характеризуется постоянной ценой деления. Необходимо нормировать минимальную цену деления шкалы,

если измерительный прибор имеет неравномерную шкалу. Расчет цены деления шкалы измерительного прибора выполняется или на основе абсолютной чувствительности прибора S , или определяется числом единиц измеряемых величин, которые соответствуют одному делению шкалы измерительного средства. Для цифровых измерительных средств выполняется нормирование характеристик цифровых кодов, которые применяются в цифровых приборах: количество разрядов, типы выходных кодов, цена единиц младших разрядов.

Погрешность измерительного средства относится к классу метрологических характеристик, которые определяются разностью истинных (действительных) значений измеряемых величин и истинных (действительных) значений измерительного средства. Номинальное значение измеряемой величины применяется для меры. *Погрешность измерения* позволяет установить отклонение измеренных значений величин от их истинных (действительных) значений. Погрешность измерения характеризует точность измерений.

Вариация – это разность результатов показаний измерительного прибора для прямого и обратного хода в процессе проведения измерений.

Функции влияния определяют воздействие дестабилизирующих факторов на результаты измерения измерительных приборов.

Динамические метрологические характеристики устанавливают инерционность измерительных устройств, функциональные зависимости выходных сигналов измерительных приборов от временных изменений физических величин, параметров входных сигналов, дестабилизирующих факторов от изменения сопротивления нагрузки. При анализе динамических характеристик применяются дифференциальные уравнения для описания функционирования измерительных средств, переходная и импульсная переходная функции, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики, передаточная функция.

Динамическая погрешность средства измерения определяется динамическими свойствами измерительных приборов и формируется в динамике процесса измерений физических величин.

Нормативные документы (ГОСТы) устанавливают перечень нормируемых метрологических характеристик на измерительные средства и приборы.

При разработке и эксплуатации измерительных средств и приборов необходимо выполнять расчет, проводить обоснование и учитывать ряд характеристик и параметров измерительных устройств: электрическую прочность, сопротивление изоляции, надежность, устойчивость к воздействию механических и климатических факторов, время выхода приборов в рабочий режим и т.д.

1.4. СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешности результатов измерений с использованием измерительных средств включают следующие составляющие: абсолютную, относительную, систематическую, случайную, статическую, динамическую, аддитивную, мультипликативную, инструментальную, методическую, субъективную, а также составляющие погрешности измерений от воздействия дестабилизирующих факторов и результатов обработки результатов измерений.

Погрешностью называется отличие измеренной физической величины от истинного значения величины [14 – 16].

При количественной оценке расчет *абсолютной погрешности* измерений выполняется по следующей формуле:

$$\Delta x = x_{и} - x_{д} ,$$

где $x_{и}$ – значение измеряемой величины; $x_{д}$ – действительное значение физической величины.

Относительная погрешность измерения – это отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению физической величины. Расчет относительной погрешности выполняется по зависимости

$$\delta = \frac{\Delta x_{и}}{x_{д}} \cdot 100\% ,$$

где δ – относительная погрешность измерения физической величины.

Случайная погрешность является составляющей погрешностью измерений при повторном измерении физической величины при одинаковых условиях измерения. Случайные погрешности описываются с использованием теории случайных процессов и математической статистики.

Систематическая погрешность измерений при повторных измерениях может быть или постоянной, или закономерно изменяющейся для одинаковых условий измерения. Постоянные погрешности характеризуются одинаковой величиной и знаком. К закономерно изменяющимся погрешностям относятся: прогрессирующие погрешности, которые возрастают или убывают с течением времени; периодические и изменяющиеся по сложным законам с течением времени.

Причины формирования определяют следующие виды систематических погрешностей: инструментальная, методическая, погрешность установки, субъективная.

Инструментальная погрешность определяется погрешностью измерительного прибора, которая зависит от точности градуировки

электронного средства, вариации показания устройства при его эксплуатации, неточной градуировки, смещения нуля измерительного средства. Инструментальные погрешности определяются несовершенством измерительных средств и включают следующие составляющие: абсолютные, относительные, приведенные, случайные, систематические, основные, дополнительные, статические, динамические, погрешности в результате нестабильности метрологических характеристик; из-за импеданса, гистерезиса, дискретизации, погрешностей структурных компонентов измерительного средства, преобразования и квантования измеряемой физической величины. Инструментальные погрешности представляют в приведенной форме, если они зависят от погрешности измерительного средства.

Методическая погрешность зависит от применяемого метода измеряемой физической величины, является составляющей систематической погрешности измерений, которая обусловлена недостатками применяемых методов измерения.

Приборная погрешность определяется систематическими составляющими инструментальных и методических погрешностей. На приборную погрешность влияют имеющиеся допуски изготовления деталей измерительных приборов, а также физические процессы, заложенные в принцип действия измерительного средства.

Точность измерительного средства характеризует его качество и степень близости погрешности прибора к нулевому значению.

Класс точности измерительного прибора отражает степень точности прибора, зависит от допустимых пределов основных и дополнительных погрешностей и влияющих на точность характеристик.

Субъективная погрешность зависит от индивидуальных особенностей операторов. Для устранения субъективных погрешностей целесообразно применять цифровые измерительные приборы, а также автоматические методы измерений.

Промах относится к случайным ошибкам и может быть в результате ошибки операторов и при воздействии дестабилизирующих факторов.

Статическая погрешность формируется в процессе измерений физической величины в установившемся режиме без изменения во времени.

Динамическая погрешность формируется при динамическом измерении в случае изменения измеряемой физической величины с течением времени. При этом необходимо установление закона изменения погрешности измерения физической величины во времени.

Аддитивная погрешность не зависит от значений измеряемых величин и формируется при суммировании числовых значений величин.

Мультипликативная погрешность зависит от значений физических величин в процессе измерения.

Внешняя погрешность устанавливает составляющую погрешности результатов измерения и относится к систематическим погрешностям. Определяется дополнительной погрешностью, возникающей при изменении нормальных условий измерения при воздействии воздействующих дестабилизирующих факторов.

Основная погрешность измерительных средств рассчитывается при условиях функционирования, которые являются нормальными согласно паспорту измерительного прибора.

Дополнительная погрешность формируется при работе измерительного устройства при влиянии внешних факторов. Расчет дополнительной погрешности включает определение абсолютной и относительной погрешностей.

Приведенная погрешность соответствует потенциальной точности измерений. Определяется отношением абсолютных погрешностей к значениям величин, которые постоянны для всего диапазона проводимого измерения.

Погрешность поверки является отклонением полученных показаний поверяемых измерительных средств по сравнению с показаниями эталонных средств.

Погрешность градуировки определяется погрешностью действительных значений физической величины при проведении градуировки для соответствующей отметки шкалы измерительного средства.

Погрешность квантования относится к методической погрешности представления непрерывных величин, которые ограничены величиной разрядов числа. Погрешность квантования определяется разностью значений квантования и значений исходной непрерывной функции. Составляющие погрешности квантования относятся к аддитивным и мультипликативным погрешностям. В соответствии с ГОСТом выполняют оценку измеряемых величин с использованием измерительных средств, а также проводят расчет среднего квадратического отклонения.

Среднее арифметическое значение результатов измерения рассчитывается по формуле

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ,$$

где $x_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение результатов измерения; x_i – значение измеренного результата; n – количество полученных результатов измерения.

Среднее квадратическое отклонение серии результатов измерений определяют по следующей зависимости:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2}{n-1}},$$

где S – среднее квадратическое отклонение результатов измерений.

Дисперсия – это математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания. В этом случае дисперсия будет равна

$$D[x_c] = M(x_c - M[x_c])^2,$$

где x_c – случайная величина, которая определяется для некоторого вероятностного пространства; M – математическое ожидание.

Доверительные границы случайной погрешности для оценок измеряемых величин определяются в соответствии с ГОСТ Р8.736–2011 [14] только для тех результатов измерения, для которых применяется нормальный закон распределения.

Если количество данных измерения соответствует неравенству $15 < n < 50$, то проверяется принадлежность результатов измерения к нормальному закону распределения по составному критерию [14]. Если количество данных измерения соответствует неравенству $n > 50$, то принадлежность результатов измерения к нормальному закону распределения выполняется по какому-либо критерию: К. Пирсона или Мизеса–Смирнова [14].

Расчет доверительных границ случайных погрешностей при выполнении оценок измеряемых величин осуществляется по следующей зависимости:

$$\varepsilon = tS_x,$$

где t – значение коэффициента Стьюдента, определяемое для доверительной вероятности P и соответствующего количества экспериментальных данных по установленным значениям, приведенным в таблицах ГОСТ Р8.736–2011 [14].

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности определяются пределами допустимой основной и дополнительной погрешностей измерительных средств при незначительных случайных составляющих погрешностей измерения. Граница систематической погрешности Q результатов измерения для оценки измеряемой величины до трех видов систематической погрешности, представленных границами Q_i , оценивают по зависимости

$$Q_{\Sigma} = \pm \sum_{i=1}^e |Q_i|,$$

где Q_{Σ} – граница систематической погрешности; Q_i – граница каждого вида систематической погрешности; e – вид систематической погрешности.

Если число составляющих неисключенной систематической погрешности, к которым относятся погрешности поправок, измерительных средств и др., более трех, то для границ данных составляющих применима функциональная зависимость распределения случайных величин.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

2.1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение – это процесс сравнения измеряемой физической величины с эталонной величиной, которая принята за единицу измерения [14 – 17].

Точность измерения определяется рядом факторов:

а) оценкой точности измерений с учетом точности измерительного средства;

б) обеспечением точности измерений в результате выбора соответствующего средства измерений по их метрологическим характеристикам;

в) применением точных измерительных устройств в составе комплекса измерительных средств.

Основные виды измерений классифицируются по их характеристикам, свойствам и признакам:

1. *Равноточные* измерения физической величины, которые выполняются измерительными средствами с одинаковой точностью. *Неравноточные* измерения физической величины проводятся при различных условиях измерительными средствами с различной точностью.

2. *Однократные* измерения осуществляются в результате одного эксперимента, при котором получают значение измеряемой физической величины. *Многократные* измерения предполагают проведение множеств экспериментов для получения измеренного значения физической величины при реализации одинаковых условий эксперимента.

3. *Статические* измерения, при которых измеряемая физическая величина стабильна в течение всего времени измерения. *Динамические* измерения характеризуются изменением физической величины во времени в процессе измерений.

4. *Абсолютные* измерения отличаются способом выражения результата измерения, при котором измеренная физическая величина представляется в тех единицах, в которых она измеряется. *Относительные* измерения отличаются большей точностью, поскольку в суммарной погрешности отсутствует погрешность меры измеряемой величины. Представляются в относительных единицах, так как результат выражается отношением результата абсолютного измерения физической величины к действительному значению измеряемой величины.

5. *Прямые измерения* отличаются от косвенных способом формирования результатов измерений. В прямых измерениях значение физических измеряемых величин получают с использованием измери-

тельных средств (измерительных приборов). *Косвенные измерения* отличаются получением результата измерения физической величины с использованием зависимости измеряемой величины от другой величины, которую можно получить в результате прямого измерения.

6. *Эталонные измерения* отличаются от рабочих метрологическим назначением и проводятся с использованием эталона. Эталон является утвержденным в соответствии с установленными правилами измерительным средством, которое воспроизводит и хранит единицы физических величин. Эталонные измерения выполняются при поверке и калибровке измерительных средств, а также их метрологической аттестации. *Рабочие измерения* проводятся для реализации измерительных процедур при определении значений измеряемых физических величин. При рабочих измерениях определяют также параметры выпускаемой продукции на производстве, контролируют значения параметров технологических процессов различных предприятий, при которых передается размер единиц величин.

Для теории измерений характерны понятия истинных значений измеряемых величин и действительных. *Истинное значение* измеряемой физической величины должно соответствовать точному значению величины. В процессе измерений получают значения измеряемых физических величин, которые представляют собой оценку истинных значений величин.

Действительное значение физических величин соответствует высокой оценке истинного значения измеренных величин. Представляется возможным заменить действительное значение физической величины, полученное в процессе измерительного эксперимента, если оно близко к истинному значению.

2.2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Электрическая цепь – это множество электротехнических компонентов и связей между ними, которые формируют замкнутые электрические контуры для протекания электрического тока при наличии в цепи источника тока. К электротехническим компонентам относятся: источник электромагнитной энергии, например генератор, источник электрического сигнала, например гальванический элемент или аккумулятор; приемник или потребитель; устройство для преобразования электрической энергии – трансформатор; кабели и провода для передачи электроэнергии [17 – 19].

Электрическую цепь составляют активные элементы – источники электрической энергии и пассивные элементы – активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C .

Узел электрической цепи – точка пересечения линий электрической цепи, соединяющих нескольких электронных компонентов.

Ветвь электрической цепи – это связанные элементы электрической цепи, которые включены между двумя узлами.

Контур образует ветви электрической цепи, которые образуют замкнутую электрическую цепь.

Классификация электрических цепей: по постоянному и переменному току; с линейными и нелинейными элементами; принципиальные, замещения и монтажные по способу представления; по простым и сложным схемам соединения.

Функционирование электрических цепей подчиняется следующим законам.

Закон Ома: для однородного участка электрической цепи сила тока I прямо пропорциональна разности потенциалов U на концах участка цепи и обратно пропорциональна сопротивлению R :

$$I = U / R .$$

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма сил токов, втекающих и вытекающих из узла, равна нулю. При этом токи, втекающие в узел, считаются положительными, а вытекающие – отрицательными.

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений на компонентах контура электрической цепи равна нулю или сумме источников ЭДС.

В электрических цепях одновременно протекают три энергетических процесса.

Закон Джоуля–Ленца отражает преобразование электрической энергии в тепло в активных сопротивлениях. Согласно закону Джоуля–Ленца, количество теплоты Q , которое выделяет проводник с током I на сопротивлении R , прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению и времени t прохождения тока:

$$Q = I^2 R t .$$

При расчете в электрической цепи значение R допускается принимать постоянным. Тогда электрическая цепь с включенными постоянными значениями сопротивлений будет называться линейной.

Энергия электромагнитного поля. Энергия магнитного поля распределяется на индуцирование ЭДС и тока самоиндукции в электрическом контуре при убывании магнитного потока до нулевого значения от первоначального значения. Энергия W_m магнитного поля определяется по формуле

$$W_m = \frac{\Psi_k i_k}{2}, \quad \Psi_k = L_k i_k ,$$

где Ψ_k – потокосцепление; L_k – значение индуктивности, которое соответствует коэффициенту пропорциональности между потокосцеплением и током; i_k – ток, протекающий через катушку.

Сумма произведений магнитных потоков, которые зависят от тока в электрической цепи, и числа витков, с которыми выполнено их сцепление, называется потокосцеплением самоиндукции электрической цепи. Изменение тока приводит к изменению потокосцепления и наведению ЭДС самоиндукции e_L в катушке в соответствии с зависимостью

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}.$$

Знак минус соответствует отражению противодействия ЭДС изменению тока в электрической цепи. Энергия электрического поля. В системе, состоящей из двух проводников с распределенными на них равными по модулю и противоположными по знаку зарядами, разность потенциалов между двух проводников будет пропорциональной модулю заряда:

$$U = q / C ,$$

где C – постоянный коэффициент, который зависит от размеров проводников, их формы, расположения в пространстве и диэлектрической проницаемости окружающей их среды. Величина C является электрической емкостью, которая определяется отношением заряда системы проводников к разности потенциалов между ними:

$$C = q / U .$$

Система, включающая изолированные друг от друга диэлектриком металлические полупроводники, называется конденсатором.

Энергия электрического поля конденсатора W определяется по формуле

$$W_э = \frac{q_k U_k}{2}, \quad q_k = C_k U_k ,$$

где q_k – величина заряда, Кл; U_k – значение напряжения, В; C_k – электрическая емкость конденсатора, Ф.

При изменении напряжения источника в цепи конденсатора осуществляется изменение зарядов на пластинах конденсатора и появляется, ток в электрической цепи, который определяется зависимостями

$$i = -\frac{dq}{dt} = \frac{d(CU)}{dt} = C \frac{dU}{dt} .$$

Виды режимов работы, реализуемых в электрических цепях. В электрических цепях и элементах осуществляются различные режимы работы в зависимости от значений напряжения, тока, мощности.

Номинальным режимом работы элемента электрической цепи называется режим работы при номинальных параметрах. *Согласованный режим реализуется* при максимальной мощности, отдаваемой источником или потребляемой приемником и при выполнении согласования параметров в электрических цепях. *Режим холостого хода* обеспечивается при отсутствии протекания электрического тока по источнику или приемнику и без передачи источником энергии во внешнюю цепь и потребления энергии приемником.

