

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. А. Ковалев, И. И. Скочек, М. И. Булко

**МЕТРОЛОГИЯ
И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности 6-05-0812-04 «Энергетическое обеспечение
сельского хозяйства»*

Минск
БГАТУ
2025

УДК 006.91(07)
ББК 30.10я7
К56

Рецензенты:
кафедра «Электротехника и электроника»
Белорусского национального технического университета
(заведующий кафедрой *Т. Е. Жуковская*);
кандидат технических наук, доцент,
заведующий лабораторией научного обеспечения испытаний
и информационно-технических технологий
РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации
сельского хозяйства» *В. К. Клыбик*

Ковалев, В. А.
К56 Метрология и электроизмерительная техника. Лабораторный
практикум : учебно-методическое пособие / В. А. Ковалев, И. И. Скочек,
М. И. Булко. – Минск : БГАТУ, 2025. – 120 с.
ISBN 978-985-25-0287-0.

Содержит лабораторные работы, предназначенные для изучения методов и средств измерений электрических и неэлектрических величин, получения навыков организации измерительного эксперимента и обработки его результатов.

Для студентов учреждений высшего образования по специальности 6-05-0812-04 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства», профилизации «Электроснабжение и электрооборудование», «Системы теплоснабжения». Может быть использовано студентами учреждений высшего образования по специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств», профилизация «Автоматизация и роботизация в АПК».

УДК 006.91(07)
ББК 30.10я7

ISBN 978-985-25-0287-0

© БГАТУ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	5
ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	7
Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	9
Лабораторная работа № 2 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	16
Лабораторная работа № 3 ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ СЛИЧЕНИЯ ИХ ПОКАЗАНИЙ С ПОКАЗАНИЯМИ ЭТАЛОНОВ	20
Лабораторная работа № 4 ИЗУЧЕНИЕ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	28
Лабораторная работа № 5 ИЗУЧЕНИЕ ОСЦИЛЛОГРАФА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	40
Лабораторная работа № 6 ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	49
Лабораторная работа № 7 КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ	57
Лабораторная работа № 8 КОСВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ И МАГНИТОСВЯЗАННЫХ КАТУШЕК	66
Лабораторная работа № 9 ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ	74

Лабораторная работа № 10	
ИЗУЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СЧЕТЧИКА	
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	85
Лабораторная работа № 11	
ИЗУЧЕНИЕ ВЛАГОМЕРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ	
МАТЕРИАЛОВ	92
Лабораторная работа № 12	
ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ.....	100
Лабораторная работа № 13	
ИЗУЧЕНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ	
ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	108
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	119

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные занятия преследуют цель более глубокого усвоения теоретического материала путем экспериментальной проверки основных положений курса. Кроме того, эти занятия способствуют выработке навыков проведения измерительного эксперимента и его обработки.

Перед выполнением лабораторных работ каждый студент должен изучить правила безопасности, относящиеся к данной лаборатории.

Каждый студент обязан подготовиться к самостоятельному выполнению лабораторной работы. Предварительная подготовка состоит в изучении описания лабораторной работы и соответствующего теоретического материала по конспекту и учебным пособиям. Электрические схемы и таблицы для записи наблюдений (протокол наблюдений) должны быть подготовлены заранее.

Перед началом выполнения каждой работы преподаватель проводит проверку готовности студентов к этой работе. Неподготовленные студенты к работе не допускаются.

Перед началом работы студентам нужно внимательно ознакомиться с находящимся на рабочем месте оборудованием, т. е. узнать назначение каждого элемента оборудования, основные номинальные данные объекта испытания, а для приборов – пределы измерений, род тока и другие метрологические характеристики.

Каждая новая собранная электрическая цепь должна быть проверена преподавателем или инженерно-лаборантским составом и только с их разрешения может быть включена под напряжение. То же самое относится к цепям, когда в них произведены какие-либо изменения.

Во время выполнения лабораторных работ студенты должны строго выполнять правила безопасности и соблюдать учебную дисциплину. Лица, нарушающие правила безопасности, отстраняются от выполнения работы.

Проводя те или иные испытания, необходимо особенно тщательно определять и записывать показания приборов. Следует помнить, что небрежность в отсчете показаний приборов и записях обычно приводит к неправильным выводам о свойствах испытуемого объекта. При наличии грубых ошибок в испытаниях опыт или вся лабораторная работа должны быть переделаны.

При выполнении работы бригадой студенты должны распределить обязанности, а затем, при выполнении последующих пунктов, этими обязанностями меняться. При этом все должны активно вникать в смысл испытаний.

После окончания каждого опыта и всей лабораторной работы необходимо ознакомить с результатами преподавателя и только после этого разобрать электрическую цепь.

После окончания лабораторной работы необходимо оставить оборудование и приборы на рабочем месте в том порядке, в каком они находились перед началом занятий. После этого приступить к оформлению отчета.

Оформление отчета по проведенной работе производится каждым студентом в тетради.

Отчет должен содержать следующее: 1) название работы, цель работы; 2) электрические схемы всех цепей, исследованных в данной работе; 3) таблицы, графики или иные результаты всех опытов, проведенных в работе; 4) расчетные формулы и результаты вычислений; 5) анализ результатов и выводы.

Отчеты оформляются на специальных бланках или в обычной тетради аккуратно, с использованием чертежных инструментов и с соблюдением стандартных обозначений для элементов электрических схем.

Все графики должны быть выполнены в соответствующем масштабе и с обозначением величин. На графики обязательно должны быть нанесены точки, по которым строились кривые.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Исследование электрических цепей, установок и приборов неизбежно связано с применением повышенных напряжений. Поражение током при этих напряжениях может привести к тяжелым последствиям. Необходимо, чтобы лица, работающие в опасных условиях, постоянно и точно выполняли соответствующие правила безопасности.

В лаборатории опасными являются напряжения 110, 133, 230, 400 В; опасными могут быть также ЭДС самоиндукции при размыкании цепей с большими индуктивностями, а также неразрядившиеся конденсаторы. Кроме того, при неправильных действиях с электрическим оборудованием возможны короткие замыкания и перегрузки в цепях, которые могут привести к появлению расплавленных капель металла и перегреву отдельных частей оборудования, что, в свою очередь, может привести к поражению органов зрения и к ожогам.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности:

1. Прежде чем собирать схему, необходимо убедиться, что сетевой выключатель отключен.

2. При сборке электрической цепи соединение проводниками следует выполнять так, чтобы они не ложились на шкалы приборов, имели наименьшее число пересечений между собой и были надежно присоединены к клеммам. Все неиспользованные проводники должны быть убраны в ящик стола.

3. Включение схемы под напряжение разрешается только после ее проверки преподавателем или лаборантом.

4. Во время работы со схемой нужно быть внимательным и осторожным, находиться на рабочем месте и не допускать к нему посторонних. Каждый, кто включает цепь под напряжение, должен предупредить о своем действии остальных членов бригады.

5. При обнаружении каких-либо неисправностей (повышенный шум, искрение, перегрев обмоток или проводов, отсутствие свечения сигнальной лампы) или при попадании кого-либо под напряжение нужно немедленно отключить выключатель и позвать преподавателя.

6. Во время работы нельзя касаться неизолированных частей электрических цепей, находящихся под напряжением.

7. Любые переключения в схеме проводятся при отключенном стенде. После этого схему должен проверить преподаватель или лаборант.

8. После окончания работы необходимо показать преподавателю протокол наблюдения (результаты экспериментов) и только после этого с разрешения преподавателя выключить стенд и приборы, разобрать схему и навести порядок на рабочем месте.

9. За порчу лабораторного оборудования, вызванного небрежным обращением с ним или невыполнением требований данных правил, студенты несут ответственность.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы:

1. Ознакомиться с основными метрологическими характеристиками средств измерений (СИ) и методами их нормирования.
2. Экспериментально определить основные метрологические характеристики предложенных СИ.
3. Приобрести навыки использования нормируемых метрологических характеристик для оценки инструментальной составляющей погрешности результата измерений.

Общие сведения

Метрологическими называют характеристики, влияющие на результаты измерений.

В полном перечне метрологических характеристик можно выделить несколько групп, представленных в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Группы метрологических характеристик средств измерений

Группа	Характеристики
Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (без введения поправки) и выбора средств измерений	1) функция преобразования (статическая характеристика, уравнение преобразования, градуировочная характеристика); 2) чувствительность; 3) порог чувствительности; 4) диапазон измерений; 5) диапазон показаний; 6) цена деления шкалы (цена единицы младшего разряда цифрового отсчетного устройства – для цифровых приборов) и др.
Характеристики точности (точностные характеристики)	1) характеристики погрешности; 2) вариация выходного сигнала (вариация показаний – для измерительных приборов); 3) класс точности и др.

Группа	Характеристики
Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам	1) функции влияния; 2) изменения значений метрологических характеристик средств измерений, вызванные изменениями влияющих величин в установленных пределах
Динамические характеристики средств измерений	1) полная динамическая характеристика (переходная характеристика, импульсная переходная характеристика, амплитудно-фазовая характеристика и др.); 2) частные динамические характеристики (время реакции, постоянная времени и др.)
Характеристики взаимодействия средств измерений с объектом исследования и нагрузкой	1) входное полное сопротивление; 2) выходное полное сопротивление

Основные метрологические характеристики СИ

Функция преобразования – функциональная зависимость между выходной величиной Y и входной X в установившемся (статическом) режиме работы средства измерений:

$$Y = f(X). \quad (1.1)$$

Функция преобразования может задаваться аналитически (уравнением), таблично или графически. Функция преобразования может быть линейной или нелинейной. Стремятся обеспечить линейную зависимость.

Чувствительность средства измерений – свойство, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства измерений к вызывающему его изменению измеряемой величины:

$$S = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX}. \quad (1.2)$$

Порог чувствительности – характеристика средства измерений в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством.

Диапазон измерений – область значений физической величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

Диапазон показаний – область значений шкалы прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы.

Цена деления шкалы – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

Вариация показаний измерительного прибора – разность показаний прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших (возрастающих X_b) и больших (убывающих X_y) значений измеряемой величины:

$$V = X_b - X_y. \quad (1.3)$$

Часто вариация выражается в нормированном виде:

$$V = \frac{X_b - X_y}{X_N} \cdot 100 \%. \quad (1.4)$$

Нормирование метрологических характеристик

Под *нормированием* метрологических характеристик понимают установление номинальных значений и границ допускаемых отклонений реальных метрологических характеристик средств измерений от их номинальных значений.

Вопросы нормирования метрологических характеристик средств измерений регламентирует ГОСТ 8.009–84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

В соответствии с ГОСТ в ТНПА на средства измерений конкретных типов следует нормировать комплексы метрологических характеристик, которые в целом призваны обеспечить решение следующих задач:

1) определение результатов измерений, производимых с применением любого экземпляра средства измерений данного типа;

2) расчетное определение характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений, производимых с применением любого экземпляра средства измерений данного типа;

3) расчетное определение метрологических характеристик каналов измерительных систем, в состав которых входит любой экземпляр средства измерений данного типа;

4) оценку метрологической исправности средства измерений данного типа.

Одним из традиционных способов формирования комплекса нормируемых метрологических характеристик средств измерений, обеспечивающих решение отмеченных задач, является установление (присвоение) им *класса точности*.

Классы точности СИ

Класс точности – обобщенная характеристика данного типа средств измерений, отражающая, как правило, уровень их точности и выражаемая точностными характеристиками средств измерений.

Класс точности дает возможность судить о том, в каких пределах находится погрешность средства измерений одного типа, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью каждого из этих средств.

Класс точности средств измерений конкретного типа устанавливают в стандартах технических требований, технических условиях (ТУ) или других нормативных документах.