Режим короткого замыкания возникает, если контактируют разноименные зажимы источников, пассивных элементов или участки электрических цепей, которые находятся под напряжением.

2.3. МЕТОДИКА И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерение постоянного тока. Для измерения постоянного тока и напряжения применяются следующие приборы: магнитоэлектрические амперметры, вольтметры, аналоговые электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, электростатические, цифровые приборы, потенциометры постоянного тока [6 – 8, 17 – 19].

Малое количество электричества быстропротекающих импульсов тока измеряется баллистическим гальванометром, а *большое количество электричества* измеряется кулонометром. Измерительный прибор выбирается в зависимости от величины мощности измеряемых объектов и требуемой точности. Методическую погрешность измеряемого напряжения можно уменьшить, если обеспечить высокое входное сопротивление вольтметра, а для измерения тока – низкое сопротивление амперметра.

Прямое измерение малых токов и напряжений осуществляют с использованием гальванометра магнитоэлектрической системы, цифрового пикоамперметра, микровольтметра и нановольтметра.

Косвенное измерение токов и напряжений выполняется с применением компенсатора, электрометра, на основе значения заряда конденсаторов электрометров.

Измерение незначительного количества электричества для кратковременного импульса осуществляется с использованием баллистического гальванометра.

Измерение значительного количества электричества, которое формируется за многочасовой временной промежуток, выполняется кулон-метром.

Измерение электродвижущей силы (ЭДС). Измерение ЭДС проводится компенсаторами тока: электромеханическими, гальванометри-

ческими, электрометрическими. Основные преимущества данных компенсаторов – высокие чувствительность и входное сопротивление. Дифференциальные методы измерения рекомендуются при измерении ЭДС источника при наличии большого внутреннего сопротивления или при измерении напряжений в высокоомных цепях.

Измерение больших постоянных токов выполняется при параллельном включении шунтов и применении магнитного преобразователя. Для проведения точного измерения большого тока служит медный преобразователь определенного диаметра, который имеет устройство для включения в шину с током.

Измерение высоких напряжений проводится с использованием магнитоэлектрических вольтметров и добавочных резисторов в составе вольтметра. Для измерения высоких напряжений до 300 кВ необходимо применять электростатический вольтметр, а также вольтметр посредством измерительного трансформатора напряжений.

Измерение переменного тока и напряжения выполняется на основе измерительного механизма известных измерительных систем. Магнитоэлектрический прибор применяется с преобразователем переменного тока в постоянный. Оценка полученных величин токов и напряжений выполняется на основе их действующих, амплитудных или средних значений. Переменные токи и напряжения измеряются следующими измерительными приборами: электромагнитными амперметрами и вольтметрами, на работу которых влияет магнитное поле токоподводящих проводов, и электростатические вольтметры, которые неустойчивы к механическим воздействиям и применяются в лабораторных условиях.

Измерение мощности и энергии необходимо в электрических цепях. Измеряется мощность и энергия постоянного тока, активная мощность и энергия переменного однофазного и трехфазного токов, реактивная мощность и энергия трехфазного переменного тока; мгновенное значение мощности, количество электричества.

Измерение мощности в цепях постоянного тока осуществляется косвенным путем при использовании методов амперметра, вольтметра и компенсационных методов. Цифровые ваттметры используются при измерении для широкого частотного диапазона, отличаются наличием автоматического выбора предела измерения, самокалибровкой и внешнего интерфейса. В высокочастотном диапазоне измерение мощности выполняется с использованием специальных и электронных ваттметров. Реактивные ваттметры (варметры) применяются для измерения мощности в низкочастотном диапазоне.

Измерение активной мощности в цепях трехфазного тока осуществляется тремя методами: одного ваттметра для симметричной

системы и с равномерными нагрузками фаз, при одинаковых углах сдвига фаз между векторами тока и напряжений, а также с полной их симметрией; двух ваттметров для применения в трехфазной цепи независимо от схем соединений и видов нагрузки при симметрии и асимметрии токов и напряжений; трех ваттметров, каждый из которых будет измерять мощность одной из фаз, и итоговая мощность определяется суммой значений каждого ваттметра.

Измерение реактивной мощности в однофазных и трехфазных цепях переменного тока проводят с использованием электродинамических, ферродинамических и специальных ваттметров.

Измерение энергии в однофазной и трехфазной цепях выполняют с использованием электромеханических и электронных счетчиков, которые отличаются более высокой метрологической точностью и высокой надежностью эксплуатации.

Для измерения фазы и частоты электрических сигналов применяют осциллографические методы для широкого диапазона частот в маломощных электрических цепях. Измерения фазы выполняют с использованием метода линейной развертки и эллипса. Для реализации метода линейной развертки применяют двухлучевой осциллограф. На горизонтальные пластины осциллографа подается линейное развращивающее напряжение, а на вертикальные пластины поступает напряжение. В результате между пластинами измеряется фазовый сдвиг.

Для измерения угла сдвига фаз используют электродинамические, ферродинамические, электромагнитные, электронные и цифровые фазометры. При измерении угла сдвига фаз применяются однофазные или трехфазные фазометры, если исследуется трехфазная симметричная цепь.

Для маломощных цепей с частотным диапазоном до 150 МГц используется цифровой фазометр для измерения угла сдвига фаз.

Методы измерения частоты. Для прямого измерения применяются электромеханические, электронные и цифровые частотомеры. *Электромеханические частотомеры* содержат электромагнитную, электродинамическую и ферродинамическую системы, включающие измерительный механизм, позволяющие выполнять непосредственный отчет частоты с использованием шкалы логометрического измерителя. Для измерений в герцовых и мегагерцовых частотных диапазонах применяется *электронный частотомер*. Измерения высокой точности обеспечивает *цифровой частотомер*. Частотозависимые мосты переменного тока, которые питаются напряжениями измеряемых частот, применяются для реализации *мостового метода* измерений частот, например с использованием емкостного моста. При *косвенном измере-*

нии частоты для широкого диапазона частот применяется осциллограф с использованием интерференционных фигур Лиссажу и метода круговой развертки.

2.4. МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерение неэлектрических величин, например ускорения, давления, температуры и др., осуществляется в результате применения первичных измерительных преобразователей для преобразования входных величин от измерительных датчиков в выходные электрические сигналы. Затем выходные сигналы поступают на измерительные преобразователи прибора, которые преобразуют сигналы по уровню и спектру, виду энергии. В результате преобразования измеряемая величина представляется в виде числового значения или кода другой физической величины или измерительного сигнала [6, 17 – 22].

Измерительным преобразователем называется измерительное устройство, имеющее нормативные метрологические характеристики, которое выполняет функции преобразования физических величин, передачи, хранения и индикации. *Информативный параметр* входного сигнала – это измеряемая величина или функционально связанная с ней, *неинформативный параметр* функционально не связан с измеряемой величиной и оказывает влияние на метрологические параметры преобразователей. *Влияющие величины* оказывают воздействие на функции преобразователей. Функциональные зависимости метрологических параметров преобразователей от влияющих величин могут быть представлены математическими зависимостями, графическими или в виде таблиц.

К динамическим характеристикам преобразователей относятся: импульсные, переходные, передаточные функции, амплитудно- и фазочастотные характеристики. Скорость и время преобразований сигналов отражают динамические свойства преобразователей.

Чувствительность преобразователя определяется отношением изменений выходных величин к вызывавшим это изменение входным величинам.

Погрешность преобразования определяется свойствами преобразователя и дестабилизирующими факторами (температура, влажность, воздействие электромагнитных полей и др.). К погрешностям преобразователя по входу и выходу относятся: абсолютная, относительная, приведенная.

Измерение неэлектрических величин осуществляется приборами компенсационного и прямого преобразований. Приборы, реализующие

метод прямых преобразований, формируют результаты измерений на основе последовательных преобразований измеряемых.

Метод компенсационного преобразования при наличии отрицательной обратной связи позволяет уменьшить аддитивную и мультипликативную погрешности преобразования, статическую и динамическую погрешности, повысить выходную мощность.

Мостовые и компенсационные схемы применяются для измерения неэлектрической величины. Преобразователи в мостовые схемы включаются тремя способами. Чувствительность мостовой схемы и линейность функций преобразований определяют основные требования при выборе способа включения преобразователя. Мостовые схемы бывают постоянного и переменного тока.

Отличие мостов переменного тока от мостов постоянного тока заключается в применении комплексного сопротивления, а не активного, и необходимости компенсации фазовых сдвигов между током и напряжением в плечах моста в процессе балансировки мостовой схемы. Повышение чувствительности мостовых схем достигается при согласовании сопротивления указателя и выходного сопротивления моста. Для измерения неэлектрической величины применяются также симметричные мостовые схемы.

Компенсационные схемы постоянного и переменного токов. При измерении незначительных ЭДС, формирующихся преобразователями, применяют компенсационные схемы, которые обладают высокой чувствительностью и не имеют потребления.

Индикаторы измерительных приборов при измерении неэлектрической величины разделяются на два класса: указатель нуля, указатель текущих значений. Магнитоэлектрический гальванометр применяется как индикатор равновесными мостами и компенсаторами. К индикатору равновесного моста переменного тока относят: электронный прибор, телефон, вибрационный гальванометр и другие устройства при наличии с выпрямителя. В неравновесном мосте постоянного и переменного токов используют соответствующий показывающий прибор постоянного или переменного токов.

Выбор преобразователя при измерении переменной величины связан с оценкой погрешностей, которые определяются инерционными свойствами при динамическом режиме работы преобразователя.

Погрешности преобразователей. Основная погрешность измерительных преобразователей включает две составляющие: инструментальная погрешность, которую обуславливают погрешности элементов преобразователей, и погрешность, которую формирует низкая чувствительность усилителя и индикатора.

На *точность измерения* неэлектрической величины влияют основные дополнительные факторы: воздействие температуры, влажности и вибрации, нестабильность напряжения, частоты.

Классификация измерительных преобразователей.

По назначению измерительные преобразователи делятся на: первичные (датчики), унифицированные и промежуточные. *Первичный преобразователь* состоит из чувствительного элемента и элементов, преобразующих входную неэлектрическую величину в выходную электрическую величину. Датчик находится под воздействием измеряемой неэлектрической величины, например температуры, давления, влажности и др. *Унифицированный преобразователь* включает датчик и схему согласования. Применение источника энергии позволяет преобразовать измеряемую физическую величину в нормированную выходную величину. Промежуточные преобразователи выполняют функции передачи сигнала от предыдущих преобразователей к последующим.

По характеру преобразования входной величины к измерительным преобразователям относят линейные с линейной зависимостью входных и выходных величин и нелинейные с нелинейной зависимостью между входной и выходной величинами.

По *принципу действия* датчики подразделяются на генераторные и параметрические. Выходным сигналом в генераторных датчиках формируются выходные сигналы, которые зависят от измеряемой физической величины функционально, например ток, напряжение. Измеряемые величины в параметрических датчиках пропорциональны изменению параметров в электрической цепи, например R , L , C .

Генераторные датчики бывают следующих видов: индукционный, пьезоэлектрический, термоэлектрический, электрохимический. По принципу действия различают ряд видов параметрических датчиков. В резистивных датчиках измеряемые величины зависят от изменения сопротивлений резисторов. Электромагнитные датчики отличаются преобразованием измеряемых величин в изменение индуктивности или взаимоиндуктивности. В емкостных датчиках измеряемая величина зависит от изменения емкости. В пьезоэлектрических датчиках динамические усилия преобразуются в электрические заряды. Гальваномагнитные датчики основаны на эффекте Холла, преобразуют создаваемое магнитное поле в ЭДС. В тепловых датчиках измеряемые температуры преобразуются в ЭДС или в значения термосопротивлений. В оптоэлектронных датчиках оптический сигнал преобразуются в электрический.

Для датчиков основными характеристиками являются: типы датчиков, диапазоны измеряемых величин, диапазоны рабочих температур, погрешности измерений, входные и выходные сопротивления, частотные характеристики.

Области применения датчиков от внедрения новых материалов и прогрессивных технологий их изготовления: высоковакуумное напыление, химическое осаждение из газовой фазы, фотолитография и др. В промышленности применяют следующие виды датчиков при измерении физических величин: расход, объем, давление, температур, уровень, химический состав. В настоящее время широкое применение находят датчики нового поколения с расширенными функциональными возможностями и интеллектуальными функциями: положения, перемещения, изображения, оптические и волоконно-оптические, био-датчики, распознавания образов.

На современных предприятиях осуществляется применение датчиков для реализации интерактивного режима при использовании результатов измерения для коррекции и регулирования технологического процесса. Датчики широко применяются в робототехнике для получения, обработки и преобразования необходимой информации роботом для его функционирования по заданному алгоритму. Современные технологии позволяют изготовить электронные датчики в микроминиатюрном исполнении для автомобильной электроники: в системах управления автомобиля – датчики двигателя, тормозов, электроники кузова; при обеспечении безопасности и надежности – датчики системы блокировки и противоугонные; информационные системы – датчики расхода топлива, температуры, маршрута движения и др.

2.5. ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ СРЕДСТВ

Цифровой измерительный прибор позволяет оперативно и точно измерить электрические величины: переменные и постоянные напряжение и ток; частоту, период, длительность импульсов; индуктивность, емкость и другие параметры электронных устройств. Цифровые измерительные приборы позволяют преобразовать измеряемую аналоговую величину в цифровой сигнал в результате реализации процессов дискретизации по времени и квантованию по уровню аналоговой величины [6, 17 – 22].

Цифровые приборы отличаются принципом действия и конструктивным исполнением. Согласно существующей классификации циф-

ровые приборы подразделяются на электронные и электромеханические. Электронные приборы отличаются применением современных электронных компонентов и устройств, а для электромеханических приборов характерна высокая точность определяемых параметров и невысокая скорость измерения.

Принцип действия и структурное построение цифровых приборов заключаются в следующем. Цифровой прибор состоит из структурных компонентов: устройства для исключения помех, преобразователя входного сигнала, аналого-цифрового преобразователя, устройства управления сигналами и процессом измерения, устройства индикации измеряемой величины в цифровом виде. Для исключения возможных помех измеряемая величина вначале подается на фильтрующее устройство для исключения помех, а затем преобразуется в преобразователе входного сигнала. В аналого-цифровом преобразователе измеряемая аналоговая величина преобразуется в цифровой код, который позволяет отобразить измеряемую величину в цифровом виде. Устройство управления осуществляет синхронизацию формирования управляющих сигналов в процессе измерения физической величины.

Существуют два вида цифровых измерительных приборов в соответствии с принципом аналого-цифровых преобразований: устройства прямых преобразований и компенсационные при выполнении уравнивающего преобразования.

Основные характеристики цифровых измерительных приборов отражают преимущества данных измерительных устройств.

Разрешающая способность цифрового измерительного прибора зависит от изменения цифровых отсчетов, приходящихся на единицу младшего разряда. *Входное сопротивление* определяет мощность цифрового прибора, которая потребляется прибором от объектов измерений. Количество измерений за секунду определяет *быстродействие* цифровых измерительных приборов. Соответствие результатов измерений истинным значениям измеряемых величин характеризует *точность измерений* цифрового измерительного прибора. Пределы допускаемых относительных погрешностей определяют *классы точности* цифровых приборов.

Помехоустойчивость цифрового прибора зависит от степени подавления помех на его входах, которую определяет параметр прибора - коэффициент подавления помех.

Установлены общие *технические характеристики* универсального цифрового измерительного прибора, к которым относятся следующие виды: диапазоны входных физических величин, абсолютные погрешности для верхних пределов измерения, значения стабильности

для верхних пределов измерений, разрешающая способность, временной промежуток, в течение которого выполняется операция.

Преимущества цифровых измерительных приборов определяют ряд следующих параметров. Приборы характеризуются *высокой чувствительностью* для напряжений постоянного и переменного токов и помехозащищенностью. Цифровые приборы имеют большую *точность измерения*, классы точности разделяют от 0,01 до 1,0. К преимуществам цифровых приборов можно также отнести расширение их функциональных возможностей: дистанционная передача полученных результатов измерений с использованием кодовых сигналов, использование цифровых измерительных приборов в комплексе с вычислительными машинами и устройствами автоматизации.

Сложность цифровых измерительных приборов и значительную стоимость можно отнести к недостаткам данных измерительных средств.

Применение устройств микроэлектроники и микропроцессорной техники, микроконтроллеров будет направлено на дальнейшее техническое совершенствование цифровых измерительных приборов в целях расширения их функциональных возможностей, повышения точности и оперативности.

Микропроцессор выполнен на основе больших интегральных схем, выполняет вычислительные и логические функции согласно поступающим командам. Микроконтроллер включает устройства для обработки входной информации и выполнения функций в соответствии с заданным алгоритмом (таймер, интерфейс передачи данных, цифровой порт). Цифровые измерительные приборы с использованием микропроцессорной техники позволяют выполнять управляющие функции процессом измерения, обрабатывать полученные измерительные данные, повысить точность измерения за счет реализации автоматической коррекции погрешностей результатов измерения с учетом аддитивных и мультипликативных составляющих, калибровки и поверки цифровых приборов, повысить метрологический уровень приборов и расширить их функциональные возможности.

3. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

3.1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

Электронные вольтметры. Под электронными вольтметрами понимают обычно измерители напряжения, выполненные с применением электронных схем разной степени сложности. Основными их отличительными чертами с точки зрения эксплуатации являются: весьма высокое входное сопротивление (до нескольких мегаом) и малая зависимость показаний от частоты (большой частотный диапазон от единиц герц до сотен мегагерц) при достаточно широких пределах измерения (от милливольт до сотен вольт). Эти особенности позволяют с успехом применять электронные вольтметры при исследовании и настройке различных радиоэлектронных схем. Подключение к схеме такого вольтметра ввиду высокого входного сопротивления не искажает, как правило, принципа действия схемы, не влияет на ее работу [17, 23 – 25].

Электронные вольтметры могут быть предназначены для работы как на постоянном, так и на переменном токе. В первом из этих случаев структурная схема вольтметра весьма проста (рис. 3.1).

Измеряемое напряжение сначала усиливается услителем постоянного тока (УПТ), а затем подается на индикатор. Структурная схема милливольтметра переменного тока приведена на рис. 3.2.

Индикатор в электронном вольтметре может быть применен как аналогового (стрелочного) типа, так и электронно-счетный (цифровой). Шкалы электронных вольтметров градуируются обычно в действующих значениях синусоидального напряжения. Поэтому для несинусоидальных напряжений градуировка прибора непригодна.

При проведении лабораторных работ рабочие места в лаборатории укомплектованы электронными вольтметрами универсальными цифровыми GDM-8135 [26].

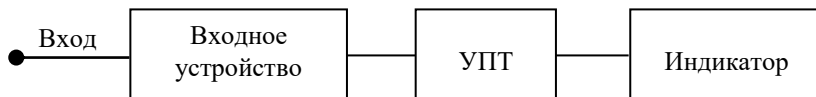


Рис. 3.1. Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока



Рис. 3.2. Структурная схема электронного вольтметра переменного тока

Цифровые вольтметры, по сравнению с аналоговыми, отличаются следующие *преимущества*: широкий диапазон измерений, обеспечивающий высокую чувствительность; представление результатов измерений в цифровой форме; автоматический выбор полярности сигналов и пределов измерений; получение результатов измерений в форме, которая позволяет вводить данные в ЭВМ; возможность подключения к шине интерфейса и включение в измерительно-вычислительный комплекс.

Развитие микроэлектроники, применение в составе вольтметров микропроцессоров позволяет усовершенствовать цифровые вольтметры и устранить имеющиеся их *недостатки*, а именно: сложность схемотехнических решений, более высокая стоимость и меньшая надежность.

Классификация цифровых вольтметров по следующим свойствам: по функциональному назначению: универсальные вольтметры для измерения напряжений переменного и постоянного токов, цифровые вольтметры постоянного тока и импульсные цифровые вольтметры.

Анализ схемотехнических решений показывает, что существуют две основные структуры построения цифровых вольтметров: структура с использованием жесткой логики и структура, применяющая микропроцессорное программное управление.

В цифровых вольтметрах реализуются три основных метода аналого-цифрового преобразования, в соответствии с которыми классифицируются цифровые вольтметры: считывания, частотно-импульсного или время-импульсного преобразования, поразрядного кодирования [17].

Описание универсального цифрового вольтметра GDM-8135

Назначение. Вольтметр GDM-8135 – универсальный цифровой прибор, который служит для измерения постоянного и переменного напряжений и токов, сопротивления постоянному току, прозвона электрических цепей и проверки *p-n*-переходов полупроводниковых приборов [25, 26].

Технические характеристики

1. Абсолютные погрешности измерения:

а) погрешность при измерении постоянного напряжения $\Delta_{н.пос}$ определяется следующим образом:

$$\Delta_{н.пос} = 0,001U_{изм} \pm 1 \text{ ед. мл. разр. ;}$$

б) погрешность при измерении переменного напряжения $\Delta_{н.пер}$ в зависимости от диапазона частот рассчитывается по формуле

$$\Delta_{н.пер} = K_d U_{изм} \pm 1 \text{ ед. мл. разр.},$$

где K_d – коэффициент, зависящий от диапазона частот, 1 ед. мл. разр. – 1 единица младшего разряда; $U_{изм}$ – диапазон измеренного напряжения, в котором проводятся измерения;

в) погрешность при измерении постоянного тока $\Delta_{т.пос.}$ определяется следующим образом:

$$\Delta_{т.пос} = K_d I_{изм} \pm 1 \text{ ед. мл. разр.},$$

где $I_{изм}$ – значение измеренного тока;

г) погрешность при измерениях переменного тока $\Delta_{т.пер}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta_{т.пер} = K_d I_{изм} \pm 1 \text{ ед. мл. разр.};$$

д) погрешность при измерении сопротивления постоянному току $\Delta_{с.пос}$ определяется по формуле

$$\Delta_{с.пос} = K_d R_{изм} \pm 1 \text{ ед. мл. разр.},$$

где $R_{изм}$ – величина измеренного сопротивления;

е) погрешность при измерении сопротивления переменному току $\Delta_{т.пер}$ рассчитывается по следующей зависимости:

$$\Delta_{т.пер} = K_d R_{изм} \pm 1 \text{ ед. мл. разр.}$$

В приведенных формулах для расчета абсолютных погрешностей измерения коэффициент K_d для соответствующего диапазона частоты или предела измерения берется из соответствующей таблицы измеряемой величины (напряжения, тока или сопротивления) руководства по эксплуатации универсального цифрового вольтметра GDM-8135.

2. Индикатор – 7-сегментный светодиодный;
3. Питание – от сети напряжением 100/120/220 или 240 В \pm 10% частотой 50...400Гц;
4. Диапазон рабочих температур – 0...50 °С при относительной влажности 10...80%.

Устройство и принцип действия цифрового вольтметра

Цифровой вольтметр состоит из трех основных блоков: схемы преобразования входного сигнала (СПВС), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и индикатора (И).

Структурная схема цифрового вольтметра представлена на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Структурная схема цифрового вольтметра

Схема преобразования входного сигнала служит для преобразования входных сигналов в соответствующую форму, необходимую для работы аналого-цифрового преобразователя. СПВС включает токовые шунты, делители напряжения, выпрямители переменного напряжения, преобразователи сопротивления, активный фильтр и переключатель. Аналого-цифровой преобразователь осуществляет преобразование аналогового сигнала, эквивалентного входному сигналу, в цифровую форму, применяемую для индикации измеряемой информации на дисплее. В процессе аналого-цифрового преобразования устраняется ошибка установки нуля. Информация с выхода АЦП в цифровой форме поступает на визуальный дисплей. Декодированная цифровая информация отображается на цифровом светодиодном индикаторе с дополнительной индикацией полярности поступающего сигнала.

*Назначение органов управления
и передняя панель цифрового вольтметра*

Назначение органов управления цифрового вольтметра представлено в табл. 3.1.

Передняя панель электронного вольтметра универсального изображена на рис. 3.4.

3.1. Назначение органов управления цифрового вольтметра

№ позиции	Орган управления	Выполняемая функция
(1)	ON/OFF	Во включенном (ON) положении подает питание на вольтметр
(2)	AC/DC	Выбор режима измерения переменного тока/напряжения или постоянного тока/напряжения
(3)	V	Выбор режима измерения напряжения постоянного или переменного
(4)	mA	Выбор режима измерения тока
(5)	KΩ	Выбор режима измерения сопротивления и прозвонки <i>p-n</i> -переходов
(6)))))	Кнопки выбора режима звуковой прозвонки
(7)	Гнезда 2 А, 20 А, V-Ω, COM	Входные гнезда COM-2 А предназначены для измерения тока до 2 А. Гнезда COM-20 А предназначены для измерения тока до 20 А. Гнезда COM-V-Ω предназначены для измерения напряжения, сопротивления, звуковой прозвонки
(8)	2, 20, ...	Выбор пределов измерений
(9)	Дисплей	Светодиодный индикатор

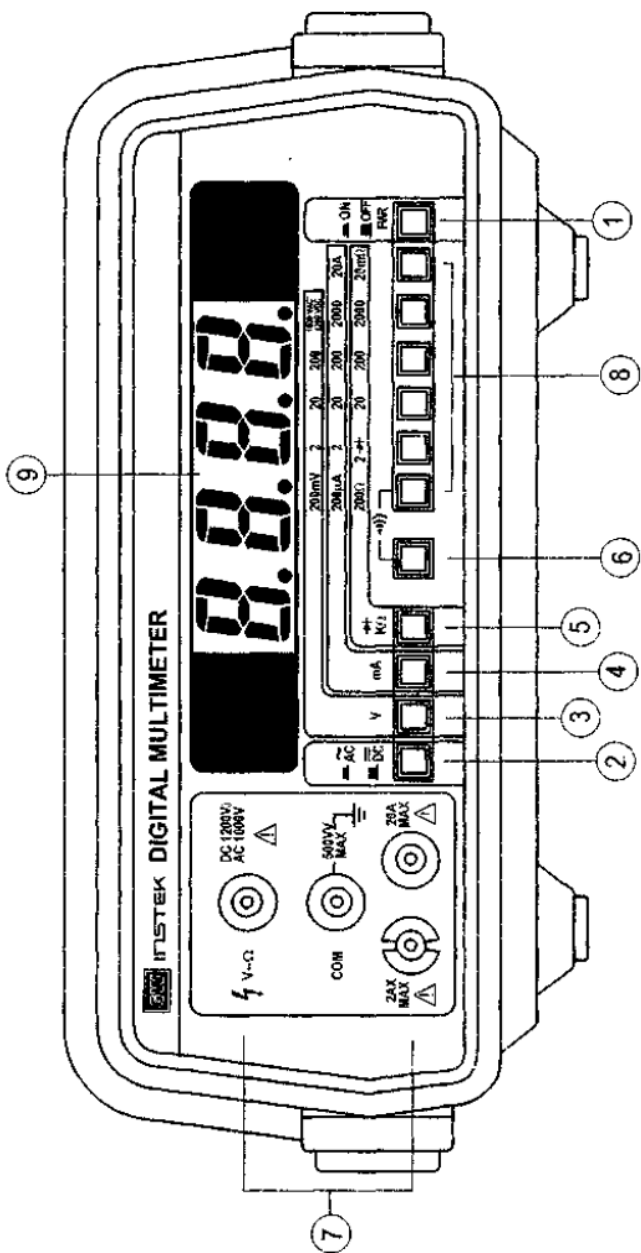


Рис. 3.4. Передняя панель электронного вольтметра универсального

Контрольные вопросы

1. Виды измерительных приборов, используемых при выполнении измерений физических величин.
2. Принцип работы цифровых измерительных приборов.
3. Основные технические характеристики измерительных приборов, принцип работы, структурные схемы и методика их применения.
4. Назначение и область применения электронных вольтметров.
5. Особенности электронных вольтметров.
6. Основные структурные компоненты электронных вольтметров.
7. Преимущества цифровых вольтметров.
8. Недостатки цифровых вольтметров.
9. Классификация цифровых вольтметров.
10. Основные структуры цифровых вольтметров.
11. Методы аналого-цифрового преобразования в цифровых вольтметрах.
12. Технические характеристики цифрового вольтметра GDM-8135.
13. Принцип действия цифрового вольтметра GDM-8135.

3.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Среди измерительных приборов, входящих в оборудование рабочего места лаборатории при изучении дисциплины «Измерительная техника и электрические измерения» важное значение при экспериментальном изучении передаточных и частотных характеристик имеют высокочастотные и низкочастотные измерительные генераторы. Основной целью при изучении измерительных генераторов является ознакомление с основными видами генераторов, используемыми в лаборатории измерительной техники, усвоить принцип действия этих приборов, правила применения, получить первоначальную практику работы с ними [17, 25 – 27].

Генераторы колебаний синусоидальной формы широко используются для исследования и настройки различных электронных устройств в диапазоне от единиц до сотен тысяч мегагерц. Перекрыть такой диапазон в одном приборе невозможно, поэтому измерительные генераторы разделяют на два вида: звуковых частот и высоких частот. Генераторы высоких частот в свою очередь делятся на генераторы радиовещательного диапазона, генераторы метровых, дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн.

Все измерительные генераторы должны обладать высокой стабильностью частоты, малым коэффициентом гармоник и иметь точную установку частоты. Измерительные генераторы звуковых частот обычно работают в диапазоне 20...20 000 Гц.

Генераторы радиовещательного диапазона работают в диапазоне 100 кГц...30 000 Гц.

Кроме перечисленных, измерительные генераторы разделяют на генераторы стандартных сигналов и генераторы сигналов. Особенности генераторов стандартного сигнала – наличие калиброванного выхода, малая величина выходного сигнала и возможность работы в режиме модулированных колебаний. Для этого в приборе используются модулятор и измеритель глубины модуляций выходных колебаний. Генераторы сигналов – источник некалиброванных по выходному напряжению (мощности) колебаний. Основной особенностью таких генераторов является наличие достаточно мощного выхода. Иногда функции генератора стандартных сигналов и генератора сигналов совмещаются в одном приборе. Структурная схема измерительного генератора приведена на рис. 3.5. В задающем генераторе возбуждаются колебания синусоидальной формы регулируемой частоты и амплитуды. Синусоидальность формы колебаний обеспечивается за счет частотно-избирательных свойств элементов LC или RC . Колебательные системы на LC элементах используются в генераторах радиовещательного диапазона. В диапазоне звуковых частот преимущественно используются элементы RC . Регулировка частоты колебаний достигается путем изменения параметров элементов LC или RC .

Каждое рабочее место в лаборатории укомплектовано двумя генераторами:

- генератором сигналов специальной формы стабильной частоты в диапазоне до 5 МГц типа GFG-8216A [27];
- звуковым генератором диапазона 20...20 000 Гц с маломощным выходом ($U_{\max} = 1...3$ В) типа ГЗ-118.

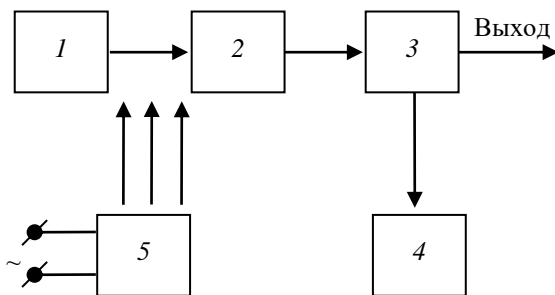


Рис. 3.5. Структурная схема измерительного генератора:

1 – задающий генератор; 2 – усилитель; 3 – выходное устройство;
4 – измерительное устройство; 5 – источник питания

Описание генератора сигналов специальной формы GFG-8216A

Назначение. Функциональный генератор является источником сигнала стабильной частоты с малым искажением сигнала. Генератор предназначен для испытания и настройки радиоэлектронных средств, испытаний на вибростойкость, ультразвуковых исследований и др. [27].

Технические характеристики:

- а) амплитуда – >10 В (при 50-омной нагрузке);
- б) частотный диапазон – 0,3 Гц...3 МГц;
- в) полное сопротивление, Ом, $50 \pm 10\%$;
- г) аттенюатор – 2 аттенюатора по -20 дБ \pm 1дБ;
- д) искажение сигнала – 80% до 1 МГц настраивается непрерывно во всем диапазоне;
- е) дисплей – 6-разрядный светодиодный;
- ж) нестабильность частоты – не более $1 \cdot 10^3 F_n$, где F_n – номинальное значение частоты;
- з) погрешность установки частоты по встроенному частотомеру – $1 \cdot 10^{-5} \pm$ импульс счета;
- и) условия эксплуатации:
комнатная температура 0...40° С,
относительная влажность 80% (максимум).

Передняя панель и назначение органов управления

Передняя панель генератора сигналов показана на рис. 3.6.