Вопросы установления классов точности для средств измерений регламентирует ГОСТ 8.401–80 «Классы точности средств измерений. Общие требования».

В зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений средства измерений различают несколько способов их нормирования, основными из которых являются следующие:

1. Если аддитивная погрешность средства измерений преобладает над мультипликативной, то чаще всего нормируется предел допускаемой приведенной погрешности (т. к. она будет постоянной в диапазоне измерений):

$$\gamma_{\max} = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100 \% = \pm p. \quad (1.5)$$

Класс точности в этом случае обозначается положительным числом из стандартизированного ряда:

$$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n, \quad (1.6)$$

где $n = 1, 0, -1, -2$ и т. д.

Число, обозначающее класс точности, указывает в процентах *предельное значение допускаемой основной приведенной погрешности*.

Пример: класс точности прибора обозначен числом 1,5 $\Rightarrow \gamma_{\max} = \pm 1,5 \%$.

Если нормирующее значение при определении приведенной погрешности выражается длиной шкалы, то под числом, обозначающим класс точности, ставится знак $\dot{U}$.

2. Если мультипликативная погрешность преобладает над аддитивной, то нормируется предел допускаемой относительной погрешности (т. к. последняя будет постоянной в диапазоне измерений):

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100 \% = \pm q. \quad (1.7)$$

Класс точности в этом случае обозначается положительным числом из того же ряда (1.6), помещенным в окружность, и указывает в процентах *предельное значение допускаемой основной относительной погрешности*.

Пример: класс точности прибора обозначен $\textcircled{2,5} \Rightarrow \delta_{\max} = \pm 2,5 \%$.

3. Если имеет место как аддитивная, так и мультипликативная составляющие основной погрешности и они соизмеримы, то нормируется предел допускаемой относительной погрешности.

Класс точности в этом случае обозначается отношением двух положительных чисел c/d из того же ряда (1.6), которое должно удовлетворять условию $c/d > 1$ (например, класс точности 0,5/0,1).

Предельное значение допускаемой основной относительной погрешности в разных точках диапазона измерений при этом определяется по формуле

$$\delta_{\max} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_k}{X} \right| - 1 \right) \right], \quad (1.8)$$

где X_k – больший (по модулю) из пределов измерений.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с предложенными преподавателем средствами измерений и составить перечень их метрологических характеристик, используя при необходимости технические описания (паспорта) СИ. Перечень должен включать наименование метрологической характеристики и ее количественное значение.

2. Измерить напряжение источника двумя параллельно включенными вольтметрами разных классов точности и с разными пределами измерений. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты эксперимента

Название метрологической характеристики	Вольтметр Э377	Вольтметр Д566	
		на пределе 150 В	на пределе 250 В
Диапазон показаний, В			
Диапазон измерения, В			
Цена деления			
Чувствительность			
Класс точности			
Показание вольтметра			
Результат измерения			

Оценить интервал, в котором находится действительное значение напряжения, с учетом предельного допустимого значения основной погрешности примененных вольтметров.

3. Используя в качестве многозначной меры магазин сопротивлений, определить основную погрешность цифрового вольтметра В7-65 в режиме измерения сопротивления и цифрового мультиметра на пределе измерения $R_k = 2 \text{ кОм}$.

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Результаты измерений и вычислений

Измерено			Вычислено					
R_m , Ом	R , Ом		ΔR , Ом		δ , %		δ_{max} , %	
	Вольт-метр	Мульти-метр	Вольт-метр	Мульти-метр	Вольт-метр	Мульти-метр	Вольт-метр	Мульти-метр
20								
100								
500								
1000								
1800								

Контрольные вопросы и задания

1. Какие характеристики средств измерений называются метрологическими?
2. Назовите основные метрологические характеристики средств измерений и поясните их сущность.
3. Что такое класс точности средства измерений?
4. Что означает число, обозначающее класс точности средства измерений?
5. Как обозначается класс точности средства измерений, если у него преобладает мультипликативная погрешность?
6. Как обозначается класс точности средства измерений, если у него соизмеримы аддитивная и мультипликативная погрешности?

Лабораторная работа № 2

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы:

1. Уяснить сущность косвенного измерения и составляющих его погрешности.
2. Научиться оценивать инструментальную составляющую погрешности косвенного измерения.

Общие сведения

Косвенные измерения – измерения, при которых искомое значение находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными прямыми измерениями.

В общем случае измеряемая величина Y может зависеть от величин $x_1, x_2, \dots, x_n$, получаемых при прямых измерениях. Тогда при косвенных измерениях эта искомая величина может быть вычислена по некоторой формуле

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Абсолютная погрешность результата косвенного измерения

$$\Delta Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial x_1}\right)^2 \Delta_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2}\right)^2 \Delta_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_n}\right)^2 \Delta_{x_n}^2},$$

относительная

$$\begin{aligned} \delta_Y &= \frac{\Delta Y}{Y} \cdot 100 \% = \\ &= \sqrt{\left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x_1}\right)\left(\frac{\Delta x_1}{Y}\right)\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x_2}\right)\left(\frac{\Delta x_2}{Y}\right)\right]^2 + \dots + \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x_n}\right)\left(\frac{\Delta x_n}{Y}\right)\right]^2} \cdot 100 \%. \end{aligned}$$

То есть складываются погрешности, умноженные каждая на *частную производную* по той величине, которая измерена с этой погрешностью.

Пример. Измерены U и I с погрешностями ΔU и ΔI , косвенно определяется мощность $P = UI$:

$$\frac{\partial P}{\partial U} = \frac{\partial(UI)}{\partial U} = I; \quad \frac{\partial P}{\partial I} = \frac{\partial(UI)}{\partial I} = U;$$

$$\Delta_P = \sqrt{I^2 \Delta_U^2 + U^2 \Delta_I^2}.$$

Результат: $P \pm \Delta_P$.

Правила округления погрешности

1. Погрешность результата измерения представляется двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, либо одной – если первая равна 3 и более.

2. Результат измерения округляется до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности.

3. Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления – с одним-двумя лишними знаками.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами, используемыми в лабораторной работе, и занести их основные метрологические характеристики в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Основные метрологические характеристики средств измерений

Средство измерений	Диапазон измерений	Класс точности
Вольтметр		
Амперметр		
Ваттметр		

2. Собрать схему (рис.).

3. Подать напряжение и с помощью ЛАТРа установить 100 В. Произвести измерения по пунктам, указанным в табл. 2.2.

4. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 2.2.

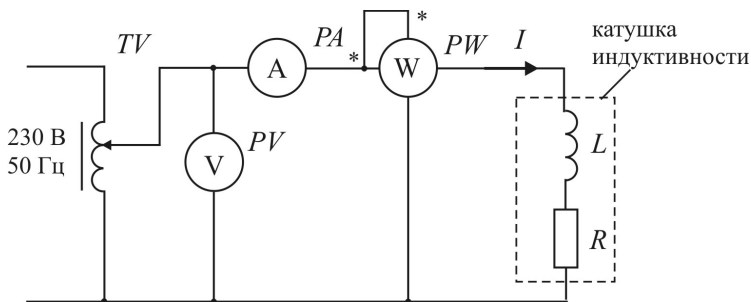


Рис. Схема косвенного измерения сопротивления

Таблица 2.2

Результаты измерений и вычислений

Объект измерения	Измерено						Вычислено		
	Прямое измерение			Косвенное измерение					
	U, В	I, А	P, Вт	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	ΔZ , Ом	ΔR , Ом	ΔX , Ом
Катушка индуктивности № 1									
Катушка индуктивности № 2									
Катушка индуктивности № 3									

Порядок проведения расчетов

1. Рассчитать Z , R и X по следующим формулам:

$$Z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2}; \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

2. Найти из определения приведенной погрешности вольтметра $\gamma = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 \%$ допустимое значение абсолютной погрешности ΔU по формуле

$$\Delta U = \frac{\gamma U_N}{100 \%},$$

где γ принимается равным классу точности;

U_N – нормирующее значение, равное верхнему пределу измерения.

3. Аналогично определить допустимые значения абсолютной погрешности измерения тока ΔI и мощности ΔP .

4. Полное сопротивление Z является результатом косвенного измерения, поэтому абсолютную погрешность ΔZ можно найти по формуле

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{1}{I}\right)^2 \Delta U^2 + \left(-\frac{U}{I^2}\right)^2 \Delta I^2}.$$

5. Рассчитать абсолютную погрешность ΔR по формуле

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{I^2}\right)^2 \Delta P^2 + \left(-\frac{2P}{I^3}\right)^2 \Delta I^2}.$$

6. Рассчитать абсолютную погрешность ΔX по формуле

$$\Delta X = \sqrt{\left(\frac{Z}{X}\right)^2 \Delta Z^2 + \left(\frac{Z}{R}\right)^2 \Delta R^2}.$$

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение прямых и косвенных измерений.
2. Приведите выражение для определения абсолютной погрешности.
3. Как определяется абсолютная погрешность измерений функции многих переменных?
4. Как определяется приведенная погрешность?
5. По какому правилу округляется погрешность?
6. Как правильно записываются результаты измерений?
7. За счет чего при измерении возникает методическая погрешность?

Лабораторная работа № 3

ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ СЛИЧЕНИЯ ИХ ПОКАЗАНИЙ С ПОКАЗАНИЯМИ ЭТАЛОНОВ

Цель работы:

1. Ознакомиться с общими требованиями и правилами поверки электромеханических измерительных приборов.
2. Усвоить основные метрологические понятия.
3. Произвести поверку электромеханического амперметра и вольтметра.

Общие сведения

По окончании измерительного эксперимента результатам измерения должна сопутствовать некоторая количественная характеристика качества результата измерений, чтобы при использовании данного результата было возможно оценить его достоверность. Без такой информации результаты измерений нельзя сопоставить ни друг с другом, ни со значениями, указанными в технических условиях, стандартах и других нормативных документах, т. е. значимость их ничтожна. Такой количественной характеристикой качества результата измерений может служить погрешность.

Погрешностью измерения называют отклонение результата измерения от истинного значения величины.

Одним из постулатов метрологии является положение о том, что *истинное значение* величины существует, однако определить его путем измерения невозможно. Поэтому при оценке погрешности измерения вместо истинного значения величины используют *опорное*. Во многих практических случаях в качестве опорного значения используют т. н. *действительное*.

Действительное значение – это значение величины, найденное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи может его заменить. За действительное значение величины чаще всего принимают

измеренное значение, полученное при использовании эталона или калиброванного средства измерений.

По способу выражения различают абсолютную и относительную погрешности измерения.

Под *абсолютной погрешностью* ΔX понимается разность между измеренным значением X данной величины и ее опорным (действительным) значением X_o (X_d):

$$\Delta X = X - X_o = X - X_d. \quad (3.1)$$

Абсолютная погрешность имеет размерность, выраженную в тех же единицах, что и сама измеряемая величина.

Более полное представление о точности измерения дает *относительная погрешность*, определяемая как отношение абсолютной погрешности к опорному (действительному) значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_o} \cdot 100 \% = \frac{\Delta X}{X_d} \cdot 100 \% \approx \frac{\Delta X}{X} \cdot 100 \%. \quad (3.2)$$

Относительная погрешность характеризует точность измерения и точность прибора лишь в данной точке шкалы.

Для характеристики погрешности средств измерений и получения возможности сравнения по точности приборов различных типов и систем, с различными диапазонами измерений вводится понятие *приведенной погрешности*, представляющей собой выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности ΔX к нормирующему значению X_N , устанавливаемому в стандартах на конкретные разновидности средств измерений:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100 \%. \quad (3.3)$$

Нормирующее значение X_N для большинства электромеханических приборов принимается равным: а) *конечному значению* шкалы прибора, если нулевая отметка прибора находится на краю или вне

шкалы; б) *номинальному значению*, если прибор предназначен измерять величины, имеющие номинальное значение; в) *арифметической сумме конечных значений* диапазона измерений, если прибор имеет двустороннюю шкалу, т. е. нулевая отметка находится на середине шкалы; г) *длине шкалы*, если шкала резко нелинейна (гиперболическая, логарифмическая).

Причины возникновения погрешностей различны и зависят как от несовершенства теории и конструкции самого измерительного прибора, так и от условий измерения.

По условиям определения погрешности средств измерений различают основную погрешность и дополнительные.

Основной называется погрешность средств измерений, применяемых в нормальных условиях эксплуатации (при нормальных параметрах внешней среды: температуре, влажности, атмосферном давлении; правильном геометрическом расположении; соответствующих прибору частоте, роду тока, формы кривой тока и т. п.). Нормальные условия для каждого средства измерений указываются в технических нормативных правовых актах (ТНПА), в соответствии с которыми они выпускаются, – технических условиях (ТУ), стандартах и т. п. Например, область нормальных значений температуры окружающей среды для большинства рабочих приборов составляет $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$, относительной влажности воздуха от 30 % до 80 %, атмосферного давления от 84 до 106 кПа.

При отклонении условий измерения от нормальных возникают *дополнительные* погрешности измерения.

Для сопоставления средств измерений, предназначенных для измерения одной и той же физической величины, по точности служит *класс точности*.

Класс точности – обобщенная характеристика данного типа средств измерений, отражающая, как правило, уровень их точности и выражаемая точностными характеристиками средств измерений.

Для большинства аналоговых электромеханических приборов, у которых преобладает *аддитивная* (неизменная во всем диапазоне измерений) составляющая погрешности, класс точности устанавливается по *допустимой основной приведенной погрешности*. Следовательно, для таких приборов класс точности указывает в процентах допустимую основную приведенную погрешность, гарантируемую производителем.

При эксплуатации измерительных приборов точность их измерений может изменяться в результате нестабильности свойств отдельных деталей, износа или повреждения некоторых частей прибора. Вследствие этого могут возникнуть погрешности, не соответствующие классу точности прибора, что может привести к невозможности его использования (негодности). Для определения годности средств измерений проводится их поверка.

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

Поверка проводится в обязательном порядке при выпуске прибора из производства, после ремонтов и регулировок приборов, а также периодически. Сроки периодических поверок измерительных приборов регламентируются органами Госстандарта.

Поверка технических щитовых приборов может производиться на местах их установки методом сличения их показаний с показаниями рабочих эталонов. Переносные приборы поверяются в специальных измерительных поверочных лабораториях.

Поверка измерительного прибора включает в себя его внешний осмотр для установления механической и электрической исправности, определение основной погрешности и других метрологических характеристик, нормируемых наравне с погрешностями при установлении класса его точности, документальное оформление поверки протоколом.

Поверяемый прибор не должен иметь повреждений указателя (стрелки), корректора, корпуса и стекла шкалы. Все его клеммы и контакты, электрические цепи должны быть исправны.

Электроизмерительные приборы классов точности 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 поверяются по методу сличения их показаний с показаниями рабочих эталонов. Такой метод поверки требует выполнения следующих метрологических условий:

1. Допустимая абсолютная погрешность рабочего эталона должна быть не менее чем в 4 раза меньше допустимой абсолютной погрешности поверяемого прибора или в 2,5 раза меньше при введении поправок в показания рабочего эталона.

2. Диапазоны частот и диапазоны измерений рабочих эталонов должны включать соответствующие диапазоны поверяемого прибора.

3. Указатели (стрелки) приборов устанавливают корректором на нулевую отметку шкалы при отключенных цепях тока и напряжения.

4. Поверка прибора осуществляется на *всех числовых отметках* шкалы не менее *двух раз* на каждой отметке: один раз при возрастании (от 0 до верхнего предела шкалы), второй раз при убывании (от верхнего предела шкалы до 0) измеряемой величины.

Наряду с основной и дополнительными погрешностями при установлении классов точности электромеханических приборов нормируется вариация показаний.

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

Если для измерительного прибора нормируется приведенная погрешность, то и вариация показаний V выражается в процентах от нормирующего значения X_N :

$$V = \frac{X_B - X_Y}{X_N} \cdot 100 \%, \quad (3.4)$$

где X_B , X_Y – показания эталона при возрастающих и убывающих значениях измеряемой величины соответственно.

Для технических приборов вариация показаний не должна превышать абсолютного значения основной приведенной погрешности прибора.

По данным поверки определяются наибольшая основная приведенная погрешность и вариация. Если они меньше предельного допустимого значения для данного класса точности, то делается заключение о *годности* прибора, в противном случае прибор признается *негодным*.

Порядок выполнения работы

А. Поверка амперметра электромагнитной системы

1. Собрать схему поверки (рис. 3.1).

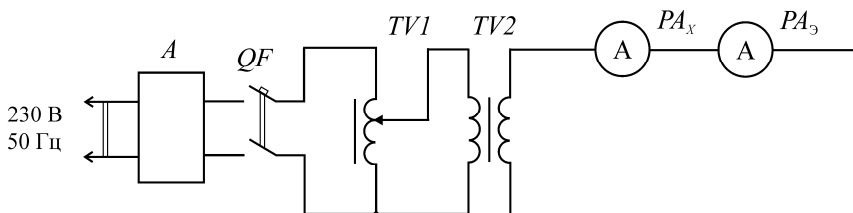


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки для проверки амперметра:

A – стабилизированный источник питания;

QF – автоматический выключатель;

PA_x – поверяемый амперметр; $PA_э$ – эталонный амперметр;

$TV1$ – ЛАТР; $TV2$ – понижающий трансформатор

2. Проверить положения указателей на нулевых делениях шкалы при отсутствии тока в цепи и, если необходимо, установить их с помощью корректора.

3. Включить стабилизированный источник питания A , подать напряжение с помощью автоматического выключателя QF и с помощью ЛАТРа установить номинальный ток поверяемого амперметра, при котором прогреть прибор в течение 15 мин.

4. Произвести поверку амперметра в два хода: сначала при увеличении его показаний до верхнего предела диапазона измерений, затем – при уменьшении их до нуля. Поверке подлежат все числовые отметки шкалы поверяемого амперметра. Значение тока устанавливать по поверяемому амперметру.

5. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений и вычислений (задание А)

Измерено			Вычислено						
I , А	$I_{дв}$, А	$I_{ду}$, А	ΔI_v , А	ΔI_y , А	δ_v , %	δ_y , %	γ_v , %	γ_y , %	V , %
0	0	0	0	0	—	—	0	0	0
0,2									
0,4									
0,6									
0,8									
1,0									

6. По результатам поверки сделать заключение о годности поверяемого прибора.

Б. Поверка вольтметра электромагнитной системы

1. Собрать схему поверки (рис. 3.2).

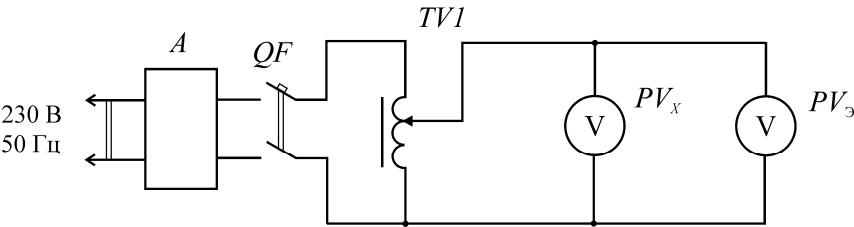


Рис. 3.2. Схема лабораторной установки для поверки вольтметра:
PV_x – поверяемый вольтметр; *PV_s* – эталонный вольтметр

2. Проверить установку указателей на нулевых делениях шкал при отсутствии напряжения.

3. Подать напряжение и с помощью ЛАТРа установить стрелку на верхнюю отметку шкалы поверяемого вольтметра, прогреть его в течение 15 мин.

4. Произвести поверку вольтметра в два хода во всех числовых отметках шкалы.

5. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты измерений и вычислений (задание Б)

Измерено			Вычислено						
<i>U</i> , В	<i>U_{дв}</i> , В	<i>U_{ду}</i> , В	$\Delta U_{в}$, В	$\Delta U_{у}$, В	$\delta_{в}$, %	$\delta_{у}$, %	$\gamma_{в}$, %	$\gamma_{у}$, %	<i>V</i> , %
0	0	0	0	0	—	—	0	0	0
50									
100									
150									
200									
250									

6. Сделать заключение о годности поверяемого вольтметра.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под абсолютной погрешностью?
2. Что называется относительной погрешностью?
3. Каковы причины возникновения основной и дополнительных погрешностей?
4. Что называется приведенной погрешностью? Что она характеризует?
5. Что называется классом точности прибора?
6. Как соотносятся между собой погрешности поверяемого прибора и эталона?
7. Что такое вариация показаний прибора?
8. Что означает число, обозначающее класс точности измерительного прибора?
9. Что понимается под поверкой измерительного прибора? Когда она производится?

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы:

1. Ознакомиться с принципами измерения сопротивления методом сравнения.
2. Ознакомиться с принципиальным устройством мостов постоянного тока для измерения средних и малых сопротивлений.
3. Приобрести практические навыки в работе с мостом постоянного тока типа МО-61.

Общие сведения

Мосты постоянного тока по принципу действия относятся к приборам сравнения. В этих приборах измеряемая величина определяется в результате сравнения ее с мерой данной величины. При этом возможны два метода:

1. Эффект, производимый измеряемой величиной, полностью уравнивается эффектом, производимым мерой этой величины, а числовое значение измеряемой величины равно числовому значению меры. Такой режим работы моста называют равновесным, и именно он наиболее часто используется при измерении сопротивления.
2. Эффект, производимый измеряемой величиной, не уравнивается эффектом ее меры, а о числовом значении измеряемой величины судят по измеряемой разности указанных эффектов. Этот режим работы моста называется неравновесным, и он получил преимущественное распространение при измерениях неэлектрических величин электрическими методами.

Мосты постоянного тока подразделяются на одинарные, используемые для измерения сопротивления средней величины (в диапазоне от 1 до $1 \cdot 10^6$ Ом), и двойные, которые применяются для измерения малых сопротивлений (от $1 \cdot 10^{-6}$ до 1 Ом).

В настоящее время большое распространение получили комбинированные мосты постоянного тока, рассчитанные на работу по схеме одинарного и двойного моста. Такое объединение позволяет значительно расширить диапазон измерения и обеспечивает хорошую точность во всем диапазоне измерения. Используемый в настоящей

работе мост постоянного тока типа МО-61 относится к одинарным мостам с двух- и четырехзажимным подключением измеряемого сопротивления с общим диапазоном измерения от 10^{-4} до 10^8 Ом.

Принципиально схема одинарного моста представляет собой четырехполюсник, к двум зажимам которого подводится питание, а к двум другим подключен указатель равновесия. Элементы внутренней цепи такого четырехполюсника называют плечами моста, а цепи питания и указателя равновесия – диагоналями.

Измеряемое сопротивление является одним из плеч моста, а в остальные плечи включаются регулируемые сопротивления (многозначные меры сопротивления). Регулируя сопротивления одного или двух плеч моста, можно уравновесить мост – добиться отсутствия тока в диагонали указателя равновесия (напряжения на измерительной диагонали). Измеряемое сопротивление при равновесии моста определяется по трем известным сопротивлениям остальных плеч. Четырехплечий мост, работающий по этому принципу, называют уравновешенным, его принципиальная схема показана на рис. 4.1.