На передней панели генератора органы управления обозначены следующим образом:

- 1 – (POWER) – тумблер включения питания;
- 2 – индикатор времени счета;
- 2а – выбор времени счета;
- 3 (OVER) – индикатор (переполнения), который показывает, что входная частота превышает выбранный диапазон;
- 4 – индикатор частотомера, индицирует измеренную внешнюю частоту на 6-разрядном дисплее и установленную внутреннюю;
- 5 – индикатор частоты, показывает размерность значения частоты;
- 6 (GATE) – индикатор времени счета;
- 7 – выбор диапазона частоты;
- 8 – выбор формы сигнала;
- 9 (DUTY, ADJ) – выход преобразователя «частота–напряжение» скважность; для изменения скважности необходимо вытянуть на себя ручку для установки скважности для сигнала прямоугольной формы;
- 10 (CMOS/TTL) – если переключатель нажат, то на выходе генератора (на задней панели) будет присутствовать форма сигнала, совместимая с уровнем TTL; если вытянуть и вращать ручку, то можно настроить выходной уровень в пределах 5...15 В, совместимый с уровнями КМОП;

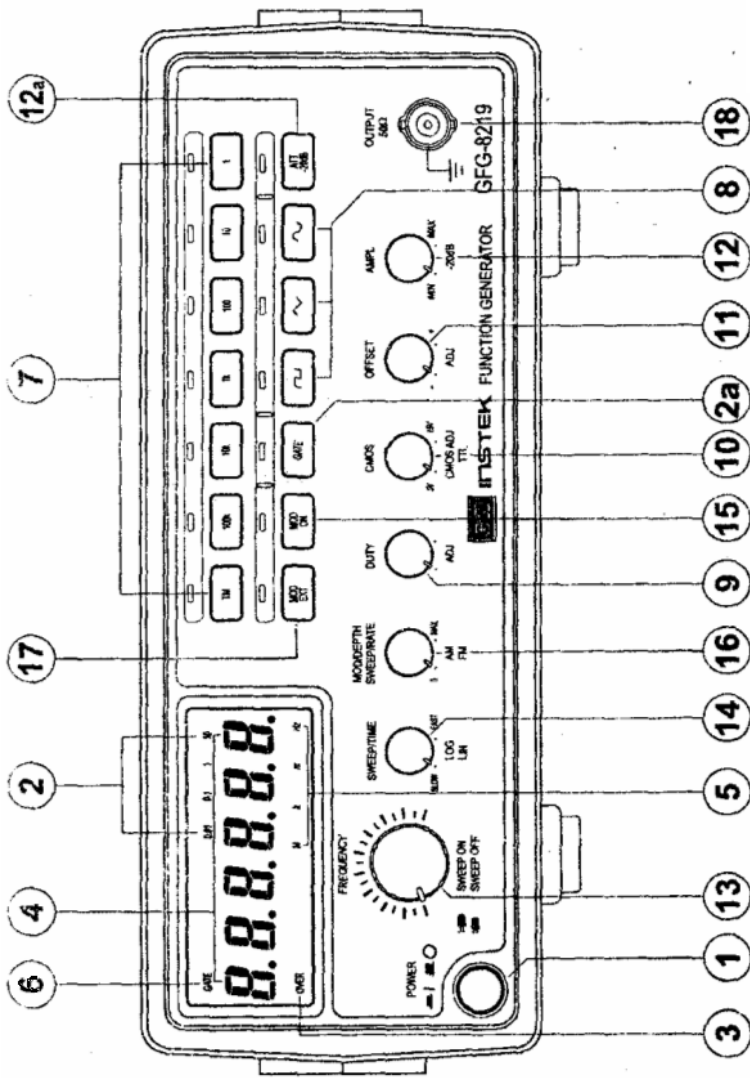


Рис. 3.6. Передняя панель генератора сигналов специальной формы

11 (OFFSET) – установка смещения выходного сигнала постоянным напряжением в диапазоне – 1...10 В;

12 (AMPL) – регулятор амплитуды выходного сигнала с возможностью ослабления;

12а (ATT) – ослабление выходного сигнала на 20 дБ;

13 (FREQUENCY) – частота;

(SWEEP ON) – свипирование включено;

(SWEEP OFF) – свипирование выключено;

При вращении регулятора изменяется частота в пределах диапазона;

14 (SWEEP/TIME) – время свипирования;

(LOG/LIN) – переключатель режимов: логарифмическое/линейное свипирование;

(SLOW) – медленно;

(FAST) – быстро;

15 (MOD) – модуляция выходного сигнала внутренним 400-герцовым синусоидальным сигналом;

(ON/OFF) – выключатель;

16 (MODULATION DEPTH) – параметры модуляции;

(SWEEP RATE) – глубина свипирования;

(AM, FM) – установка параметров амплитудной и частотной модуляции;

17 (MOD, EXT) – режим внешней модуляции;

(MOD, INT) – режим внутренней модуляции;

18 (OUTPUT) – основной выход.

В настоящее время находят широкое применение цифровые генераторы сигналов.

Принцип действия цифрового генератора заключается в формировании числовых кодов с последующим преобразованием их в аналоговые гармонические сигналы, которые аппроксимируются функцией, моделируемой с использованием цифроаналогового преобразователя.

Преимуществом цифровых генераторов, по сравнению с аналоговыми, являются более точные метрологические характеристики – низкий коэффициент гармоник, стабильный выходной сигнал, точность установки и стабильность частоты. Цифровые генераторы позволяют осуществлять автоматическую подстройку частоты программным способом.

Контрольные вопросы

1. Типы генераторов, применяемых при выполнении лабораторных работ, диапазоны их выходных сигналов.

2. Методики измерения периодов, амплитуд сигналов, их частоты.

3. Принцип работы цифровых измерительных приборов.
4. Основные технические характеристики измерительных приборов, принцип работы, структурные схемы и методика их применения.
5. Результат измерений и осциллограммы по пунктам задания.
6. Назначение и область применения генераторов.
7. Основные структурные компоненты генераторов.
8. Классификация генераторов в соответствии с частотным диапазоном.
9. Структурная схема измерительного генератора.
10. Принцип действия генератора сигналов специальной формы GFG-8216A.
11. Технические характеристики генератора сигналов специальной формы GFG-8216A.

3.3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Электронный осциллограф предназначен для визуального наблюдения электрических колебаний и изменения параметров. На рисунке 3.7 показана упрощенная структурная схема осциллографа, отражающая основные принципы его работы. Индикатором осциллографа является электронно-лучевая трубка, на экране которой электронным лучом рисуется изображение исследуемого сигнала. Для получения такого изображения на пластины горизонтального отклонения трубки подается пилообразное напряжение развертки (рис. 3.8), которое обеспечивает перемещение электронного луча с постоянной скоростью.

Масштаб изображения по вертикали определяется амплитудой колебания, поступающего на пластины вертикального отклонения, и при фиксированной амплитуде исследуемых колебаний может изменяться за счет изменения коэффициента передачи канала вертикального отклонения (Y -канал). Большие сигналы должны ослабляться в Y -канале, а малые – усиливаться. Это определяет необходимую структуру Y -канала как последовательного соединения делителя входного напряжения с усилителем. Коэффициенты передачи делителя и усилителя должны регулироваться и не зависеть от частоты входных колебаний. Часть схемы осциллографа, связанная с пластинами горизонтального отклонения, носит название X -канала.

Основными элементами X -канала являются генератор развертки и устройство синхронизации. Роль генератора развертки очевидна

из самого принципа осциллографирования. Устройство синхронизации предназначено для получения четкой картины на экране осциллографа. Она будет четкой, если отношение

$$\frac{F_{\text{сигн}}}{F_{\text{разв}}} = \frac{T_{\text{разв}}}{T_{\text{сигн}}}$$

будет равно целому числу.

При этом кривые, прочерчиваемые лучом за время каждого хода развертки, точно совпадают друг с другом, образуя неподвижное изображение. Практически абсолютной стабильности частот добиться невозможно, поэтому величина отношения $F_{\text{сигн}}/F_{\text{разв}}$ в процессе работы может меняться, и изображение на экране «плывет» или кажется размазанным (рис. 3.9). Устройство синхронизации поддерживает отношение $F_{\text{сигн}}/F_{\text{разв}}$ неизменным, подгоняя автоматически частоту развертки под частоту сигнала.

Рабочие места в лаборатории укомплектованы осциллографами типа GOS-620FG [28].

Описание осциллографа универсального GOS-620

Назначение. GOS-620 – это двухканальный осциллограф со встроенным многофункциональным генератором, обеспечивает визуализацию входных сигналов. Осциллограф имеет 6-дюймовую (12,5 см) прямоугольную электронно-лучевую трубку с красной внутренней шкалой.

Технические характеристики.

1. Тракт вертикального отклонения:
 - а) чувствительность – 5 мВ/дел...5 В/дел;
 - б) погрешность – $\pm 3\%$;
 - в) полоса пропускания – 0...20 МГц;
 - г) входное сопротивление и емкость – 1 МОм $\pm 2\%$;
 - д) режимы работы – СН 1 – (только канал 1), СН 2 – (только канал 2), DUAL – (каналы 1 и 2), автовыбор, ADD – (алгебраическое сложение каналов 1 и 2);
 - е) входы усилителя – АС (закрытый вход), DC (открытый вход);
 - ж) максимальное входное напряжение – 300 В.
2. Тракт горизонтального отклонения:
 - а) коэффициенты развертки – 0,2 мкс...0,5 с/дел;
 - б) погрешность – $\pm 3\%$;
 - в) множитель развертки – 10 раз (максимум 100 нс/дел);

- г) линейность – $\pm 3\% \cdot 10 \text{ МАГ}$;
- д) полоса пропускания – $\text{DC} \sim 500 \text{ кГц}$.
- 3. Функциональный генератор:
 - а) диапазон частот – $0,1 \dots 1,0 \text{ МГц}$;
 - б) форма выходного сигнала – прямоугольник, синус, треугольник;
 - в) выходное сопротивление – $(50 \pm 5) \text{ Ом}$;
 - г) выходное напряжение – до 14 В ;
 - д) коэффициент нелинейных искажений и фазовый дрейф – не более 2% .

4. Диапазон рабочих температур – $(10 \dots 35) \text{ }^\circ\text{C}$.

Передняя панель и назначение органов управления

Передняя панель осциллографа изображена на рис. 3.10.

На передней панели осциллографа органы управления обозначены следующим образом:

- 1 (CAL) – выход калибратора 2 В и частотой 1 кГц ;
- 2 (INTEN) – регулировка яркости изображения;
- 3 (FOCUS) – регулировка фокуса изображения;
- 4 (TRACE ROTATION) – поворот, регулировка изображения параллельно линиям шкалы;
- 5 (POWER) – индикатор сети;
- 6 (POWER) – выключатель сетевого питания;
- 7, 22 (VOLTS/DIV) – вольт/дел, устанавливают коэффициенты отклонения каналов;
- 8 (CH 1) – вход канала 1 (X);
- 9, 21 (VARIABLE) – плавное изменение коэффициентов отклонения каналов;
- 10, 18 (AC – DC – GND) – переключатель режима входов усилителя, AC – закрытый вход, DC – открытый вход;
- 11, 19 (POSITION) – регулировка положения лучей обоих каналов по вертикали;
- 12 (ALT/CHOP) – при отжатой кнопке режим работы коммутатора выбирается автоматически, при нажатии – коммутатор переключается в режим попеременный;
- 13, 17 (CH 1, CH 2 DC BAL) – балансировка каналов 1 и 2;
- 14 (VERT MODE) – переключатель режима работы усилителя; CH 1 – канал 1, CH 2 – канал 2, ALT – два канала; ADD – сумма или разность сигналов каналов 1 и 2;
- 15 (GND) – гнездо подключения заземления;
- 16 (INV CH2) – инвертирование сигнала в канале 2;

- 20 (CH 2) – вход канала 2 (Y);
- 23 (SOURCE) – выбирается режим внутренней синхронизации и внешней;
- 24 (EXT TRIGIN) – вход сигнала внешней синхронизации;
- 25 (TRIGER MODE) – выбор режима работы запуска развертки;
- 26 (SLOPE) – переключатель полярности синхронизирующего сигнала;
- 27 (TRIG. ALT) – развертка синхронизируется сигналом с 1-го и 2-го каналов, (LINE– синхронизация от сети, (EXT) – синхронизация внешним сигналом;
- 28 (LEVEL) – выбор уровня исследуемого сигнала;
- 29 (ВРЕМЯ/ДЕЛ) – установление коэффициента развертки;
- 30 (SWP. VAR) – плавная регулировка коэффициента развертки;
- 31 (* 10 MAG) – увеличение скорости развертки в 10 раз;
- 32 (POSITION) – перемещение изображения по горизонтали;
- 33 (FILTER) – фильтр;
- 34 (Z) – вход для подачи сигнала, модулирующего яркость луча;
- 35 (CH 1) – выход сигнала канала 1;
- 36 – ВХОД СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ;
- 37 – предохранители;
- 38 – ножки осциллографа;
- 39 (GENERATOR OUTPUT) – выход генератора (50 Ом);
- 40 (WAVERFORM SELECTOR) – изменение формы сигнала;
- 41 (OUTPUT WAVERFORM DISPLAY) – индикатор формы сигнала;
- 42 (FREQ RANGE) – установка диапазона частоты выходного сигнала;
- 43 (FREQUENCY RANGE DISPLAY) – индикатор диапазона;
- (AMPLITUDE/ DC LEVEL) – изменение амплитуды выходного сигнала;
- 44 (FREQUENCY) – плавная перестройка частоты.

Меры безопасности при работе с измерительными приборами

1. Прежде чем приступить к выполнению практических занятий, необходимо изучить руководство по эксплуатации измерительного прибора.
2. Запрещается снимать при работе с приборами защитный кожух.
3. Необходимо заземлить корпус прибора перед подключением к источнику питания.

4. После выключения прибора нельзя касаться высоковольтных конденсаторов в течение 5...7 мин.

5. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить используемый в работе источник питания.

6. При работе с измерительными приборами следует использовать изолирующий материал на полу Вашего рабочего места.

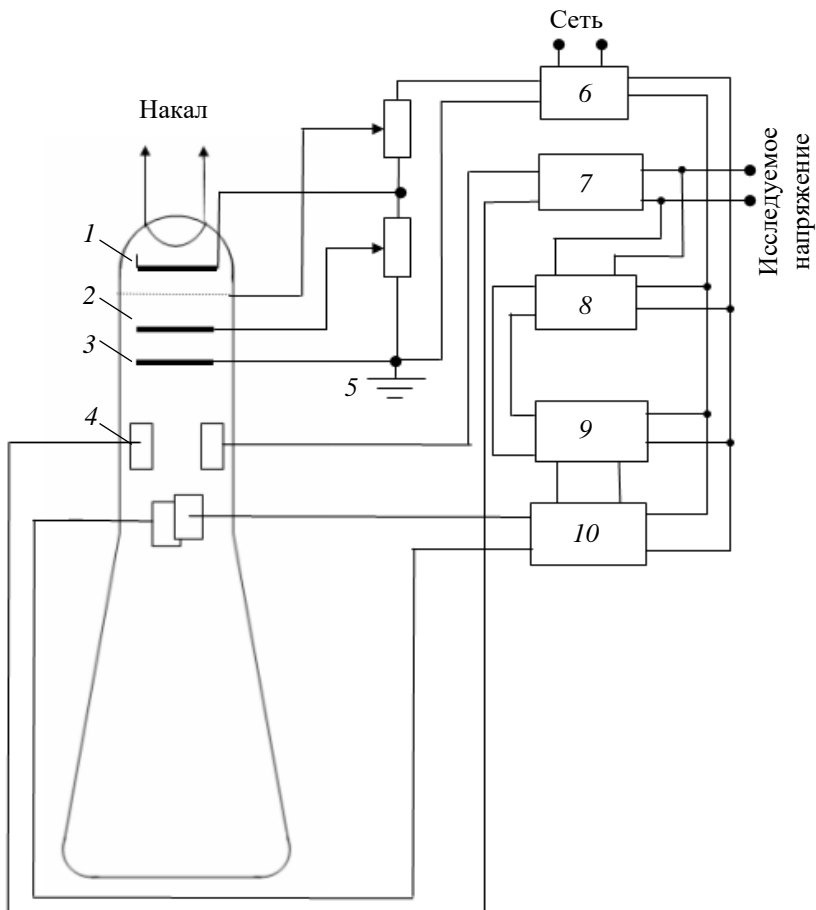


Рис. 3.7. Структурная схема осциллографа:

1 – модулятор; 2 – первый анод; 3 – второй анод; 4 – экран;

5 – делитель напряжения; 6 – источник питания;

7 – усилитель исследуемого напряжения; 8 – узел синхронизации;