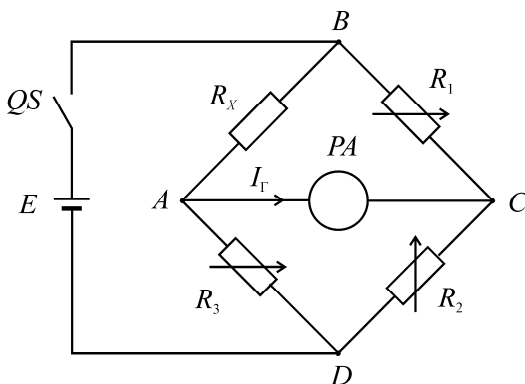


Рис. 4.1. Схема одинарного моста постоянного тока

На схеме видно, что в первое плечо моста включается измеряемое сопротивление R_x , а в остальные плечи – известные регулируемые сопротивления R_1 , R_2 и R_3 . В диагональ AC включен индикатор равновесия, в качестве которого используется высокочувствительный магнитоэлектрический гальванометр либо высокочувствительный вольтметр с большим входным сопротивлением, например цифровой. К другой диагонали BD подведено питание от источника E .

Условие равновесия такого четырехплечего (одинарного) моста записывается в следующей форме:

$$R_x R_2 = R_1 R_3, \quad (4.1)$$

т. е. определяется как *равенство произведений сопротивлений противоположащих плеч*. Отсюда искомое сопротивление может быть подсчитано по формуле

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} = R_1 \frac{R_3}{R_2}. \quad (4.2)$$

Из формулы видно, что измерение сопротивления мостом сводится к регулированию одного (смежного с измеряемым) плеча R_1 , называемого плечом сравнения, при неизменном отношении двух других плеч R_3/R_2 или к регулированию отношений двух плеч R_3/R_2 при постоянном значении плеча сравнения R_1 до получения нулевого показания гальванометра PA . На практике применяют оба способа уравнивания мостов.

Точность измерений на мостах зависит от чувствительности гальванометра S_r и чувствительности мостовой схемы S_{cx} . Произведением этих величин определяется т. н. чувствительность моста S_m , под которой понимается отношение изменения отклонения гальванометра к изменению измеряемого сопротивления:

$$S_m = S_r S_{cx} = \frac{d\alpha_r}{dI_r} \frac{dI_r}{dR_x} = \frac{d\alpha_r}{dR_x}. \quad (4.3)$$

При измерении на четырехплечих одинарных мостах постоянного тока малых сопротивлений (менее 1 Ом) неизбежны значительные погрешности. Их величина зависит от соизмеримости сопротивлений соединительных проводов и контактов с измеряемым сопротивлением. Чем ближе по значению величина измеряемого сопротивления к сопротивлениям соединительных проводов и контактов, тем больше погрешность измерения.

Поэтому для измерения малых сопротивлений применяют специальные двойные мосты, принцип действия которых поясняется схемой, показанной на рис. 4.2.

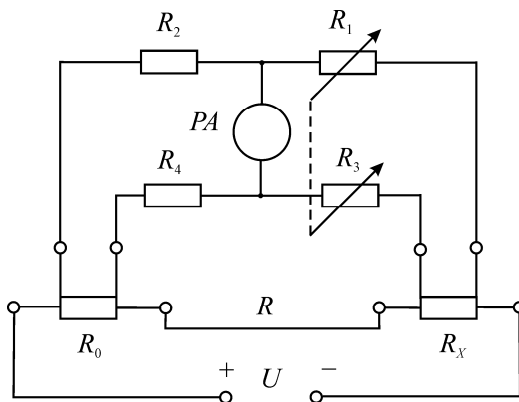


Рис. 4.2. Схема двойного моста постоянного тока

Показанный на рис. 4.2 двойной шестиплечий мост работает по принципу сравнения измеряемого сопротивления R_X с образцовой мерой сопротивления R_0 . Для уменьшения влияния переходных сопротивлений контактов измеряемое сопротивление включается в цепь через специальное четырехзажимное приспособление.

Плечами двойного моста служат измеряемое сопротивление R_X , образцовое сопротивление R_0 и две пары вспомогательных сопротивлений R_1 , R_3 и R_2 , R_4 . Вспомогательные сопротивления имеют величины не меньше 10 Ом каждое, благодаря чему сопротивления соединительных проводов и контактов, относящихся к этим плечам, практически не оказывают влияния на результат измерения, поскольку обладают существенно меньшими величинами (тысячные доли Ом).

Условие равновесия двойного моста, решенное относительно измеряемого сопротивления R_X , имеет вид двучлена:

$$R_X = R_0 \frac{R_1}{R_2} + \frac{RR_4}{R + R_3 + R_4} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right). \quad (4.4)$$

Для приведения этого уравнения к виду, удобному для практического применения, второе слагаемое необходимо сделать равным нулю, т. е. получить условие

$$\frac{RR_4}{R + R_3 + R_4} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) = 0. \quad (4.5)$$

Это условие удовлетворяется при $R = 0$, т. е. когда сопротивление проводника, соединяющего R_0 с R_x , равно нулю, или при $\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} = 0$, когда попарно равны $R_1 = R_3$ и $R_2 = R_4$. Практически

это достигается следующим образом. Соединительный проводник выполняют коротким и большого сечения, поэтому его сопротивление очень мало (порядка $1 \cdot 10^{-6}$ Ом). Сопротивления же R_1 , R_3 и R_2 , R_4 выбирают попарно равными, причем переключающее устройство, предназначенное для регулирования сопротивлений R_1 и R_3 , конструктивно выполнено так, что оба эти сопротивления можно регулировать только одновременно и строго одинаково. Благодаря таким мерам величиной второго слагаемого в формуле условия равновесия двойного моста можно пренебречь, тогда условие равновесия принимает вид:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} = R_0 \frac{R_3}{R_4}. \quad (4.6)$$

Как видно из этого условия, в двойном мосте имеется одно плечо сравнения R_0 и две пары плеч – отношения R_1/R_2 и R_3/R_4 . Поэтому такие мосты называются двойными.

При работе с двойными мостами следует иметь в виду, что при протекании рабочего тока по цепи R_x и R_0 возможно появление термоЭДС в местах контакта разных металлов при их нагревании. Для исключения влияния этих эффектов на результат измерения каждое измерение на двойном мосте должно производиться обязательно дважды, при различных направлениях тока. Это приводит к тому, что возникающие термоЭДС сначала увеличивают, затем уменьшают результат измерения, а среднее арифметическое двух замеров позволяет полностью устранить их влияние.

Помимо причин, определяющих чувствительность одинарного моста, для двойного моста существенно выбрать правильную величину рабочего тока. Чем больше ток, тем выше чувствительность моста. Величина тока ограничивается значениями, допустимыми для используемых образцовых и измеряемых сопротивлений. Обычно в современных двойных мостах рабочий ток устанавливают порядка нескольких ампер, что определяется допустимой для R_0 мощностью. Поэтому для питания мостов применяют источники достаточной

емкости, например, аккумуляторные батареи емкостью 40–100 А·ч и напряжением 2–4 В.

Для получения наиболее высокой чувствительности моста следует при измерениях стараться выбирать сопротивления всех плеч моста равными измеряемому сопротивлению по порядку величин.

Технические данные моста МО-61

Мост типа МО-61 предназначен для измерения омических сопротивлений в пределах от 10^{-4} до 10^8 Ом в лабораторных условиях, т. е. при температуре окружающего воздуха от $+15$ °С до $+30$ °С и относительной влажности воздуха до 80 %.

Измерение сопротивлений в диапазоне от 10^{-4} до 10^2 Ом выполняется по четырехзажимной схеме подключения измеряемого сопротивления R_x , а в диапазоне от 10^2 до 10^8 Ом – по двухзажимной схеме подключения.

При нормальных условиях эксплуатации моста его основная погрешность, выраженная в процентах от нормального значения измеряемого сопротивления, не превышает следующих значений:

$$\begin{aligned} &\pm 1 \% \text{ в пределах от } 10^{-4} \text{ до } 10^{-3} \text{ Ом;} \\ &\pm 0,1 \% \text{ в пределах от } 10^{-3} \text{ до } 10^{-2} \text{ Ом;} \\ &\pm 0,05 \% \text{ в пределах от } 10^{-2} \text{ до } 10^8 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Мост питается от сети переменного тока напряжением 133/230 В ± 10 % через встроенный блок питания, обеспечивающий 3 и 30 В стабилизированного напряжения и 90 В нестабилизированного. Кроме того, предусмотрена возможность подключения внешнего источника питания.

В качестве индикатора равновесия следует использовать цифровой вольтметр.

Работа моста при нулевом методе измерения

Измерение сопротивлений в диапазоне от 10^2 до 10^8 Ом

В этом диапазоне измерения производятся по схеме двухзажимного подключения измеряемого сопротивления (рис. 4.3). Сопротивления величиной от 10^2 до 10^5 Ом измеряются с использованием прямой схемы, когда R_x и плечо сравнения R_{cp} находятся в разных ветвях

относительно источника питания моста (рис. 4.3, *а*). При измерении больших сопротивлений (в диапазоне от 10^5 до 10^8 Ом) используется обратная схема, при которой R_X и R_{cp} находятся в одной ветви относительно источника питания моста (рис. 4.3, *б*). Переход от прямой схемы к обратной или к схеме с четырехзажимным подключением осуществляется при помощи расположенного на панели прибора кнопочного переключателя путем нажатия на соответствующую кнопку $M_{2пр}$, $M_{2обр}$, M_4 .

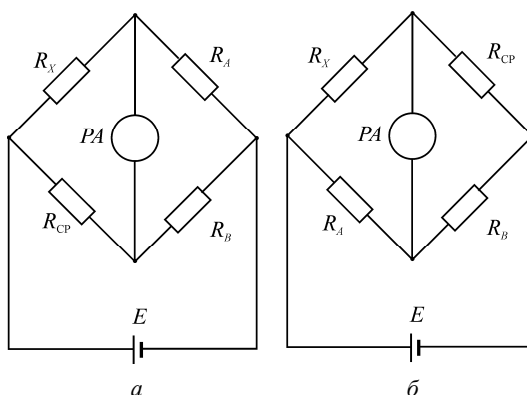


Рис. 4.3. Схема одинарного моста МО-61 при измерении сопротивлений:
а – в диапазоне от 10^2 до 10^5 Ом; *б* – в диапазоне от 10^5 до 10^8 Ом

Регулирование чувствительности моста производится посредством расположенного на панели переключателя «Чувствительность» с позициями от «Выкл» до «7», позволяющего ступенчато изменять чувствительность моста от 0 до максимума.

При измерении малых сопротивлений используется четырехзажимная схема подключения измеряемого сопротивления.

Измерение сопротивлений в диапазоне 10^{-4} до 10^2 Ом

При использовании схемы, приведенной на рис. 4.4, измеряемое сопротивление подключается к мосту посредством калиброванных проводов сопротивлением 0,01 Ом. Для устранения влияния сопротивления этих проводов на результат измерения собственные сопротивления плеча сравнения R_{cp} и одного плеча отношения R_A в этой схеме уменьшены на 0,01 Ом каждое.

Плечо сравнения представляет собой шестидекадный рычажный магазин сопротивления с декадами $\times 1000$, $\times 100$, $\times 10$, $\times 1$, $\times 0,1$ и $\times 0,01$ Ом.

Плечи отношения моста выполнены в виде двух штепсельных магазинов сопротивления, каждый из которых состоит из ряда сопротивлений, позволяющих путем установки штепселей в соответствующие гнезда получать отношения $R_A/R_B = 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000; 10\ 000$. На схеме рис. 4.4 видно, как часть сопротивлений плеча сравнения и плеча отношения, равная $0,01\ \text{Ом}$, заменяется при четырехзажимной схеме сопротивлениями калиброванных соединительных проводов, также равных $0,01\ \text{Ом}$:

$$R_{\text{ср}} = R + R'_{\text{ср}} = 0,1 + 11\ 111,2\ \text{Ом};$$

$$R_A = R + R'_A = 10; 100; 1000; 10\ 000; 100\ 000\ \text{Ом}.$$

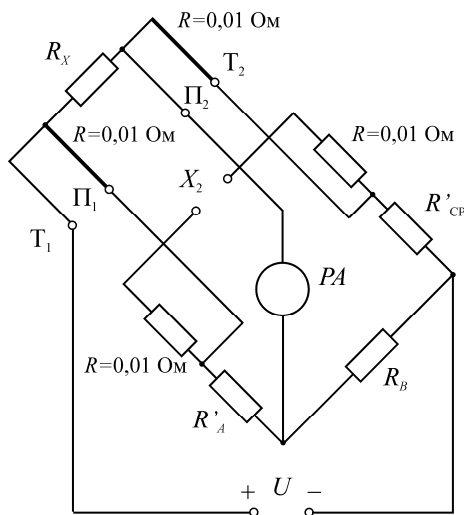


Рис. 4.4. Схема моста МО-61 при четырехзажимной схеме подключения измеряемого сопротивления

Порядок выполнения работы

Инструкция по эксплуатации моста МО-61

Подготовка прибора к работе:

1. Переключатель «Сеть» поставить в позицию «Выкл».
2. Подключить цифровой вольтметр к зажимам «Г».
3. Переключатель «Чувствительность» поставить в позицию «Выкл».
4. Переключатель « $R_{\text{ш}} - R_{\text{д}}$ гальванометра» поставить в позицию «1».

5. Кнопки кнопочного переключателя установить в отжатое положение.

6. Соединительным шнуром подключить мост к розетке электросети.

Порядок проведения измерений:

Перед измерением необходимо определить порядок R_X , для чего:

1. Подключить R_X к зажимам « X_2 ».

2. Вставить щетпсели « A » и « B » в гнезда «1000».

3. Нажать кнопку кнопочного переключателя « M_{2np} ».

4. Включить питание моста тумблером «Сеть», при этом должна загореться сигнальная лампочка.

5. Переключатель «Чувствительность» последовательно переводить в позиции «1», «2» и т. д., пока значение напряжения на измерительной диагонали, измеряемое цифровым вольтметром, не отклонится заметно от нулевого значения; если это не происходит, необходимо переставлять щетпсель « A » в гнезда «100», «10», а щетпсель « B » – в гнезда «10 000», «100 000» или наоборот.

6. Добившись значения напряжения на измерительной диагонали, отличного от нуля, уравнивать мост, начиная с верхней декады плеча сравнения и постепенно переходя на низшие декады. При изменении полярности напряжения следует вернуть высшую декаду в исходное положение и перейти на низшую декаду и т. д.

7. Рассчитать ориентировочное значение $R_X = R_{cp} \frac{R_A}{R_B}$, где R_{cp} –

отсчет по плечу сравнения, R_A и R_B – отсчеты по щетпсельным магазинам плеч отношения.

Если ориентировочная величина R_X лежит в диапазоне от 10^{-4} до 10^2 Ом, следует для точного измерения использовать четырехзажимную схему, показанную на рис. 4.4. Если R_X имеет порядок от 10^2 до 10^8 Ом, необходимо применить одну из двухзажимных схем (прямую или обратную), показанных на рис. 4.3, а и б.

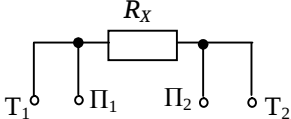
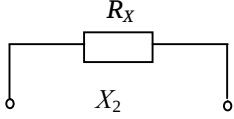
Диапазон измерения от 10^{-4} до 10^2 Ом

1. Подключить измеряемое сопротивление посредством калиброванных проводов к зажимам моста « T_1 », « P_1 », « P_2 », « T_2 ».

2. Поставить щетпсели плеч отношения « A » и « B » и кнопочный переключатель в позиции, указанные в табл. 4.1 (или внутри крышки прибора) для данного предела и метода измерения.

Таблица 4.1

Положения штепселей плеч сравнения, кнопочного переключателя, напряжения питания моста и схем подключения R_X в зависимости от его пределов

Пределы измерения, Ом	От 10^{-4} до 10^{-1}	От 10^{-1} до 1	От 1 до 10	От 10 до 10^2	От 10^2 до 10^3	От 10^3 до 10^4	От 10^4 до 10^5	От 10^5 до 10^6	От 10^6 до 10^7	От 10^7 до 10^8
Схема подключения R_X к зажимам моста										
Штепсель плеча «А»	10	10	10	10^2	10^2	10^3	10^4	10^5	10^5	10^5
Штепсель плеча «В»	10^5	10^4	10^3	10^3	10^2	10^3	10^3	10^3	10^2	10
Кнопочный переключатель	M_4				$M_{2пр}$			$M_{2обр}$		
Напряжение питания	3 В				30 В			90 В		

3. Включить тумблер «Сеть» и, постепенно повышая чувствительность моста переключением позиций переключателя «Чувствительность» до максимальной, уравновесить мост, добившись нулевого значения напряжения на измерительной диагонали (нулевого показания цифрового вольтметра).

4. Определить точное значение R_X по формуле

$$R_X = R_{cp} \frac{R_A}{R_B}$$

и занести его в табл. 4.2.

5. Подготовить мост для следующего измерения, для чего установить переключатель «Чувствительность» в позицию «Выкл», все декады плеча сравнения – в нулевые положения и тумблер «Сеть» – в позицию «Выкл».

Таблица 4.2

Таблица измерений и вычислений

Пределы измерения	Значения сопротивления плеч			Расчетные значения R_X , Ом
	R_{cp} , Ом	R_A , Ом	R_B , Ом	

Диапазон измерения от 10^2 до 10^5 Ом

1. Подключить измеряемое сопротивление к зажимам « X_2 ».
2. Установить кнопочный переключатель в позицию, соответствующую нажатию на кнопку « M_{2np} », что приведет к коммутированию схемы рис. 4.3, а.
3. Вести измерения аналогично измерениям в диапазоне от 10^{-4} до 10^2 (см. п. 2–5 предыдущего раздела).

Диапазон измерения от 10^5 до 10^8 Ом

1. Подключить измеряемое сопротивление к зажимам « X_2 ».
2. Кнопочный переключатель установить в позицию, соответствующую нажатию на кнопку « $M_{2обp}$ », что приведет к коммутированию схемы рис. 4.3, б.

3. Вести измерения аналогично измерениям в предыдущих разделах.

Предупреждение! При точных измерениях необходимо учесть влияние контактных и термоэлектродвижущих сил на результат измерения. Для этого следует при всех измерениях, уравнив мост, проверить, сохраняется ли нулевое положение гальванометра при отключении источника питания. Если да, то можно считать, что эти ЭДС практически не влияют на результат измерения. Если же будет иметь место заметное отклонение, то мост следует уравнивать к полученному отклонению, которое именуется ложным нулем.

Контрольные вопросы и задания

1. Каковы пределы измерения одинарных мостов постоянного тока?
2. Каковы пределы измерения двойных мостов постоянного тока?
3. Как устраняется влияние сопротивления соединительных проводов при использовании четырехзажимной схемы подключения R_x ?
4. Как учитывается наличие и устраняется влияние контактных и термоэлектрических ЭДС на результат измерения малых сопротивлений?
5. Какой режим работы моста называется равновесным, или нулевым?
6. Как определяется момент равновесия моста? По какому прибору?
7. В чем принципиально состоит метод сравнения?
8. Изобразите принципиальную схему одинарного моста постоянного тока. Запишите условие его равновесия.

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ОСЦИЛЛОГРАФА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы:

1. Изучить устройство и принцип действия электронно-лучевого и цифрового осциллографов.
2. Освоить приемы использования осциллографа в измерительной практике.

Общие сведения

Осциллограф – прибор для визуального наблюдения электрических процессов, представленных в форме напряжения, а также измерения различных параметров сигналов, определяющих их мгновенные значения и временные характеристики. Кроме того, осциллограф может быть использован для измерения фазового сдвига между синусоидальными напряжениями, а также для измерения частоты.

Различают аналоговые электронные (электронно-лучевые) и цифровые осциллографы. В настоящее время преобладающими в применении являются цифровые осциллографы.

Устройство и принцип действия электронно-лучевого осциллографа

Выходным устройством такого осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), представляющая собой стеклянную колбу, в которой создан вакуум и расположены определенные конструктивные элементы (рис. 5.1).

Группа электродов, включающая катод с нитью накала, модулятор и аноды (фокусирующий и ускоряющий) образуют т. н. электронную пушку, предназначенную для получения узкого пучка электронов – электронного луча. Отклоняющая система ЭЛТ состоит из двух пар пластин: горизонтальные пластины используются для отклонения луча по вертикали и называются вертикально отклоняющими, вертикальные пластины – для отклонения луча по горизонтали и называются горизонтально отклоняющими. Экран

трубки покрывается специальным веществом – люминофором, обладающим способностью светиться под действием ударяющихся в него электронов (электронного луча).

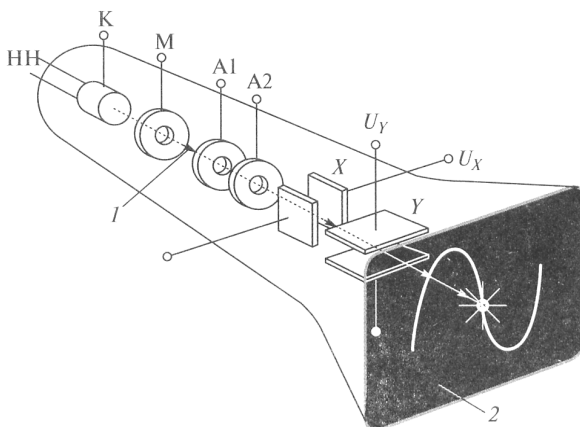


Рис. 5.1. Устройство ЭЛТ:

HH – нить накала; К – катод; М – модулятор;
A1, A2 – аноды; X, Y – отклоняющие пластины;
1 – поток электронов; 2 – экран

Для преобразования исследуемого сигнала в видимое изображение на экране вертикально и горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ перемещают электронный луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях, которые можно рассматривать как координатные оси.

Для получения на экране осциллографа изображения мгновенных значений сигнала, т. е. *осциллограммы* изменения сигнала во времени, исследуемый сигнал подается на вертикально отклоняющие пластины и одновременно электронный луч отклоняется с постоянной скоростью в горизонтальном направлении с помощью линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения, приложенного к горизонтально отклоняющим пластинам.

Напряжение, отклоняющее луч в горизонтальном направлении, называют *развертывающим*. По окончании цикла развертки развертывающее напряжение принимает первоначальное значение, при этом луч возвращается в исходное положение и цикл повторяется. В течение второго и последующих периодов луч и пятно на экране

будут повторять свое движение. Световая инерция экрана способствует получению на нем кривой, повторяющей в определенном масштабе исследуемый сигнал.

Условием неподвижного изображения при автоколебательном режиме развертки является кратность отношения периода развертывающего напряжения к периоду исследуемого сигнала, т. е. $T_p / T = N$, где N – целое число. Если $N = 1$, то на экране создается изображение одного периода исследуемого сигнала; если $N = 2$, то наблюдатель видит на экране два периода; и т. д. Процесс получения изображения на экране ЭЛТ можно пояснить посредством рис. 5.2.