9 – генератор развертки; 10 – усилитель развертываемого напряжения

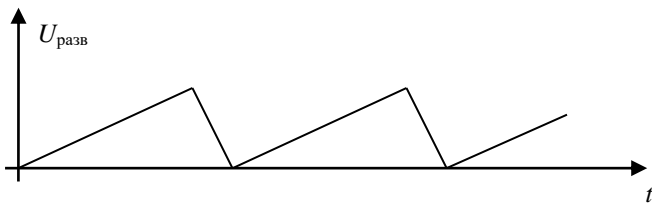
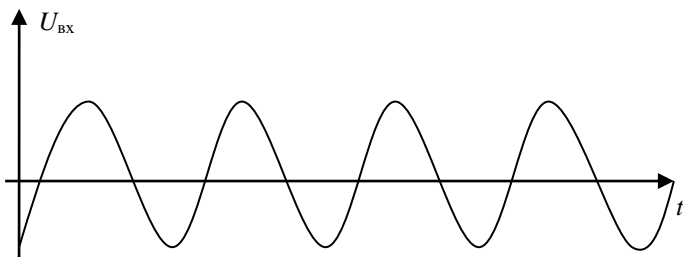
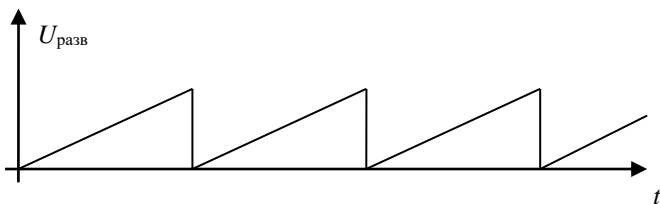


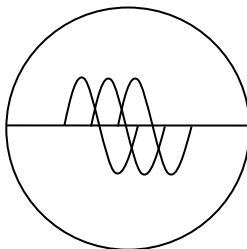
Рис. 3.8. пилообразное напряжение



а)



б)



в)

Рис. 3.9. Изображение сигналов на экране осциллографа:

а – сигнал входного напряжения $U_{вх}$; б – сигнал напряжения развертки $U_{разв}$;

в – изображение сигнала на экране, когда нет синхронизации

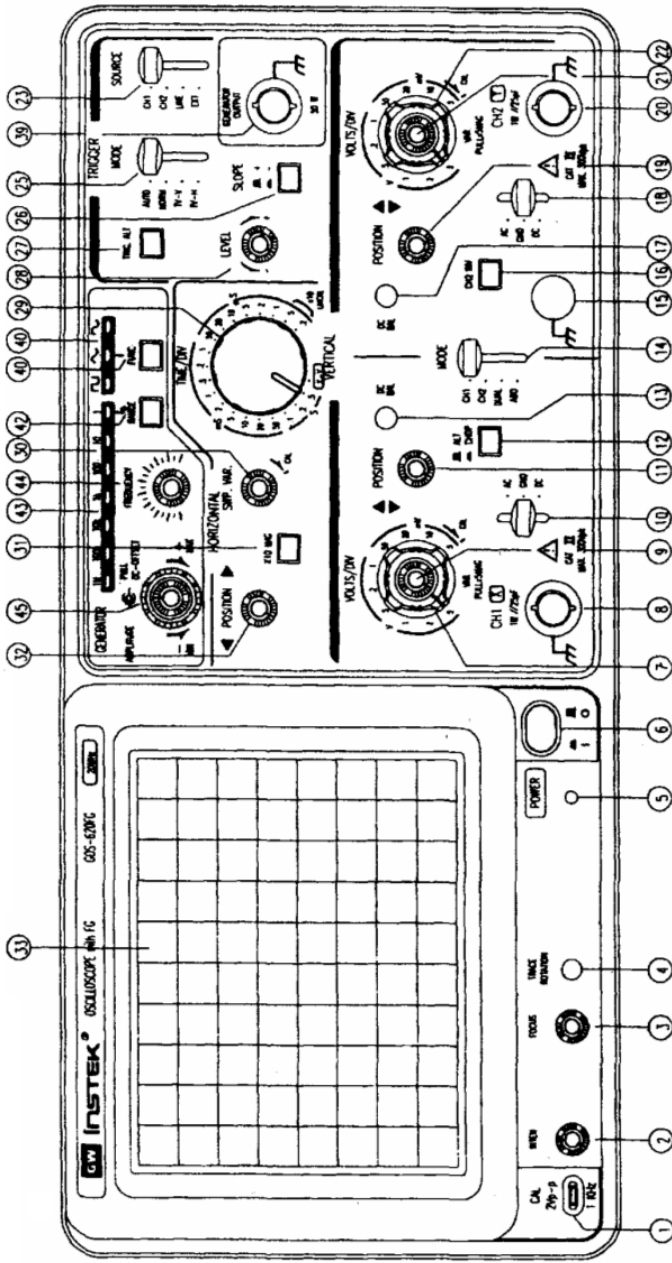


Рис. 3.10. Передняя панель осциллографа

Контрольные вопросы

1. Назначение и область применения осциллографа.
2. Основные структурные компоненты осциллографа.
3. Принцип действия осциллографа универсального GOS-620.
4. Технические характеристики и параметры осциллографа универсального GOS-620.
5. Назначение органов управления осциллографа универсального GOS-620 на лицевой панели.
6. Выполняемые функции осциллографом универсальным GOS-620.

3.4. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Информационно-измерительная система (ИИС) *предназначена* для автоматического получения количественной информации от исследуемых объектов в результате реализации процессов контроля и измерения, последующей обработки измерительной информации и передачи информации пользователю [6, 30, 31]. Пользователь получает необходимую количественную информацию об объектах исследования в требуемом виде с использованием графических и математических зависимостей, таблиц, текста. В соответствии с ГОСТ 8437–81 ИИС представляет собой «совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки в целях представления потребителю в требуемом виде либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации» [31].

Область применения ИИС: промышленные предприятия, сельскохозяйственное производство, медицина, космос, связь, научные исследования, системы автоматического управления.

Функции информационно-измерительной системы заключаются в управлении измерительным процессом в соответствии с назначением ИИС и поставленной целью, формировании измерительной информации, получаемой от исследуемых объектов; обработке данных, передаче информации пользователю, индикации и хранении результатов измерений, а также возможности формирования управляющих сигналов. Выполнение функций с использованием информационно-измерительных систем оценивается рядом критериев по оценке надежности, точности, быстродействию, помехоустойчивости, адаптивности, пропускной способности, совместимости технической, методической, информационной и метрологической с аналогичными информационно-измерительными системами [6, 30, 31].

Характеристики измерительных систем

Эффективность. Эффективностью называется соотношение между достигнутыми результатами информационно-измерительной системы и планируемыми показателями для оценки улучшения функционирования ИИС. При сравнении рассматриваемых информационно-измерительных систем применяются нормированные показатели эффективности, которые называются коэффициентами эффективности.

Полнота реализуемых функций ИИС, которая устанавливает степень применения в объектах при мониторинге контролируемых параметров информационно-измерительных систем.

Достоверность позволяет обосновать параметры и характеристики информационно-измерительной системы при использовании критериев для ее оценки. Установление достоверности осуществляется с использованием критериев надежности и помехоустойчивости структурных компонентов системы, точности определения параметров мониторинга исследуемого объекта и глубины контроля. Если достоверность уменьшается, то увеличивается вероятность неработоспособности исследуемых объектов при соответствии обрабатываемой информации заданным интервалам допусков.

Надежность оценивается выбранными критериями в соответствии с видом информационно-измерительных систем и поставленными задачами. При оценке надежности ИИС применяются критерии средней наработки на отказ и до отказа, среднего времени восстановления, интенсивности отказов, вероятности безотказной работы ИИС в течение заданного временного промежутка, коэффициента готовности измерительной системы.

Быстродействие информационно-измерительной системы определяется средним временем выполнения различных операций в ИИС при реализации следующих режимов работы в системе: контроль, измерение, формирование управляющих сигналов, диагностика и др. с учетом времени проведения дополнительных операций подготовки ИИС при функционировании в заданном температурном режиме и подключении необходимого оборудования. Информационный критерий характеризует быстродействие информационно-измерительной системы на основе учета количества информации, которое обрабатывается за единицу времени.

Характеристика входов и выходов ИИС содержит информацию о данных входов ИИС и устройств индикации получаемой информации, например дисплеев.

Характеристика технических средств включает информацию о применяемых электронных компонентах, дополнительных блоках, используемом вспомогательном оборудовании с указанием их условий эксплуатации.

В соответствии с выполняемыми функциями *информационно-измерительные системы* разделяются на следующие виды: измерительные системы независимых входных величин, к которым относятся многоточечные и мультиплицированные, сканирующие системы для расшифровки графиков, голографические, многомерные и аппроксимирующие, статистические измерительные системы; телеизмерительные, которые подразделяются на аналоговые, цифровые и адаптивные; технической диагностики и распознавания образов [31].

В информационно-измерительных системах применяются *различные связи* при взаимодействии с другими ИИС: прямые, косвенные, совместные и совокупные [6].

Измерительные системы *по измеряемым физическим величинам* подразделяются на ИИС для измерения электрических и неэлектрических величин, например тока, напряжения и мощности.

ИИС *по методам сбора и обработки информации* могут быть параллельными, последовательными, параллельно-последовательными и мультиплицированными.

В ИИС реализуются следующие *методы измерительных преобразователей*: прямых преобразований, развертывающих уравновешиваний, следящих уравновешиваний.

Структура информационно-измерительных систем должна соответствовать техническим требованиям, которые устанавливаются ГОСТом.

Виды структур ИИС зависят от формирования информационных каналов передачи информации между структурными компонентами измерительной системы, в соответствии с которыми различают цепочечные, радиальные и магистральные структуры системы. Структура ИИС и выполняемые функции зависят от объекта, для которого разрабатывается информационно-измерительная система.

Для функционирования ИИС необходимо сформировать комплексное взаимодействие операторов и технических средств для реализации процесса измерения с использованием ИИС на основе созданных информационного, математического, методического, программного, метрологического и организационного обеспечений.

Технические средства ИИС позволяют реализовать алгоритм функционирования системы с использованием комплекса структурных

компонентов, которые входят в состав информационно-измерительной системы: первичные измерительные преобразователи – аналоговые и цифровые датчики, тип которых зависит от контролируемых параметров исследуемого объекта; измерительные преобразователи, соответствующие применяемым датчикам; элементы сравнения (меры); цифровые устройства для обработки измерительной информации; различные блоки индикации и отображения получаемой информации об объекте исследования.

Информационное обеспечение измерительной системы включает методы и средства представления информации об исследуемом объекте в требуемом пользователями виде (документы, таблицы, графические зависимости), которые используются для статистического анализа, обработки и принятия необходимых решений в случае реализации управляющих функций при эксплуатации объекта.

Математическое обеспечение ИИС разрабатывается на основе созданных моделей и вычислительных алгоритмов.

Методическое обеспечение ИИС позволяет реализовать различные методы определения параметров измеряемых физических величин исследуемых объектов.

Программное обеспечение ИИС предназначено для реализации разработанного алгоритмического обеспечения информационно-измерительных систем, включающего алгоритмы функционирования ИИС и принятия решений при проведении измерений физических величин.

Алгоритмическое обеспечение ИИС включает математические модели и алгоритмы измерений. *Математические модели* исследуемых объектов разрабатывают следующими методами: аналитическим; экспериментальным и экспериментально-аналитическим. Разработка математических моделей позволяет получить в формализованном виде информацию об объектах исследования, которая применяется при решении оптимизационных задач с использованием персональных компьютеров в процессе разработки информационно-измерительных систем. В математической модели объекта устанавливается зависимость входных и выходных переменных в статическом и динамическом режимах при учете граничных условий и интервале допускаемых значений переменных математической модели. Разрабатываются математические модели исследуемых объектов с сосредоточенными параметрами при изменении переменных модели во времени и с распределенными параметрами, если переменные модели могут изменяться и во времени, и в пространстве. В формализованном виде математическая

модель представляется дифференциальными уравнениями, в частных производных и др., а также с использованием переходных и передаточных функций, частотных характеристик и т.д.

Развитие микроэлектроники и схемотехники позволило в настоящее время создать адаптивные к объекту исследования, программируемые в соответствии с алгоритмом функционирования информационно-измерительные системы. Создание микропроцессоров, микроконтроллеров и персональных компьютеров, актуального математического и программного обеспечений, баз знаний для соответствующей предметной области объектов исследования привело к разработке интеллектуальных и виртуальных информационно-измерительных систем.

Контрольные вопросы

1. Назначение и область применения различных видов информационно-измерительных систем.
2. Назовите функции, которые реализуют информационно-измерительные системы.
3. Существующие виды информационно-измерительных систем.
4. С использованием каких технических средств реализуются информационно-измерительные системы?
5. Виды обеспечений информационно-измерительных систем при их функционировании.
6. Что включает алгоритмическое обеспечение информационно-измерительных систем?

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практическое занятие 1

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель практического занятия – изучение методов измерения физических величин.

Краткие теоретические сведения

Метод измерения выбирается в соответствии с видом измеряемой физической величины. Суть методов измерений заключается в сравнении измеряемых величин с их единицами согласно реализуемым принципам измерения. Принципы измерений отражают физические явления или эффекты, на основе которых проводятся измерения. Применяемые методы измерений должны обеспечивать минимальные погрешности измерений, содействовать минимизации или исключению систематической погрешности, а также отнесению их к разряду случайных [32 – 36].

Классификация методов измерений осуществляется по физическим принципам, в соответствии с которыми проводятся измерения на основе взаимодействия измерительного средства и объекта измерения, а также от условий взаимодействий измерительных датчиков и исследуемых объектов. Существуют два основных метода измерений: непосредственной оценки и сравнения с мерой. *Метод непосредственной оценки* заключается в определении значений измеряемых величин по устройствам индикации измерительных приборов, которые представляют собой или отсчетные устройства со шкалой и стрелочным указателем или цифровые табло.

Метод сравнения с мерой состоит в том, что измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. К методу сравнения относятся ряд методов: противопоставлений, нулевые, замещения, дифференциальные и совпадений.

Метод противопоставления заключается в одновременном воздействии измеряемой величиной и величиной, которая воспроизводится мерой, на управляющее устройство сравнения, которое позволяет установить определенное соотношение данных величин.

Нулевой метод заключается в сведении к нулю полученного результата при воздействии измеряемых величин и меры на приборы сравнения.

В *методе замещения* измеряемые величины замещаются мерой, для которой известно значение величины.

Дифференциальный метод реализует функцию сравнения измеряемых величин и однородных величин, которые характеризуются известными значениями, незначительно отличающимися от значений измеряемых величин, и измерения разности между этими величинами.

Метод совпадения заключается в измерении разности измеряемых величин и величин, которые воспроизводятся мерой на основе использования совпадений отметок шкал или периодических сигналов.

Существуют значительные отличия в методах измерения и методиках проведения измерения. *Методика выполнения измерений* включает операции и правила для выполнения измерения физических величин, которые позволяют обеспечить точность полученных результатов измерения физических величин согласно используемому *методу измерения*.

Практическое задание 1.1

На рисунке 4.1 представлена принципиальная электрическая схема, для которой необходимо определить величину сопротивления R_2 .

При определении значения сопротивления R_2 использовать метод замещения [35]. При переводе переключателя S в положение 1 образцовое сопротивление R_1 подсоединяется к источнику напряжения E . В этом случае отклонение указателя отсчетным устройством гальванометра Γ составляет $N = 40$ делений.

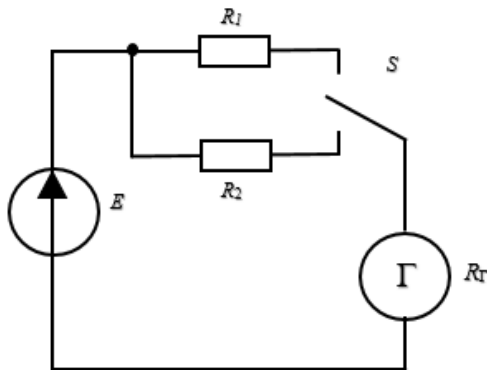


Рис. 4.1. Принципиальная электрическая схема измерения сопротивления R_2

Таблица 4.1

Значения исходных данных	№ варианта заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1 , кОм	120	140	220	200	220	130	250	210	100	110
R_r , кОм	0,6	0,5	0,8	0,7	1,0	0,4	1,2	0,3	0,8	0,5
N_i , кОм	10	12	11	19	17	20	18	14	13	15

При переводе переключателя S в положение 2 измеряемое сопротивление R_2 подсоединяется к источнику напряжения E . В этом случае отклонение указателя отсчетным устройством гальванометра Γ составляет N_i делений. На рисунке 4.1 обозначено внутреннее сопротивление гальванометра R_r .

Значения исходных данных и варианты для выполнения практического задания 1.1 представлены в табл. 4.1.

Практическое задание 1.2

На рисунке 4.2 представлена принципиальная электрическая схема, для которой необходимо определить величину сопротивления R_2 .

При определении значения сопротивления R_2 использовать метод одного амперметра [35]. Установить зависимость в виде формализованного выражения, которая показывает связь элементов в электрической цепи E , R_1 , R_2 , R_A и ток I . Определить значение резистора R_1 при выполнении измерений R_2 в заданном интервале значений $0 \dots 200$ кОм. Значения исходных данных и варианты для выполнения практического задания 1.2 представлены в табл. 4.2.