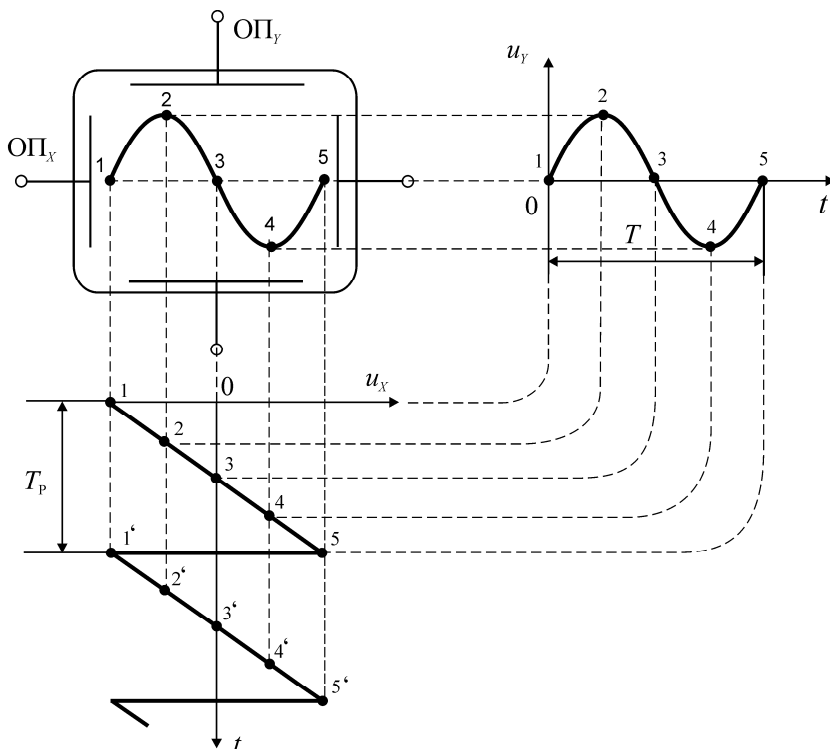


Рис. 5.2. Временные диаграммы, поясняющие получение осциллограмм при линейной автоколебательной развертке

Помимо электронно-лучевой трубки осциллограф имеет ряд других функциональных узлов, обеспечивающих его работу и возмож-

ность использования по назначению. Упрощенная структурная схема электронно-лучевого осциллографа представлена на рис. 5.3.

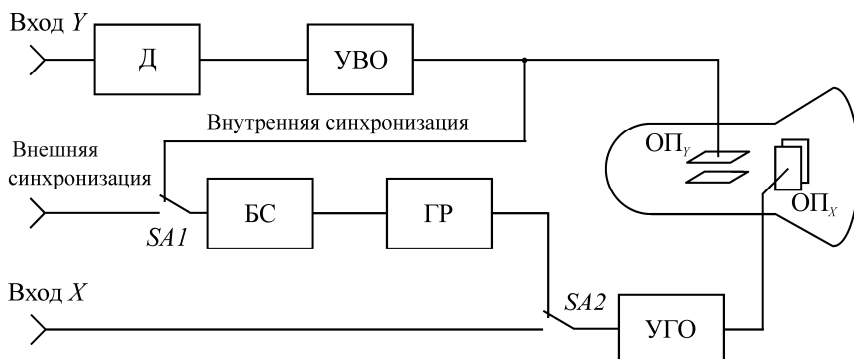


Рис. 5.3. Структурная схема электронно-лучевого осциллографа:

Д – делитель напряжения; УВО – усилитель вертикального отклонения;
УГО – усилитель горизонтального отклонения; БС – блок синхронизации;
ГР – генератор развертки; ОП_у – вертикально отклоняющие пластины;
ОП_х – горизонтально отклоняющие пластины

Делитель напряжения и усилители вертикального и горизонтального отклонения обеспечивают возможность исследовать сигналы различной величины (от милливольт до сотен вольт). Генератор развертки вырабатывает периодическое линейно изменяющееся (пилообразное) напряжение. Блок синхронизации служит для управления генератором развертки и обеспечивает выполнение условия $T_p / T = N$. Синхронизация может быть внутренней и внешней. При внутренней синхронизации сигнал, управляющий запуском генератора развертки, подается из внутренней цепи осциллографа, на которую воздействует исследуемый сигнал (из канала вертикального отклонения). При внешней синхронизации сигнал, управляющий запуском генератора развертки, подается извне.

Устройство и принцип действия цифрового осциллографа

В последнее время на практике успешно применяются цифровые осциллографы, в которых входные аналоговые сигналы преобразуются с помощью АЦП в коды, записываемые в цифровое запоминающее устройство, где они хранятся необходимое для исследования время. Для получения изображения на экране осцилло-

графа коды считываются с запоминающего устройства. При этом исследуемый сигнал обычно отображается на жидкокристаллическом матричном экране.

Простейшая структурная схема цифрового осциллографа представлена на рис. 5.4.

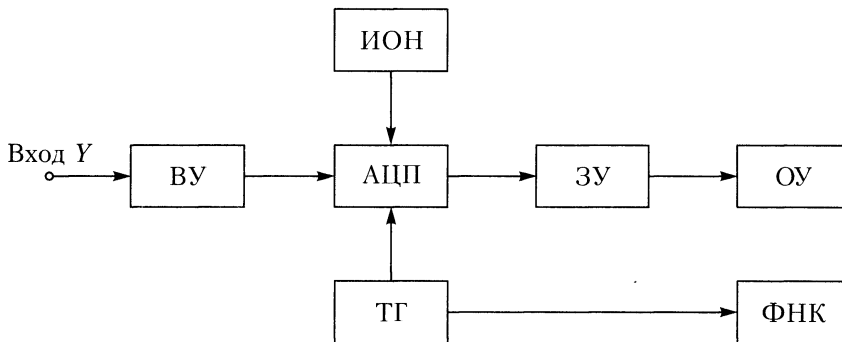


Рис. 5.4. Структурная схема цифрового запоминающего осциллографа

Мгновенные значения исследуемого сигнала, поступающего с входа Y через входное устройство ВУ на вход АЦП, в определенные моменты времени, задаваемые тактовым генератором ТГ, преобразуются в цифровые коды и запоминаются в цифровом запоминающем устройстве ЗУ. Далее эти коды поступают в отображающее устройство ОУ, где на их основе вырабатываются сигналы, управляющие вертикальным перемещением световой точки на экране. В те же моменты времени формирователем нарастающего кода ФНК вырабатывается код, равномерно нарастающий по времени. Он также поступает в отображающее устройство, где преобразуется в сигнал, управляющий горизонтальным перемещением световой точки на экране. Этот процесс имитирует временную развертку осциллографа.

Источник опорного напряжения ИОН вырабатывает определенные значения напряжений, которые поступают на входы компараторов АЦП, задавая их уровни срабатывания, соответствующие уровням квантования.

Функциональные возможности цифровых осциллографов значительно шире, чем возможности аналоговых. Они позволяют получать в цифровой форме многие параметры исследуемого сигнала, реали-

зовывать его дифференциальную, интегральную или спектральную характеристики и т. п., автоматизировать процесс измерения, управлять им дистанционно и т. д. На экране помимо осциллограмм в цифровой форме отображаются коэффициент отклонения (чувствительность по вертикали) и длительность развертки. Кроме того, применение матричных экранов уменьшает габариты цифровых осциллографов и делает их более безопасными с точки зрения охраны труда, поскольку в этом случае отпадает необходимость в использовании источников питания высокого напряжения.

Применение осциллографа для некоторых электрических измерений

Измерение амплитуды и временных интервалов исследуемых сигналов

Метод основан на измерении линейных размеров изображения непосредственно по шкале экрана ЭЛТ. Исследуемый сигнал подают на вход Y осциллографа и, изменяя коэффициент отклонения по вертикали (ручка «В/дел») и коэффициент развертки (ручка «Время/дел»), добиваются величины изображения в пределах рабочей части экрана.

Измеряемую амплитуду напряжения U_m рассчитывают по формуле

$$U_m = K_Y h, \quad (5.1)$$

где K_Y – коэффициент отклонения по вертикали (В/дел);

h – размер изображения амплитуды в делениях шкалы экрана.

Измеряемый временной интервал t_x определяют по формуле

$$t_x = K_p M_p l, \quad (5.2)$$

где K_p – коэффициент развертки (Время/дел);

M_p – множитель растяжки развертки ($\times 1, \times 0,2$);

l – размер изображения временного интервала в делениях шкалы экрана.

Измерение частоты

Частоту f_x периодического сигнала можно найти, определив его период T_x по формуле (5.2) и руководствуясь соотношением

$$f_x = \frac{1}{T_x}. \quad (5.3)$$

Измерение частоты методом фигур Лиссажу

Метод фигур Лиссажу может быть использован для измерения частоты синусоидальных напряжений. Метод основан на сравнении измеряемой частоты f_x с известной эталонной частотой f_y . Для этого на один из входов осциллографа (например, на вход канала Y) подается напряжение с измеряемой частотой f_x , а на вход канала X , работающего в режиме усиления (генератор развертки отключен), подается напряжение с известной эталонной частотой f_y . Электронный луч под действием двух взаимно перпендикулярных и меняющихся по гармоническому закону электрических полей с частотами f_x и f_y вычерчивает на экране некоторую сложную кривую. Если отношение частот выражается отношением целых чисел, то кривая (фигура Лиссажу) представляется в виде неподвижного изображения (пример таких фигур приведен на рис. 5.5). Для определения отношения частот фигуру Лиссажу необходимо пересечь вертикальной и горизонтальной прямыми, не пересекающими узлов фигуры, подсчитать число пересечений каждой прямой с линиями фигуры и найти их отношение. При этом справедливо соотношение

$$f_y N_y = f_x N_x, \quad (5.4)$$

где f_y, f_x – частоты, подаваемые на входы Y и X соответственно;

N_y, N_x – число пересечений фигуры с вертикальной (осью Y) и горизонтальной (осью X) прямыми.

Если, как было отмечено выше, на вход Y подается напряжение измеряемой частоты f_x , а на вход X – напряжение с известной частотой f_y , соотношение (5.4) примет вид:

$$f_x N_y = f_y N_x, \quad (5.5)$$

откуда

$$f_x = f_y \frac{N_x}{N_y}. \quad (5.6)$$

Погрешность измерения частоты при этом определяется погрешностью известной частоты f_y , т. е. погрешностью эталонного генератора, а значит, может быть обеспечена высокая точность, что является достоинством данного метода.

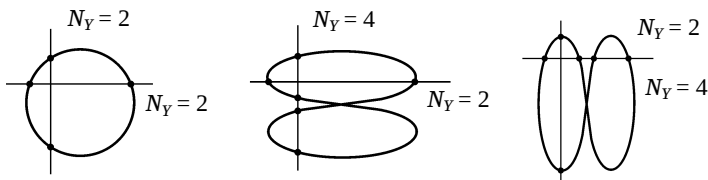


Рис. 5.5. Фигуры Лиссажу

Порядок выполнения работы

1. Используя руководство по эксплуатации применяемых в лаборатории электронно-лучевого и цифрового осциллографов, ознакомиться с назначением органов их управления и подготовить приборы к измерениям.

2. Произвести измерение параметров импульсного сигнала (амплитуды и длительности импульсов).

Подать на вход Y электронно-лучевого осциллографа сигнал с генератора импульсов. Амплитуду импульсов и диапазон генерируемых частот установить на генераторе по указанию преподавателя.

Измерить амплитуду и длительность импульсов, руководствуясь приведенными рекомендациями. Зарисовать в масштабе изображение с экрана осциллографа и привести рядом параметры настройки осциллографа (K_y , K_p , M_p).