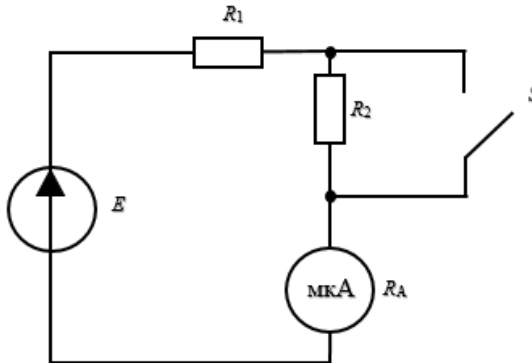


Рис. 4.2. Принципиальная электрическая схема измерения сопротивления R_2

Таблица 4.2

Значения исходных данных	№ варианта заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_A , мВ	65	75	85	70	75	65	80	75	70	85
I_A , мкА	50	70	75	55	50	80	65	55	70	65
E , В	2,0	1,6	1,7	19	1,5	2,0	1,8	1,4	1,3	1,5

При вычислении R_2 использовать значения источника ЭДС E , падение напряжения на магнитоэлектрическом микроамперметре U_A и ток полного отклонения I_A .

Контрольные вопросы

1. Назовите различия метода измерения и методики проведения измерений.
2. Какие Вы знаете физические явления, на которых основано измерение физических величин?
3. В чем заключаются методы измерений физической величины: непосредственной оценки и сравнения с мерой?
4. В чем заключается метод противопоставления при измерении физической величины?
5. В чем состоит нулевой метод противопоставления при измерении физической величины?
6. Характеристика видов измерений: прямые, косвенные, совместные и совокупные.
7. Оформление результатов измерений физических величин с использованием измерительных приборов.
8. Виды методов измерений физических величин.
9. Характеристика метода замещения при измерении физической величины.
10. Последовательность реализации дифференциального метода измерения физической величины.
11. Изложите сущность метода совпадения при измерении физической величины.

Практическое занятие 2

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель практического занятия – изучить основные сведения теории погрешностей измерения и освоить методику расчета погрешностей измерений физических величин.

Краткие теоретические сведения

Результаты измерений физических величин зависят от погрешностей методов измерений, измерительных приборов и воздействующих дестабилизирующих факторов. Погрешность измерения определяется разностью измеренной величины и истинным значением полученной в результате измерения величины [34].

К погрешностям измерений относятся относительные, абсолютные, приведенные. *Абсолютная погрешность* измерения является разностью значений измеренной величины и истинного значения:

$$\Delta = x_{\text{и}} - x_{\text{ис}},$$

где $x_{\text{и}}$, $x_{\text{ис}}$ – соответственно измеренное и истинное значения величины.

Относительная погрешность измерения определяется отношением рассчитанных абсолютных погрешностей измеряемых величин к их истинным значениям:

$$\delta = \Delta / x_{\text{ис}}.$$

Приведенная погрешность находится в результате отношения абсолютных погрешностей измерений к нормированным значениям измеряемых величин:

$$\lambda = (\Delta / x_{\text{н}}) \cdot 100\%,$$

где $x_{\text{н}}$ – нормированное значение измеряемой величины.

В случае проведения многократных измерений истинным значением может быть *среднее арифметическое значение* измеряемой величины, которое определяется по формуле

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где $x_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение измеряемой величины; x_i – значение измеренного результата; n – количество полученных результатов измерения.

Среднее квадратическое отклонение серии результатов измерений определяют по следующей зависимости:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2}{n - 1}},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение результатов измерений.

Существуют определенные виды погрешностей, зависящие от причин их формирования: случайная, систематическая, прогрессирующая и грубая (промах).

Случайная погрешность входит в состав погрешностей измерений при проведении ряда повторяющихся измерений в одинаковых условиях в результате воздействия внешних и внутренних дестабилизирующих

факторов. Случайная погрешность устанавливается по результатам измерения при отсутствии закономерности ее формирования.

Систематическая погрешность входит в состав погрешностей измерений в случае проведения неоднократных измерений при одинаковых условиях. Для систематической погрешности характерно то, что она может быть постоянной в составе погрешности измерения или изменяться по известной закономерности, что позволяет ввести поправки в результаты измерения.

В состав систематической погрешности входят ее составляющие: субъективная, методическая и инструментальная. *Субъективная систематическая погрешность* определяется индивидуальными особенностями пользователя измерительными средствами при считывании и представлении результатов измерения. *Методическая составляющая погрешностей* зависит от несовершенства применяемых методов и средств измерений, неточности расчетных формул определяемых параметров и округления полученных значений. *Инструментальная составляющая погрешности* формируется в результате наличия погрешностей применяемых измерительных средств, которые зависят от класса точности и разрешающей способности измерительных приборов.

Прогрессирующая (дрейфовая) погрешность характеризуется медленным изменением с течением всего промежутка времени, за который проводятся измерения. Коррекция результатов измерения на основе введения поправок возможна в рассматриваемый момент времени для получения точных результатов.

Грубая погрешность (промах) относится к случайным погрешностям, которые значительно отличаются от полученных результатов при проведении неоднократных измерений в одинаковых условиях. Грубые погрешности (промахи) определяются неправильной эксплуатацией измерительных приборов и ошибками пользователей средств измерений, а также внезапными изменениями условий окружающей среды при проведении измерений.

Статические и динамические погрешности определяются внешними и внутренними факторами и условиями проведения измерений. *Статические погрешности* не зависят от скорости изменения измеряемых физических величин с течением времени. На *динамические погрешности* влияет скорость изменения измеряемых величин за временной промежуток.

Основная и дополнительная погрешности измерительных средств зависят от влияния внешних факторов окружающей среды. *Основная погрешность* измерительных приборов определяется при нормальных условиях их эксплуатации. *Дополнительная погрешность* измерительных средств формируется в результате изменения воздействующего дестабилизирующего фактора.

Практическое задание 2.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

В процессе определения параметров электрической цепи измерен ток, который равен $I_{и} = 15$ мА. Действительное значение тока равно $I_{д} = 14,5$ мА.

Найти абсолютную и относительную погрешности измерения. Абсолютная погрешность измерения определяется как разность между измеренным и действительным значениями измеряемой величины:

$$\Delta I - I_{и} - I_{д} = 15 \text{ мА} - 14,5 \text{ мА} = 0,5 \text{ мА}.$$

Относительная погрешность измерения равна отношению абсолютной погрешности измерения, отнесенной к действительному значению измеряемой величины (рассчитывается в процентах):

$$\delta = (\Delta I / I_{д}) \cdot 100\% = (0,5 \text{ мА} / 14,5 \text{ мА}) \cdot 100\% = 3,45\%.$$

Практическое задание 2.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Введение поправок в результаты измерения позволяет исключить систематические погрешности полученных результатов измерений. Поправки для исключения систематических погрешностей $x_{п}$ вводятся в результаты измерения параметра объекта в соответствии с указанными зависимостями при воздействии следующих внешних факторов [34]:

а) воздействие температуры окружающей среды:

$$x_{п,t} = -A [\alpha_1(t_1 - 20 \text{ }^\circ\text{C}) - \alpha_2(t_2 - 20 \text{ }^\circ\text{C})],$$

где t – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; t_1, t_2 – значение температуры соответственно измерительного средства и исследуемого объекта, $^\circ\text{C}$; A – параметр, подлежащий измерению, м; α_1 – коэффициент линейного расширения измерительного средства, α_2 – коэффициент линейного расширения исследуемого объекта, 10^{-6} град $^{-1}$ (соответственно $22,3 \cdot 10^6$ и $15,2 \cdot 10^6$);

б) относительная скорость изменения внешней среды:

$$x_{п,v} = V^2 l_{н} / 24F^2,$$

где v – относительная скорость изменения внешней среды, м/с; V – допустимое значение силы ветра, H ; $l_{н}$ – номинальная длина измерительного прибора, м; l_i – действительная длина измерительного прибора, м; абсолютная погрешность измерения длины будет равна $\Delta l = l_i - l_{н}$, м; F – сила натяжения измерительного прибора, H ;

в) длина шкалы средства измерения:

$$x_{п,l} = (A / l_{н}) \Delta l ;$$

Таблица 4.3

Значения исходных данных	№ варианта заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A, \text{ м}$	0,80	0,81	0,79	0,82	0,83	0,80	0,78	0,79	0,81	0,82
$l_{\text{н}}, \text{ м}$	0,500	0,510	0,509	0,508	0,499	0,507	0,510	0,509	0,500	0,510
$l_i, \text{ м}$	0,505	0,515	0,514	0,512	0,454	0,511	0,514	0,514	0,505	0,514
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	20	23	22	20	19	21	23	22	20	19
$t_1 = t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	18	21	20	18	17	19	21	20	18	17
$b, \text{ м}$	0,01	0,05	0,04	0,01	0,03	0,02	0,05	0,04	0,01	0,03
F, H	10	9	11	7	8	10	9	11	7	8
V, H	0,5	0,6	0,4	0,3	0,7	0,6	0,5	0,3	0,7	0,4

г) несоответствие направлений линии измерения и измеряемой физической величины:

$$x_{\text{п},b} = b^2 / 2A ,$$

где b – величина отклонения направления измерения от направления измеряемого размера, м.

Согласно заданию необходимо определить систематические погрешности в соответствии с исходными данными, приведенными в табл. 4.3. Представить результаты расчета систематической погрешности при учете заданных параметров.

Контрольные вопросы

1. Определения абсолютной и относительной погрешностей измерений физической величины.
2. Как определяется приведенная погрешность измерений?
3. Выполнение расчета среднеарифметического значения результатов измерений.
4. Как рассчитывается среднее квадратическое отклонение серии результатов измерений?
5. Методика определения случайной погрешности результатов измерений физической величины.
6. Определение эталонов и их назначение в теории измерений и применение.
7. Какая погрешность называется систематической?
8. Назовите виды систематических погрешностей и в чем их различие?
9. Какая погрешность называется прогрессирующей?
10. Какие факторы определяют грубую погрешность или промах?
11. Как формируются основная и дополнительная погрешности измерительных средств?

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ
ПРИ МНОГОКРАТНОМ ИЗМЕРЕНИИ
ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Цель практического занятия – изучить методику обработки экспериментальных данных при многократных измерениях физических величин.

Краткие теоретические сведения

При нормальном законе распределения результатов измерений обработка полученных данных проводится по следующей методике [35 – 38]:

– при многократных измерениях исключаются в результатах измерения систематические погрешности, а при постоянных систематических погрешностях выполняется их исключение из результатов вычислений среднего арифметического результатов измерений;

– рассчитывается среднее арифметическое скорректированных результатов измерения $x_{\text{ср}}$, а также в полученное значение вводится поправка, если систематическая погрешность постоянна:

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ;$$

– выполнить расчет среднего квадратического отклонения при оценке погрешностей измерений по формуле

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2}{n(n-1)}} ,$$

где σ – среднее квадратическое отклонение результатов измерений;

– в результатах измерений находят грубые погрешности на основе применения правила «трех сигм»:

$$|x_i - x_{\text{ср}}| \leq 3\sigma .$$

В результате анализа рассчитанных значений погрешностей исключаются из результатов измерений те значения, которые соответствуют грубым погрешностям. После этого вновь проводят расчет среднего арифметического и среднего квадратического отклонения результатов измерений. Данная процедура повторяется до полного исключения грубых погрешностей из данных результатов измерений;

– рассчитать среднее арифметическое отклонение среднего арифметического полученных результатов измерения

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2}{n-1}},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение результатов измерений;
 – определить доверительные границы ε , в которых находится случайная погрешность измерений среднего арифметического значения результатов измерений:

$$\varepsilon = t_{\sigma} \sigma_{\text{ср}},$$

где t_{σ} – коэффициент Стьюдента, определяемый по табл. 4.4 в соответствии с доверительной вероятностью P и числом результатов измерений n ;

Таблица 4.4

n	P			n	P		
	0,9	0,95	0,9		0,9	0,95	0,9
2	6,3	12,7	31,8	18	1,7	2,1	2,6
3	2,9	4,3	7,0	19	1,7	2,1	2,6
4	6,4	3,2	4,5	20	1,7	2,1	2,6
5	2,1	2,8	3,7	21	1,7	2,1	2,6
6	2,0	2,6	3,4	22	1,7	2,1	2,5
7	1,9	2,4	3,1	23	1,7	2,1	2,5
8	1,9	2,4	3,0	24	1,7	2,1	2,5
9	1,9	2,3	2,9	25	1,7	2,1	2,5
10	1,8	2,3	2,8	26	1,7	2,1	2,5
11	1,8	2,2	2,8	27	1,7	2,1	2,5
12	1,8	2,2	2,7	28	1,7	2,1	2,5
13	1,8	2,2	2,7	29	1,7	2,1	2,5
14	1,8	2,2	2,7	30	1,7	2,0	2,5
15	1,8	2,1	2,6	40	1,7	2,0	2,5

– определяется доверительная граница погрешностей результатов измерений, форма представления которых имеет следующий вид:

$$\Delta = \varepsilon .$$

В случае симметричного доверительного интервала погрешность результатов измерений представляется в следующем виде:

$$x_{\text{ср}} \pm \Delta, P .$$

Практическое задание 3.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

С использованием цифрового мультиметра многократно измерено значение тока при нормальных условиях измерения. В итоге получено n значений результатов измерений. С учетом поправок установлены равноточные значения проведенных измерений.

Таблица 4.5

Вариант	P	n	Значения измеренного тока I , мА											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,97	30	7,31	7,40	7,31	7,37	7,31	7,38	7,37	7,31	7,37	7,40	7,31	7,31
2	0,95	27	7,36	7,39	7,37	7,35	7,37	7,31	7,35	7,37	7,35	7,35	7,36	7,37
3	0,98	25	7,39	7,36	7,40	7,40	7,35	7,37	7,40	7,40	7,40	7,37	7,39	7,35
4	0,96	29	7,40	7,31	7,35	7,39	7,40	7,35	7,39	7,35	7,39	7,38	7,40	7,40
5	0,95	26	7,35	7,32	7,37	7,36	7,39	7,40	7,36	7,37	7,36	7,31	7,35	7,39
6	0,98	25	7,37	7,40	7,38	7,31	7,36	7,39	7,31	7,38	7,31	7,37	7,37	7,36
7	0,97	30	7,38	7,37	7,31	7,40	7,31	7,36	7,32	7,31	7,32	7,35	7,38	7,31
8	0,96	28	7,31	7,35	7,37	7,35	7,32	7,31	7,40	7,31	7,40	7,37	7,31	7,32
9	0,95	26	7,37	7,40	7,35	7,37	7,40	7,32	7,31	7,37	7,31	7,35	7,37	7,40
10	0,97	27	7,35	7,39	7,40	7,38	7,35	7,37	7,37	7,35	7,36	7,40	7,35	7,35
11	0,98	29	7,40	7,36	7,39	7,31	7,37	7,35	7,40	7,40	7,39	7,39	7,40	7,37
12	0,99	30	7,39	7,31	7,36	7,37	7,38	7,40	7,35	7,39	7,40	7,36	7,39	7,38
13	0,95	27	7,36	7,32	7,31	7,35	7,31	7,39	7,37	7,36	7,35	7,31	7,36	7,31
14	0,96	25	7,31	7,40	7,32	7,37	7,37	7,36	7,38	7,31	7,37	7,32	7,31	7,37
15	0,98	26	7,32	7,39	7,40	7,35	7,35	7,31	7,31	7,32	7,38	7,40	7,32	7,35

В таблице 4.5 представлены значения вероятностей P , число результатов измерений n и полученные значения результатов измерений тока в миллиамперах.

Полученные результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения вероятности P .

Необходимо установить точность измерения тока для многократных измерений. Определить пределы нахождения значений измеряемого тока.

Методика обработки результатов измерения тока с использованием мультиметра заключается в следующем:

- выполнить обработку результатов измерения тока по данным мультиметра;
- определить значение среднего арифметического;
- рассчитать среднее квадратическое значение отклонения результатов измерений;
- исключить из полученных измерительных данных грубые ошибки по правилу «трех сигм»;
- рассчитать отклонение среднего арифметического;
- определить коэффициент Стьюдента t_s для заданных значений вероятностей P и числа результатов измерений n , используя таблицу значений коэффициентов Стьюдента;
- рассчитать величину половины доверительного интервала;
- установить границы пределов для полученных значений измеряемого тока.