Повторить измерения для других настроек амплитуды и диапазона генератора импульсов, указанных преподавателем, используя цифровой осциллограф.

3. Произвести измерение частоты периодического сигнала.

Подать на вход Y электронно-лучевого осциллографа сигнал с низкочастотного генератора синусоидальных сигналов по указанию преподавателя.

давателя. Определить частоту генерируемого сигнала, измерив предварительно его период, руководствуясь приведенными рекомендациями. Зарисовать в масштабе изображение с экрана осциллографа и привести рядом параметры настройки осциллографа (K_y , K_p , M_p).

Повторить измерения для других настроек диапазона генератора, указанных преподавателем, используя цифровой осциллограф.

4. Произвести измерение частоты методом фигур Лиссажу.

Собрать схему установки для измерения частоты методом фигур Лиссажу, приведенную на рис. 5.6.

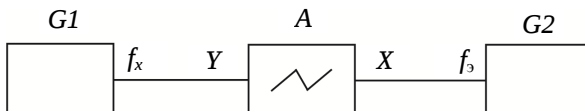


Рис. 5.6. Схема установки для измерения частоты методом фигур Лиссажу: $G1$ – низкочастотный генератор измеряемой частоты f_x ; $G2$ – низкочастотный генератор эталонной частоты f_0 ; A – электронно-лучевой осциллограф

Подать на вход Y осциллографа сигнал измеряемой частоты с генератора $G1$ по указанию преподавателя и, изменяя частоту сигнала эталонного генератора $G2$, подаваемого на вход X , получить на экране осциллографа неподвижное изображение фигуры Лиссажу. Зарисовать фигуру Лиссажу и, руководствуясь приведенными рекомендациями, определить значение измеряемой частоты.

Повторить измерения для двух других значений частоты генератора $G1$, указанных преподавателем, используя всякий раз иную фигуру Лиссажу.

Контрольные задания

1. Объясните устройство и принцип действия электронно-лучевого осциллографа по упрощенной структурной схеме.
2. Объясните устройство и принцип действия цифрового осциллографа по упрощенной структурной схеме.
3. Изложите методику измерения амплитуды и временных интервалов.
4. Изложите методику измерения частоты.
5. Изложите методику измерения частоты при помощи фигур Лиссажу.

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы:

1. Изучить устройство и принцип действия термопреобразователей сопротивления и термоэлектрических преобразователей.
2. Изучить устройство и принцип действия измерителя-регулятора МТ2.
3. Произвести поверку измерителя-регулятора МТ2.

Общие сведения

Измерительные преобразователи. При измерении температуры в качестве измерительных преобразователей наиболее часто используются *термопреобразователи сопротивления* (термометры сопротивления) и *термоэлектрические преобразователи* (термопары).

Принцип действия *термопреобразователей сопротивления* (ТС) основан на свойстве металлов изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Основной частью термопреобразователя сопротивления является *чувствительный элемент* (ЧЭ). Чувствительный элемент представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки с выводами для крепления соединительных проводов, имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Каркас с чувствительным элементом помещен в корпус защитной арматуры.

Общий вид термопреобразователя представлен на рис. 6.1.



Рис. 6.1. Общий вид термопреобразователя сопротивления

Наибольшее распространение получили термопреобразователи с *платиновыми* и *медными* чувствительными элементами.

Основными характеристиками термопреобразователя сопротивления по ГОСТ 6651–2009 являются:

1) номинальное сопротивление R_0 – нормированное изготовителем сопротивление ТС при 0 °С, округленное до целых единиц, указанное в его маркировке и рекомендуемое для выбора из ряда 10, 50, 100, 500, 1000 Ом;

2) температурный коэффициент α , определяемый по формуле $\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100^\circ\text{C}}$, где R_{100} и R_0 – значения сопротивления ТС при 100 °С и 0 °С;

3) номинальная статическая характеристика (НСХ) – зависимость сопротивления ТС от температуры с конкретным значением R_0 , рассчитанная по формулам, приведенным в ГОСТ 6651–2009, или представленная в виде таблицы.

Условное обозначение НСХ состоит из значения номинального сопротивления R_0 и обозначения типа: М – медный с $\alpha = 0,00428^\circ\text{C}^{-1}$, П – платиновый с $\alpha = 0,00391^\circ\text{C}^{-1}$ и Pt – платиновый с $\alpha = 0,00385^\circ\text{C}^{-1}$. Русское обозначение типа приводят за значением номинального сопротивления, латинское обозначение – перед значением номинального сопротивления. Например, 100П означает НСХ для платинового ТС с $\alpha = 0,00391^\circ\text{C}^{-1}$ и $R_0 = 100$ Ом; Pt100 означает НСХ для платинового ТС с $\alpha = 0,00385^\circ\text{C}^{-1}$ и $R_0 = 100$ Ом.

Медные термопреобразователи сопротивления можно применять для измерения температуры в диапазоне от –200 °С до +200 °С, платиновые – от –260 °С до +600 °С.

Достоинством медных преобразователей является линейность статических характеристик, недостатком – ограниченный диапазон измерения и более низкая точность по сравнению с платиновыми.

Основным недостатком платиновых термопреобразователей сопротивления является нелинейность статических характеристик. Однако хорошая воспроизводимость зависимости сопротивления от температуры, химическая стойкость и пластичность платины позволяет создавать высокоточные измерительные преобразователи, что, в конечном счете, обуславливает их широкое распространение.

Принцип действия *термоэлектрических преобразователей* основан на *термоэлектрическом эффекте* (эффекте Зеебека), сущ-

ность которого заключается в том, что при соединении двух разнородных проводников в месте их соединения возникает ЭДС (термоЭДС), зависящая от рода материала проводников и разности температур места соединения и свободных концов. Проводники, образующие термопару, называются *термоэлектродами*. Место соединения термоэлектродов называется *горячим* (или *рабочим*) спаем. Противоположные концы называются *холодными* (или *свободными*) (рис. 6.2).

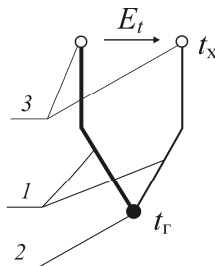


Рис. 6.2. Схема термоэлектрического преобразователя (термопары):
1 – термоэлектроды; 2 – горячий (рабочий) спай; 3 – холодные (свободные) концы

ТермоЭДС, развиваемая термопарой, пропорциональна разности температур горячего спая и холодных концов и для небольшого диапазона температур может быть выражена линейной зависимостью

$$E_t = \alpha(t_g - t_x), \quad (6.1)$$

где α – коэффициент, зависящий от материала термоэлектродов и диапазона температур;

t_g – температура горячего спая;

t_x – температура холодных концов.

В общем случае НСХ термопар для всего диапазона измерений являются нелинейными, при их использовании для измерения температуры необходимо предусматривать меры по линеаризации.

В качестве термоэлектродов могут использоваться различные металлы и их сплавы. В табл. 6.1 приведены наиболее широко используемые термопары и их основные характеристики (СТБ ГОСТ Р 8.585–2004).

Таблица 6.1

Характеристики термоэлектрических преобразователей (термопар)

Материал термоэлектродов	Обозначение типа (НСХ)	Диапазон измерений, °С
Хромель–копель	<i>L</i>	от –20 до +600
Железо–константан	<i>J</i>	от –200 до +800
Хромель–алюмель	<i>K</i>	от –20 до +1100
Платинородий (10 %)-платина	<i>S</i>	от 0 до +1300

Приборы для измерения температуры. Для измерения температуры совместно с *термопреобразователями сопротивления* используются магнитоэлектрические логометры, автоматические мосты и цифровые измерительные приборы.

Для измерения температуры совместно с *термоэлектрическими преобразователями* используются магнитоэлектрические милливольтметры, автоматические компенсаторы (потенциометры) и цифровые измерительные приборы.

В настоящее время в мире выпускается широкая номенклатура цифровых приборов для измерения и регулирования температуры. Одним из таких приборов является измеритель-регулятор МТ2, представляющий собой программируемое микропроцессорное устройство.

В общем виде структурная схема прибора представлена на рис. 6.3.

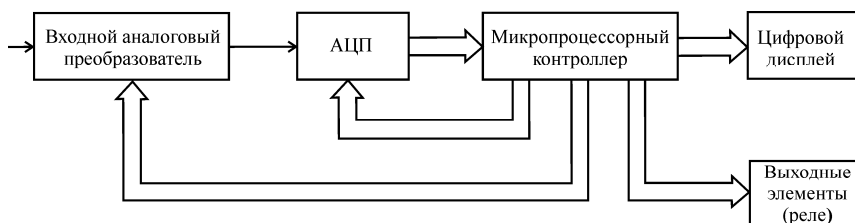


Рис. 6.3. Структурная схема измерителя-регулятора МТ2

Входной аналоговый преобразователь преобразует сопротивление термопреобразователя или термоЭДС термоэлектрического преобразователя в напряжение постоянного тока.

Напряжение поступает на вход *аналого-цифрового преобразователя* (АЦП), где преобразуется в *цифровой код*, который далее обрабатывается *микропроцессорным контроллером*. Микропроцессорный

контроллер, оперируя цифровым кодом, производит линеаризацию номинальной статической характеристики измерительного преобразователя. Также он производит компенсацию сопротивления соединительных проводов при трехпроводном подключении термопреобразователя сопротивления или вводит поправку на температуру холодных концов термоэлектрического преобразователя (для измерения температуры холодных концов термопары служит пленочный чувствительный элемент с НСХ Pt100, расположенный рядом с клеммами для подключения).

Далее контроллер производит дешифрацию цифрового кода и выдает сигнал на цифровой дисплей, представляющий собой три или четыре (в зависимости от модификации прибора) семисегментных светодиодных индикатора и отображающий измеренное значение в цифровом виде.

Кроме того, микроконтроллер управляет выходными коммутационными элементами (электромеханическими или полупроводниковыми реле) в соответствии с заложенным в программу алгоритмом регулирования, что позволяет не только измерять температуру, но и использовать прибор в системах автоматического регулирования.

Проверка измерителя-регулятора МТ2. При проведении проверки основной операцией является определение основной приведенной погрешности.

Определение погрешности измерения осуществляется после установления рабочего режима прибора не менее чем в пяти точках N_i диапазона измерений прибора, интервал между которыми не должен превышать 30 % диапазона, включая нижний и верхний пределы диапазона. Отсчет показаний прибора производится по истечении 3 с после подачи входного сигнала.

Для определения основной погрешности прибора, работающего с термопреобразователем сопротивления, используется магазин сопротивлений класса точности не ниже 0,05 и градуировочная таблица (номинальная статическая характеристика) термопреобразователя сопротивления (ГОСТ 6651–2009).

На вход прибора вместо термопреобразователя сопротивления подключается магазин сопротивлений. Плавным изменением сопротивления магазина сопротивлений добиваются состояния, при котором на индикаторе прибора устойчиво индицируется требуе-

мое значение температуры, соответствующее проверяемой точке N_i диапазона, и считывают значение сопротивления, полученное на магазине сопротивлений. Аналогично снимают показания в других точках диапазона измерений.

Основную приведенную погрешность измерения в каждой точке определяют по формуле

$$\gamma = \frac{R - R_{\text{гр}}}{R_{\text{к}} - R_{\text{н}}} \cdot 100 \%, \quad (6.2)$$

где $R_{\text{гр}}$ – сопротивление, соответствующее проверяемой точке диапазона по градуировочной таблице ГОСТ 6651–2009;

R – значение сопротивления по эталонному магазину сопротивлений, соответствующее проверяемой точке диапазона;

$R_{\text{к}}, R_{\text{н}}$ – значения сопротивлений, соответствующие конечной и начальной точкам диапазона измерений по градуировочной таблице.