Практическое задание 3.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

Выполнены многократные измерения напряжения в электрической сети 220 В. Для измерения физической величины применялся цифровой вольтметр, у которого известны метрологические характеристики. В таблице 4.6 приведены результаты измерений напряжения в сети и данные метрологических характеристик цифрового вольтметра [7, 35].

Таблица 4.6

Результаты измерения напряжения в сети U_i , В	219,75; 220,32; 218,53; 219,85; 218, 21; 220,11; 219,17; 218,65
Предел измерения цифрового вольтметра $U_{п}$, В	800
Температура при эксплуатации цифрового вольтметра при нормальных условиях $t_{НУ}$, °С	20 ± 3
Напряженность внешнего магнитного поля при нормальных условиях $H_{МНУ}$, А/м	0
Класс точности цифрового вольтметра k	0,5/0,1
Температура во время измерений t_n , °С	26
Напряженность внешнего магнитного поля при измерениях H_M , А/м	25

Определить абсолютную погрешность результатов измерений и представить результаты измерений при соответствии результатов измерений нормальному закону распределения и доверительной вероятности $P = 0,95$.

В паспорте на цифровой вольтметр приведены формулы для расчета дополнительных абсолютных систематических погрешностей. Дополнительная абсолютная погрешность от воздействия температуры определяется по формуле [7, 35]

$$\Delta_t = \frac{t_n - t_{НУ}}{10} \Delta_{осн} ,$$

где $\Delta_{осн}$ – основная абсолютная погрешность цифрового вольтметра, зависящая от его класса точности.

Дополнительная абсолютная погрешность при воздействии магнитного поля рассчитывается по следующей зависимости:

$$\Delta_{\text{м}} = \frac{H_{\text{м}} - H_{\text{МНУ}}}{50} \cdot \Delta_{\text{осн}}.$$

Методика решения практического задания с использованием данных табл. 4.6:

– определить среднее арифметическое $U_{\text{ср}}$ измеренных значений напряжения U по формуле

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_i ;$$

– рассчитать среднее квадратическое отклонение σ по зависимости

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (U_i - U_{\text{ср}})^2}{8-1}} ;$$

– определить основную относительную систематическую погрешность при измерении напряжения цифровым вольтметром $\delta_{\text{осн}}$, которая зависит от класса точности вольтметра, по формуле

$$\delta_{\text{осн}k} = \left[0,5 + 0,1 \left(\frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{ср}}} - 1 \right) \right] ;$$

– рассчитать основную абсолютную систематическую погрешность результатов измерений напряжений сети $\Delta_{\text{осн}k}$, зависящую от класса точности цифрового вольтметра, по формуле

$$\Delta_{\text{осн}k} = \frac{U_{\text{ср}}}{100} \delta_{\text{осн}} ;$$

– найти дополнительную абсолютную систематическую погрешность результатов измерений напряжений $\Delta_{\text{доп}t}$, которая зависит от влияния температуры $t_{\text{и}}$ при измерениях напряжения цифровым вольтметром, по зависимости

$$\Delta_{\text{доп}t} = \frac{t_{\text{и}} - t_{\text{НУ}}}{10} \Delta_{\text{осн}} ;$$

– определить дополнительную абсолютную систематическую погрешность результатов измерений напряжений при воздействии на цифровой вольтметр, переменного магнитного поля:

$$\Delta_{\text{доп}M} = \frac{H_{\text{м}}}{50} \Delta_{\text{осн}} ;$$

– рассчитать абсолютную неисключенную систематическую суммарную погрешность результатов измерений напряжений Δ_{Σ} , зависящую от применяемого цифрового вольтметра:

$$\Delta_{\Sigma} = k \sqrt{\sum_{j=1}^m \Delta_j^2},$$

где $k = 1,1$ при $P = 0,95$; Δ_j – j -я составляющая систематической погрешности;

– найти среднее квадратическое отклонение результатов измерений напряжений с использованием цифрового вольтметра:

$$\sigma_{U_{\text{ср}}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}};$$

– рассчитать абсолютную случайную погрешность результатов измерений напряжения по формуле

$$\varepsilon = K \sigma_{U_{\text{ср}}},$$

где K – коэффициент Стьюдента, $K = 2,57$ для $n = 8$ и $P = 0,95$;

– определить суммарную абсолютную погрешность результатов измерений по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = k_{\Sigma} \sigma_{\Sigma}.$$

Контрольные вопросы

1. Методика определения среднего арифметического скорректированных результатов измерения.
2. Как рассчитывается среднее квадратическое отклонение при оценке погрешностей измерений?
3. Как определяется доверительная граница погрешностей результатов измерений?
4. По какой методике выполняется обработка многократных измерений?
5. Нормальный закон распределения вероятности при описании результатов измерений и погрешностей измерения?
6. Что такое доверительный интервал и доверительная вероятность?
7. Как находятся грубые погрешности (промахи) при проведении многократных измерений?

Практическое занятие 4

МЕТОДИКА ВЫБОРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА ПО ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель практического занятия – изучить методику выбора измерительного прибора по точности для измерения и контроля физических величин.

Краткие теоретические сведения

Измерительное средство выбирается по точности в зависимости от поставленной цели использования измерительного прибора: измерение или контроль параметров электронного устройства [35, 36, 39].

Выбор измерительного средства для измерения параметров электронного устройства осуществляется по определенной методике:

– для известного верхнего предела динамического диапазона измеряемой величины x_v и допустимой суммарной погрешности измеряемой величины $\Delta_{\text{доп}\Sigma}$ находят верхний предел диапазона измерений, т.е. конечное значение x_k диапазона измерений средства измерений:

$$x_k \geq |x_v| + |\Delta_{\text{доп}\Sigma}|;$$

– определяется предварительное значение необходимого класса точности $K_{\text{тн}}$

$$K_{\text{тн}} \leq \frac{\Delta_{\text{доп}\Sigma}}{x_k} 100\% .$$

В случае несовпадения рассчитанного значения $K_{\text{тн}}$ и значения, указанного в ГОСТ 8.401–80 [39], значения класса точности приводят к ближайшему значению $K_{\text{тн}}$ в направлении, соответствующему более высокому классу точности;

– осуществляется выбор измерительного средства, анализируя известные методы измерения, виды измерительных параметров и условия эксплуатации измерительных приборов в соответствии со значениями x_k и $K_{\text{тн}}$. По аттестованной методике измерений с использованием данного измерительного средства выполняется расчет фактического результата предела суммарной погрешности $\Delta_{\text{ф}}$ по известной зависимости

$$\Delta_{\text{ф}} = \sqrt{\Delta_{\text{осн}}^2 + \sum_{i=1}^n \Delta_{\text{доп}_i}} ;$$

– выполняется сравнение рассчитанной величины фактического результата предела суммарной погрешности $\Delta_{\text{ф}}$ с пределом допустимым $\Delta_{\text{тн}}$.

Считается, что измерительное средство выбрано верно при выполнении условия $\Delta_{\text{тн}} \geq \Delta_{\text{ф}}$. Измерительное средство выбирается с более высоким классом точности, когда $\Delta_{\text{тн}} < \Delta_{\text{ф}}$.

Выбор измерительного средства для контроля параметров электронного устройства осуществляется по нижеприведенной методике [35, 36, 39]:

– определить суммарную допустимую погрешность измерения при контроле параметра:

$$\Delta_{\Sigma_{\text{доп}}} = \frac{\Delta_{\text{пд}}}{K_{\text{тн}}},$$

где $\Delta_{\text{пд}}$ – поле допуска параметра контроля $\Delta_{\text{дн}} < \Delta_{\text{пд}} < \Delta_{\text{дв}}$;

– определить предел измерения измерительного средства на основе известного значения верхней границы поля допуска

$$x_{\text{дв}} = x_{\text{н}} + \Delta_{\text{дв}}$$

и допустимой суммарной погрешности измеряемой величины $\Delta_{\text{доп}\Sigma}$;

– определить предварительное значение необходимого класса точности $K_{\text{тн}}$ средства измерений:

$$K_{\text{тн}} \leq \frac{\Delta_{\text{доп}\Sigma}}{x_{\text{пр}}} \cdot 100\% .$$

В случае несовпадения рассчитанного значения $K_{\text{тн}}$ и значения, указанного в ГОСТ 8.401–80 [39], значения класса точности приводят к ближайшему значению $K_{\text{тн}}$ в направлении, соответствующему более высокому классу точности;

– осуществляется выбор измерительного средства, анализируя известные методы измерения, виды измерительных параметров и условия эксплуатации измерительных приборов в соответствии со значениями $x_{\text{пр}}$ и $K_{\text{тн}}$. По аттестованной методике измерений с использованием данного измерительного средства выполняется расчет фактического результата предела суммарной погрешности $\Delta_{\text{ф}}$ по известной зависимости

$$\Delta_{\text{ф}} = \sqrt{\Delta_{\text{осн}}^2 + \sum \Delta_{\text{доп}i}^2} ;$$

– выполняется сравнение рассчитанной величины фактического результата предела суммарной погрешности $\Delta_{\text{ф}}$ с пределом допустимым $\Delta_{\text{тн}}$. Считается, что измерительное средство выбрано верно при выполнении условия $\Delta_{\text{тн}} \geq \Delta_{\text{ф}}$. Измерительное средство выбирается с более высоким классом точности, когда $\Delta_{\text{тн}} < \Delta_{\text{ф}}$.

Практическое задание 4.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ТОЧНОСТИ ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА

Цифровой вольтметр постоянного тока контролирует соответствие измеряемой физической величины (параметра) заданному допуску. Установить класс точности $K_{\text{т}}$ цифрового вольтметра [35, 36, 39].

Контроль исследуемых параметров выполняется при нормальных условиях измерения.

Предел измерения цифрового вольтметра выбирается из следующего ряда: 1; 2,5; 5; 10; 25; 100; 250; 500 В (табл. 4.7).

Класс точности цифрового вольтметра выбирается из представленного ряда: (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0) $\cdot 10^n$, где $n = -1; 0; 1$ (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Значения исходных параметров	Варианты заданий								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{\text{тн}}$	5,0	2,5	4,5	2,0	5,0	3,5	3,0	4,5	4,0
$U_{\text{н}}$	10	50	100	200	10	50	100	200	100
$\Delta_{\text{пд}}$	2	5	10	20	1	4	15	25	10

Рекомендации по определению класса точности цифрового вольтметра при обосновании соответствия контролируемых параметров пределу допуска: требуется иметь информацию о необходимом коэффициенте точности $K_{\text{тн}}$, который определяет зависимость поля допуска $\Delta_{\text{пд}}$ и погрешности измерения, а также характеризует достоверность выполняемого контроля. Погрешностью измерений является погрешность цифрового вольтметра, в связи с тем, что погрешность метода проводимых измерений не учитываем. Поэтому погрешность измерения допустимая должна быть меньше поля допуска в $K_{\text{тн}}$ раз.

Практическое задание 4.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО КЛАССА ТОЧНОСТИ ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА

Заданы исходные параметры для определения фактического коэффициента точности $K_{\text{тф}}$ и условия измерения:

- для измерения применяется цифровой вольтметр постоянного тока;
- предел измерения цифрового вольтметра 200 В;
- класс точности цифрового вольтметра 2,5;
- номинальное значение напряжения $U_{\text{н}} = 50$ В, $\Delta_{\text{пд}} = \pm 5$ В;
- относительная влажность 75%;
- температура окружающей среды $t = 30$ °С.

Определена зависимость уменьшения точности показаний цифрового вольтметра на 30% при изменении температуры окружающей среды на 10 °С.

Установить коэффициент точности фактический $K_{\text{тф}}$ при определении соответствия контролируемых параметров заданному допускаемому пределу [35, 36, 39].

Контрольные вопросы

1. Определение основной погрешности измерительного средства.
2. По каким требованиям выбирается измерительное средство при контроле и измерении определяемых параметров?
3. Определение дополнительной погрешности измерительного средства.

4. Какие условия измерений считаются нормальными?
5. По какой методике выбирается измерительное средство для измерения параметров электронного устройства?
6. По какой методике выбирается измерительное средство для контроля параметров электронного устройства?

Практическое занятие 5

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель практического занятия – изучить методику измерения параметров электрических сигналов с использованием осциллографа.

Краткие теоретические сведения

Электронный осциллограф применяется для реализации многочисленных функций по определению амплитуды, частоты исследуемых сигналов, а также для визуального контроля вида и формы электрических сигналов. Осциллограф характеризуется хорошими техническими характеристиками: высокая чувствительность, большое входное сопротивление, незначительная инерционность.

Принцип действия основан на применении электронно-лучевой трубки [25, 28, 35]. Исследуемый сигнал изображается на экране электронно-лучевой трубки в результате прохождения сфокусированного электронного луча между вертикально отклоняющими пластинами Y и отклонения по вертикальной оси пропорционально исследуемому напряжению, и отклонения по горизонтальной оси X с постоянной скоростью горизонтальными пластинами. Для этого в осциллографе применяются линейная развертка с использованием напряжения пилообразного вида.

При измерении амплитуды сигнала и его временных параметров в осциллографе используется метод непосредственного отсчета по шкале на экране осциллографа. Для реализации этого метода предварительно, приступая к измерению, выполняют калибровку шкалы осциллографа по чувствительности и длительности развертки с использованием сигналов встроенного калибратора. После проведения калибровки измеряется амплитуда и ряд временных параметров исследуемых сигналов.

Практическое задание 5.1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ, ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ ИССЛЕДУЕМЫХ СИГНАЛОВ

Измерение временных интервалов. Измеряемый временной интервал определяется произведением двух величин: длины измеряемого интервала времени на экране по горизонтали в делениях и величины

времени на деление в данном положении переключателя «ВРЕМЯ/ДЕЛЕН».

Измерение частоты сигналов. Частоту сигнала можно определить, измерив его период T : $f = 1/T$.

Подсчитывают расстояние в делениях целого числа периодов сигнала, укладывающихся наиболее близко к 10 делениям шкалы.



Пусть, например, 5 периодов (n) занимают расстояние $l = 8,45$ делений при длительности развертки $T_p = 2$ МКС/дел. Тогда искомая частота сигнала равна

$$f = \frac{n}{lT_p} = \frac{5}{8,45 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = \frac{5 \cdot 10^6}{16,9} = 269 \text{ кГц.}$$

Другим методом определения частоты является сравнение неизвестной частоты с эталонной частотой по фигуре Лиссажу.

В этом случае на вход усилителя вертикального отклонения (УВО) подается сигнал, частоту которого необходимо измерить, нажимается кнопка «ВХОД X» и на вход усилителя горизонтального отклонения через гнездо «ВХОД СИНХР.» подается сигнал от генератора образцовой частоты. Переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛЕН» устанавливается в положение, обеспечивающее удобное наблюдение изображения на экране ЭЛТ. Ручка «СТАБИЛЬНОСТЬ» устанавливается в крайнее правое положение.

При сближении частот на экране появляется вращающийся эллипс, прекращение его вращения указывает на полное совпадение частот. При кратном соотношении частот на экране получается более сложная фигура, причем частота по вертикали так относится к частоте по горизонтали, как число точек касания к касательной по горизонтали относится к числу точек касания по вертикали.

Измерение амплитуды исследуемых сигналов. Измерение амплитуды исследуемых сигналов производится следующим образом: на вход усилителя вертикального отклонения подается исследуемый сигнал. С помощью ручек «» и «» сигнал совмещают с нужными делениями шкалы и измеряют размах изображения по вертикали в делениях. Для уменьшения погрешности от толщины луча измерения производятся или оба по нижним, или оба по верхним краям линии изображения. Положение переключателя «ВОЛЬТ/ДЕЛЕН» необходимо выбрать таким, чтобы размер исследуемого сигнала получился наибольшим в пределах рабочей части экрана.

Величина исследуемого сигнала в вольтах будет равна произведению измеренной величины изображения в делениях, умноженной на цифровую отметку показаний переключателя «ВОЛЬТ/ДЕЛЕН».

Контрольные вопросы

1. Методика измерения периодов, амплитуд сигналов, их частоты с помощью осциллографа.
2. Принцип действия осциллографа.
3. Результаты измерений и осциллограммы по пунктам задания.
4. Применение осциллографов при измерении физических величин.
5. Измерение амплитуды, частоты с использованием осциллографа.
6. Снятие амплитудно-частотной характеристики исследуемых усилительных каскадов с использованием осциллографа.

Практическое занятие 6

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА

Цель практического занятия – изучить методику измерения параметров электрических сигналов с применением цифрового вольтметра.

Краткие теоретические сведения

Классификация цифровых вольтметров выполняется в зависимости от видов измеряемых физических величин. Цифровые вольтметры применяются для измерения постоянного и переменного тока для средневыпрямленных значений и среднего квадратического значения. Измерение величин видео- и радиоимпульсных сигналов осуществляется с помощью импульсных вольтметров. Измерение напряжения постоянного и переменного тока, сопротивления и других величин выполняется с использованием универсальных вольтметров.

В цифровых измерительных приборах измеряемые величины представляются в дискретном или цифровом виде. Цифровой вольтметр включает следующие структурные компоненты: входное устройство, аналого-цифровой преобразователь, цифровое отсчетное, а также управляющее устройства. Входное устройство состоит из делителя напряжения и преобразователя переменного тока в постоянный для вольтметров переменного тока. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) служит для преобразования аналогового сигнала в цифровой, который представляется в виде цифрового кода. Цифровое отсчетное устройство цифрового вольтметра служит для регистрации измеряемых величин. Управление структурными компонентами цифрового вольтметра осуществляет управляющее устройство.

По типу АЦП цифровые вольтметры могут быть разделены на четыре основные группы:

- кодоимпульсные (с поразрядным уравниванием);
- времяимпульсные;
- частотно-импульсные;
- пространственного кодирования.

АЦП вольтметров преобразуют сигнал постоянного тока в цифровой код, поэтому и цифровые вольтметры также считаются приборами постоянного тока. Для измерения напряжения переменного тока на входе вольтметра ставится преобразователь переменного напряжения в постоянное напряжение, чаще всего это детектор средневыпрямленного значения.

Практическое задание 6.1

ОПРЕДЕЛИТЬ СООТВЕТСТВИЕ ВОЛЬТМЕТРА КЛАССУ ТОЧНОСТИ И ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Выполнить оценку точности вольтметра со следующими исходными данными: класс точности равен 0,8, предел измерения 240 В, максимальное число делений – 120. Поверка проведена на отметках: 20, 40, 60, 80 и 100 делений. Значение абсолютной погрешности в поверяемых точках равно: 0,8; 1,0; 1,5; 2,2 и 2,8 В [37].

Решение. Абсолютная погрешность вольтметра с классом точности 0,9 и пределом измерения 240 В равна 2,9 В.

Так как значение абсолютной погрешности в точках контроля шкалы составляет не более 2,9 В, то класс точности вольтметра соответствует указанному в задании.

Относительная погрешность результатов измерения рассчитывается по формуле

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} 100\% .$$

Практическое задание 6.2

ВЫБРАТЬ ВОЛЬТМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СЕТЕВОГО ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Дано: сетевое переменное напряжение измерено вольтметром и равно 220 В. Относительная погрешность измерения сетевого напряжения не более 2%. Записать результат измерений напряжения, если показания вольтметра равны 225 В.

Решение. Выбран вольтметр, у которого предел шкалы U_n равен 0...300 В. При задании относительной погрешности δ не более 2% следует выполнить условие: абсолютная погрешность измерения Δ не должна превышать значения, рассчитанного по формуле

$$\Delta = \delta U = 0,02 \cdot 220 \text{ В} = 4,4 \text{ В}.$$

Приведенная погрешность измерения напряжения вольтметром определяется по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta}{U_n} \cdot 100\% = (4,4/300) \cdot 100\% = 1,47\%.$$

Таким образом, приведенная погрешность измерения напряжения соответствует классу точности вольтметра 1,5.

В результате расчета погрешности измерения полученный результат измерения напряжения представляется в следующем виде:

$$U = 225 \pm 4,4 \text{ В}.$$

Контрольные вопросы

1. Для измерения каких параметров сигналов применяются цифровые вольтметры?
2. Какие структурные компоненты включает цифровой вольтметр?
3. В каком виде представляются измеряемые физические величины в цифровом вольтметре?
4. Принцип работы цифровых измерительных приборов.
5. Как классифицируются цифровые вольтметры по типу аналого-цифрового преобразователя?
6. Какое назначение аналого-цифрового преобразователя в цифровом вольтметре?

Практическое занятие 7

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель практического занятия – изучить методику определения параметров электрических сигналов с применением измерительного генератора.

Краткие теоретические сведения

Классификация генераторов: импульсные, низкочастотные, высокочастотные, шумовых сигналов, качающейся частоты и реализующие сигналы специальной формы. Генератор включает следующие основные структурные компоненты: формирователи входного сигнала, к которым относятся автогенераторы, генераторы шума, кварцевые синтезаторы частоты; выходной формирователь сигнала, выходной аттенуатор, усилители, управляющие устройства, стабилизаторы выходных уровней сигналов, блок питания. Для расширения функциональных возможностей в генераторе применяется ряд устройств:

внешнего запуска, формирователь временных интервалов, устройства внешнего запуска и другие устройства, модуляторы сигналов.

Задающий генератор предназначен для генерации высокостабильных колебаний, которые определяют форму и частоту выходных сигналов. В зависимости от вида измерительного генератора задающим генератором могут быть генераторы импульсов, шума или синусоидальных сигналов. На вход преобразователя поступает сигнал с задающего генератора, который в соответствии с типом измерительного генератора выполняет соответствующее преобразование сигнала: модулирование, усиление или формирование сетки частот из данного сигнала или кодовых комбинаций импульсов. С выхода преобразователя сформированный сигнал подается на выходное устройство для выполнения регулировки его уровня, изменения полярности или согласования выхода задающего генератора с подключенной нагрузкой. К измерительным устройствам генератора относятся: измерительный прибор, осциллографический индикатор, частотная шкала и др. Измерительное устройство с заданной погрешностью выполняет индикацию параметров измерительных сигналов.

На производственных предприятиях используются генераторы, которые позволяют формировать специальные сигналы (сложной формы, с различными методами модуляции и манипуляции), применяющиеся при настройке и регулировке радиоэлектронных средств.

Для оперативного тестового контроля электронных устройств применяются генераторы, позволяющие формировать заданные импульсные или частотные сигналы.

К основным характеристикам генератора относятся следующие: диапазоны заданных уровней выходного напряжения или мощности и генерируемых частот; точность установки выходных уровней и частоты, стабильность частоты, погрешность аттенюатора.

Практическое задание 7.1

ОПРЕДЕЛИТЬ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Методика определения параметров электрических сигналов с применением измерительного генератора заключается в следующем:

1. Изучить принципы работы приборов и инструкции к ним.
2. Установить на выходе низкочастотного генератора частоту $F = (200 + 1000K)$ Гц, где K – номер рабочего места. Напряжение ориентировочно установить $U_r = (0,1 + 0,3K)$ В.
3. Измерить имеющимися на рабочем месте вольтметрами напряжение на выходе низкочастотного генератора. Сравнить полученные значения с напряжением на генераторе. Частоту напряжения проконтролировать частотомером.

4. Наблюдать напряжение, полученное при выполнении пункта 2, на экране осциллографа. С помощью осциллографа измерить действующее значение, амплитуду и оценить период низкочастотного напряжения. Сравнить полученные результаты с заданными.

5. Установить на выходе высокочастотного генератора немодулированное колебание с действующим значением: $U_f = (0,1 + 0,06K)$ В и частотой $F = (110 + 200K)$ кГц.

6. Измерить вольтметром напряжение, заданное в пункте 5, на выходе высокочастотного генератора. Сравнить полученное значение напряжения с заданным.

7. Наблюдать напряжение, полученное при выполнении пункта 6, на экране осциллографа. С помощью осциллографа измерить действующее значение, амплитуду и оценить период высокочастотного напряжения.

8. Установить на выходе высокочастотного генератора амплитудно-модулированное колебание с параметрами: $f_n = (150 + 15K)$ кГц, $M = (0,15 + 0,05K)$, $F = (500 + 150K)$ Гц, где K – номер рабочего места. Использовать преимущественно режим внутренней модуляции. При необходимости работы в режиме внешней модуляции на клеммы «Внеш. Мод.» высокочастотного генератора подается низкочастотное напряжение заданной частоты F с действующим значением не менее 60 В. Коэффициент глубины модуляции устанавливается ручкой «Уровень m %».

Контрольные вопросы

1. Типы генераторов, применяемых при выполнении лабораторных работ, диапазоны их выходных сигналов.
2. Применение генераторов при измерении физических величин.
3. Для каких целей предназначен измерительный генератор?
4. Назовите основные функциональные узлы измерительного генератора.
5. На какие виды подразделяются генераторы?
6. Назовите основные нормируемые характеристики генераторов.
7. Какое назначение основных структурных компонентов генераторов?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены теоретические сведения по основам метрологии и электрическим измерениям. Изучение методов измерения физических величин, метрологических характеристик электронных устройств измерительной техники, расчет погрешностей измерения и их метрологических характеристик, умение обрабатывать полученные результаты измерений позволят студентам получить опыт проведения электрических измерений и повысить точность определения измеряемых физических величин.

Более подробно с теорией метрологии и электрических измерений студенты могут познакомиться в рекомендуемой литературе [1 – 10].

Основной задачей данного учебного пособия было ознакомление студентов с применяемой измерительной техникой и изучение принципа действия и функционирования приборов при проведении электрических измерений, снятии экспериментальных передаточных и частотных характеристик электронных устройств на лабораторных стендах. Технические характеристики и инструкции по эксплуатации используемых измерительных приборов при изучении дисциплины «Измерительная техника и электрические измерения» приведены в литературе [26 – 28].

В результате изучения методов измерения физических величин, расчета погрешностей измерений, обработки и анализа экспериментальных данных при многократном измерении; выборе измерительных приборов по точности при измерении и контроле параметров, измерении параметров электрических сигналов с использованием измерительных средств, изучении принципа действия и устройства электроизмерительных приборов измерительной техники студенты приобретают практические навыки проведения экспериментальных исследований электронных средств на основе проведения электрических измерений физических величин с использованием измерительной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 8.736–2011.** Национальный стандарт российской федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург. – Дата введения 01.01.2013 г.
2. **РМГ 29–2013.** Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург. – Дата введения 01.01.2015 г.
3. **Нормирование** и использование метрологических характеристик средств измерений // Нормативно-технические документы (ГОСТ 8.009–84, методический материал по применению ГОСТ 8.009–84, РД 50-453–84). – М. : Изд-во стандартов, 1988.
4. **Марусина, М. Я.** Метрологическое обеспечение измерений, испытаний и контроля / М. Я. Марусина. – СПб. : Университет ИТМО, 2020. – 70 с.
5. **Леонов, О. А.** Метрология, стандартизация и сертификация / Н. Ж. Шкаруба, В. В. Карпузов. – СПб. : Изд-во «Лань», 2022. – 196 с.
6. **Раннев, Г. Г.** Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г. Г. Раннев, Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
7. **Миронов, Э. Г.** Методы и средства измерений : учебное пособие / Э. Г. Миронов. – Екатеринбург, 2009 г. – 463 с.
8. **Ким, К. К.** Средства электрических измерений и их поверка / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – СПб. : Изд-во «Лань», 2021. – 316 с.
9. **Колчков, В. И.** Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / В. И. Колчков. – М. : Гуманитар. изд. центр «Владос», 2010. – 398 с.
10. **ГОСТ 8.508–84.** Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 52 с.
11. **Бахтин, А. В.** Технологические измерения, приборы и информационно-измерительные системы : учебное пособие / А. В. Бахтин, И. В. Ремизова // ВШТЭСПБГ УПТД. – СПб., 2020. – 67 с.
12. **Медведева, Р. В.** Средства измерений : учебник / Р. В. Медведева, В. П. Мельников. – М. : КНОРУС, 2011.

13. **Куликовский, К. Л.** Методы и средства измерений : учебное пособие для вузов / К. Л. Куликовский, В. Я. Купер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.

14. **ГОСТ Р8.736–2011.** Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2019. – 23 с.

15. **Новицкий, П. В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. – 304 с.

16. **Рубцова, С. В.** Основы теории погрешностей : учебно-методическое пособие / С. В. Рубцова, О. И. Охрименко, О. А. Алейникова. – Шахты : ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2019. – 66 с.

17. **Мирский, Г. Я.** Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.

18. **Измерения** электрических и неэлектрических величин : учебное пособие / под ред. Н. Н. Евтихаева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

19. **Основы** метрологии и электрические измерения : учебник для вузов / под ред. Е. М. Душина. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

20. **Воробьев, С. А.** Электрические измерения неэлектрических величин. Вып. 2. Основы теории и расчета неуравновешенных мостовых схем с датчиками сопротивления / С. А. Воробьев. – Свердловск : УПИ им. С. М. Кирова, 1975. – 232 с.

21. **Туричин, А. М.** Электрические измерения неэлектрических величин : учебное пособие для вузов / А. М. Туричин. – М. ; Л. : Энергия, 1966. – 690 с.

22. **Данилин, А. А.** Измерения в радиоэлектронике : учебное пособие / А. А. Данилин, Н. С. Лавренко ; под ред. А. А. Данилина. – СПб. : Изд-во «Лань», 2017. – 408 с.

23. **Тартаковский, Д. Ф.** Метрология, стандартизация и технические средства измерений : учебное пособие для вузов / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. – М. : Высшая школа, 2001. – 205 с.

24. **Метрология** и электроизмерения в телекоммуникационных системах : учебник для вузов / под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высшая школа, 2001. – 383 с.

25. **Мейдза, Ф.** Электронные измерительные приборы и методы измерения / Ф. Мейдза ; пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 535 с.

26. **Вольтметры** универсальные цифровые GDM-8135, GDM-8145. Руководство по эксплуатации. Фирма «GOOG WILL INSTRUMENTS CO., LTD» (Тайвань).

27. **Генераторы** сигналов специальной формы GFG-821 5A/8216/8217A/8219A/GFG-8250A/8255A. Руководство по эксплуатации. Фирма «GOOG WILL INSTRUMENTS CO., LTD» (Тайвань).

28. **Осциллографы** универсальные GOS-620/620 FG. Руководство по эксплуатации. Фирма «GOOG WILL INSTRUMENTS CO., LTD» (Тайвань).

29. **Электронные** приборы и устройства на их основе : справочник / Ю. А. Быстров, С. А. Гамкрелидзе, Е. Б. Иссерлин, В. П. Черепанов – М. : ИП РадиоСофт, 2002 – 656 с.

30. **Цапенко, М. П.** Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование : учебное пособие для вузов / М. П. Цапенко. – 2-е изд., перер. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.

31. **ГОСТ 8.437–81.** Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

32. **Опадчий, Ю. Ф.** Аналоговая и цифровая электроника : учебник для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров – М. : Радио и связь, 2002. – 768 с.

33. **Маркин, Н. С.** Практикум по метрологии : учебное пособие / Н. С. Маркин. – М. : Изд-во стандартов, 1994. – 186 с.

34. **Мифтахова, Н. И.** М 68 Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие / Н. И. Мифтахова. – Нижнекамск : НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ», 2018. – 100 с.

35. **Сытько, И. И.** Метрология и измерительная техника : методические указания к практическим занятиям / И. И. Сытько. – СПб. : Изд-во НМСУ «Горный», 2016. – 52 с.

36. **Метрология**, стандартизация и сертификация : учебно-методический комплекс / Г. А. Алексеев, О. В. Новикова, Э. И. Медякова и др. – СПб. : Изд-во СЗТУ, 2009. – 227 с.

37. **Новиков, В. А.** Сборник задач по расчету погрешностей электрических измерений : учебное пособие / В. А. Новиков, В. Ю. Кончаловский – М. : Изд-во МЭИ, 2006. – 36 с.

38. **ГОСТ 8.207–76.** ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 9 с.

39. **ГОСТ 8.401–80.** ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.

40. **Измерительный** генератор [Электронный ресурс]. – URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/>

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТРОЛОГИИ	4
1.1. Основные термины и определения в метрологии	4
1.2. Характеристика основных видов методов и средств измерений	6
1.3. Виды метрологических характеристик измерительных средств ...	9
1.4. Сведения из теории о погрешностях измерений	12
2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ	17
2.1. Основные виды измерений	17
2.2. Основные определения электрических цепей	18
2.3. Методика и приборы для измерения электрических величин	21
2.4. Методика и устройства для измерения неэлектрических величин ...	24
2.5. Основы измерений с использованием цифровых средств	27
3. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА	30
3.1. Измерение электрических величин. Электронные вольтметры	30
3.2. Измерительные генераторы	35
3.3. Измерение электрических величин и визуализация электрических колебаний. Электронный осциллограф	40
3.4. Информационно-измерительные системы	47
4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ...	52
Практическое занятие 1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ...	52
Практическое занятие 2. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	55
Практическое занятие 3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	60
Практическое занятие 4. МЕТОДИКА ВЫБОРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА ПО ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	65
Практическое занятие 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЦИЛЛОГРАФА	69
Практическое занятие 6. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА	71
Практическое занятие 7. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	77

Учебное электронное издание

СЕЛИВАНОВА Зоя Михайловна

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова
Обложка, тиражирование и упаковка Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-2591-3



9 785826 525913

Подписано к использованию 03.06.2023.

Тираж 50 шт. Заказ № 48

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