Погрешность, рассчитанная по формуле (6.2), должна быть не более $\pm 0,5 \%$ (предела допускаемой основной приведенной погрешности, который указывается на этикетке и в паспорте прибора).

Порядок выполнения работы

1. Изучить назначение, устройство и принцип действия термопреобразователей сопротивления, термоэлектрических преобразователей, измерителя-регулятора МТ2.

2. Произвести поверку измерителя-регулятора МТ2, работающего совместно с термопреобразователем сопротивления с НСХ 50М, руководствуясь приведенными рекомендациями.

Магазин сопротивлений подключить к прибору в соответствии со схемой, показанной на рис. 6.4.

Градуировочная таблица термопреобразователя сопротивления с НСХ 50М приведена в табл. 6.2.

Результаты измерений занести в табл. 6.3.

3. По результатам поверки сделать вывод о пригодности измерителя-регулятора МТ2.

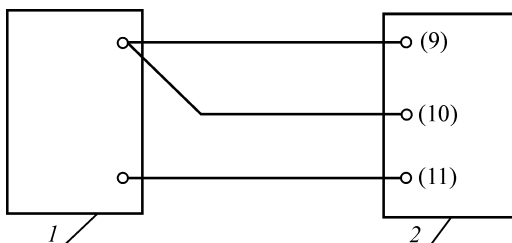


Рис. 6.4. Схема подключения магазина сопротивлений к измерителю-регулятору МТ2:
1 – магазин сопротивлений; 2 – измеритель-регулятор МТ2

Таблица 6.2

Номинальная статическая характеристика
термопреобразователя сопротивления 50М

Температура, °С	Сопротивление, Ом
–50	39,23
0	50,00
50	60,70
100	71,39
150	82,08
200	92,78

Таблица 6.3

Основная приведенная погрешность измерителя-регулятора МТ2

Измерено			Вычислено
$t, ^\circ\text{C}$	$R_{\text{гр}}, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma, \%$
–50			
0			
50			
100			
150			
200			

Контрольные вопросы и задания

1. На чем основан принцип действия термопреобразователей сопротивления?

2. Какие материалы используются в чувствительных элементах термопреобразователей сопротивления?
3. Что означает R_0 для термопреобразователей сопротивления?
4. Что означает коэффициент α для термопреобразователей сопротивления?
5. Как обозначаются НСХ термопреобразователей сопротивления?
6. На чем основан принцип действия термоэлектрических преобразователей?
7. Какие термоэлектрические преобразователи наиболее широко используются в настоящее время? Как они обозначаются?
8. Объясните устройство и принцип работы измерителя-регулятора МТ2.
9. Поясните методику поверки измерителя-регулятора МТ2.

Лабораторная работа № 7

КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы:

1. Ознакомиться с простейшими способами измерения активных сопротивлений.
2. Исследовать влияние способа включения измерительных приборов на величину погрешности измерения (методическую погрешность).

Общие сведения

Измерение активных сопротивлений производится, как правило, на постоянном токе. Это обусловлено, во-первых, стремлением устранить влияние емкости и индуктивности, которыми всегда обладают измеряемые сопротивления, а во-вторых, возможностью использовать для целей измерения высокочувствительные и высокоточные приборы магнитоэлектрической системы, работающие на постоянном токе.

Выбор метода измерения сопротивления и соответствующей измерительной аппаратуры зависит от величины измеряемого сопротивления, требуемой точности измерения и условий, в которых оно производится.

В современной практике приходится измерять сопротивления в чрезвычайно широком диапазоне – от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{18}$ Ом.

Условно сопротивления подразделяются на 3 группы:

- а) малые – до 1 Ом;
- б) средние – от 1 до 10^5 Ом;
- в) большие – от 10^5 Ом и выше.

К первой группе могут быть отнесены таковые обмотки измерительных приборов и аппаратов, якорные обмотки электрических машин, соединительные провода, шины и т. п.

Обмотки напряжения измерительных приборов и аппаратов, обмотки возбуждения электрических машин, протяженные электрические линии и сети обычно относятся ко второй группе.

Третья группа – сопротивления различных типов изоляционных материалов.

Сопротивления могут измеряться различными методами. Наиболее распространены следующие:

а) метод непосредственной оценки, основанный на использовании омметра или мегомметра;

б) метод сравнения, предусматривающий применение мостов или потенциометров;

в) косвенное измерение, при котором сопротивление рассчитывается по формуле на основании результатов прямых измерений других электрических величин, обычно тока и напряжения.

Каждый из перечисленных методов обладает определенными преимуществами и недостатками.

Метод непосредственной оценки отличается простотой и удобством, но невысокой точностью измерения. Омметры и мегомметры в лучшем случае имеют класс точности не выше 1,5.

Метод сравнения – измерение с помощью мостов и потенциометров – дает наивысшую точность измерения, но требуют применения сложных дорогостоящих измерительных устройств и соблюдения определенных условий измерения.

Косвенные измерения позволяют достаточно точно измерить сопротивления средней величины при использовании широко распространенных приборов, например амперметра и вольтметра.

Точность результатов измерения сопротивления в данном случае ограничивается точностью применяемых измерительных приборов. Величина измеряемого сопротивления определяется на основании закона Ома по показаниям вольтметра и амперметра:

$$R'_x = \frac{U_v}{I_A}. \quad (7.1)$$

Практически возможны две схемы включения приборов для измерения сопротивления. Однако результаты, получаемые по каждой из них, отличаются от действительного значения измеряемого сопротивления. Причина этого лежит не только в неточности показаний измерительных приборов (инструментальной погрешности). Отклонения полученного результата от действительного значения измеряемого сопротивления зависит также от величины сопротивлений используемых приборов (вольтметра и амперметра) и способа их включения относительно измеряемого сопротивления. Возникает

т. н. методическая погрешность измерения, которая может быть учтена, если известны сопротивления вольтметра и амперметра.

Амперметр, включенный по схеме, показанной на рис. 7.1, измеряет ток I_A , который больше тока, протекающего по измеряемому сопротивлению, на величину тока вольтметра I_V . Поэтому получаемый по этой схеме результат меньше действительного значения сопротивления R_X :

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A} < \frac{U_X}{I_X} = R_X. \quad (7.2)$$

Следовательно, для получения действительного значения измеряемого сопротивления необходимо ввести в формулу поправку на ток, протекающий по цепи вольтметра. Если известно сопротивление вольтметра, то этот ток равен $I_V = \frac{U_V}{R_V}$ и формула приобретает вид:

$$R_X = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}. \quad (7.3)$$

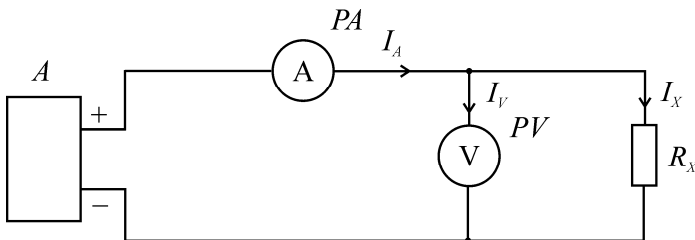


Рис. 7.1. Схема косвенного измерения сопротивления, когда амперметр включен до вольтметра

Тогда относительная погрешность измерения по этой схеме может быть подсчитана по формуле

$$\delta_1 = \frac{R'_X - R_X}{R_X} \cdot 100 \% = -\frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100 \%. \quad (7.4)$$

Анализ формулы относительной погрешности измерения сопротивления по этой схеме показывает, что без введения поправки более точные результаты получаются в том случае, когда сопротивление вольтметра велико по сравнению с измеряемым сопротивлением, т. е. когда удовлетворяется условие $R_V \gg R_X$.

На рис. 7.2 приведена вторая схема включения приборов относительно измеряемого сопротивления.

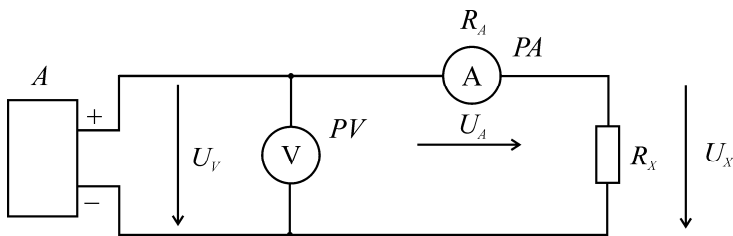


Рис. 7.2. Схема косвенного измерения сопротивления, когда амперметр включен после вольтметра

Вольтметр, включенный по этой схеме, показывает напряжение U_V , которое больше падения напряжения на измеряемом сопротивлении U_X на величину падения напряжения на сопротивлении амперметра $U_A = I_A R_A$. Следовательно, результат, полученный по этой схеме, будет больше действительного значения сопротивления R_X :

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A} > \frac{U_X}{I_X} = R_X. \quad (7.5)$$

После введения соответствующей поправки формула (7.5) приобретает вид:

$$R_X = \frac{U_V - I_A R_A}{I_A}, \quad (7.6)$$

а относительная погрешность измерения сопротивления по этой схеме может быть определена по формуле

$$\delta_2 = \frac{R'_X - R_X}{R_X} \cdot 100 \% = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100 \%. \quad (7.7)$$

Из этой формулы видно, что без введения поправки более точные измерения по второй схеме получаются в том случае, когда сопротивление амперметра мало по сравнению с измеряемым сопротивлением, т. е. когда удовлетворяется условие $R_A \ll R_X$.

Методическая погрешность без введения каких-либо поправок в формуле закона Ома может быть устранена при включении амперметра, вольтметра и измеряемого сопротивления по мостовой схеме и работе в сбалансированном режиме. Схема такого включения показана на рис. 7.3.

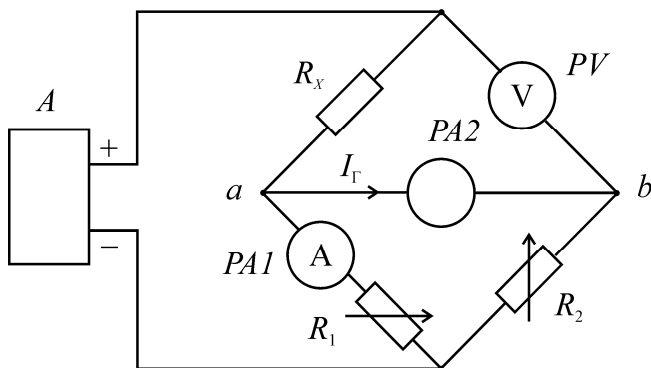


Рис. 7.3. Мостовая схема косвенного измерения сопротивления

Сбалансированный режим работы мостовой схемы устанавливается по нулевому показанию индикатора равновесия моста, включенному в одну из диагоналей моста. В данном случае используется нуль-гальванометр магнитоэлектрической системы высокой чувствительности. Равновесие моста устанавливается путем регулирования сопротивлений реостатов R_1 и R_2 , включенных в смежные плечи моста. Эта операция должна производиться всякий раз, когда приступают к измерению нового измеряемого сопротивления R_X , включаемого в одно из плеч моста.

В сбалансированном режиме мостовой схемы амперметр будет регистрировать только ток, проходящий по измеряемому сопротивлению R_X , т. к. ток гальванометра $I_r = 0$. Следовательно, $I_X = I_A$. Вольтметр также будет показывать только падение напряжения на измеряемом сопротивлении R_X , т. к. он подключен одним зажимом на конец измеряемого сопротивления R_X , а другим зажимом –

к точке b , потенциал которой при отсутствии тока в диагонали ab равен потенциалу точки a . Таким образом, показание вольтметра точно равно падению напряжения на измеряемом сопротивлении, т. е. $U_V = U_X$. Благодаря этому расчет измеряемого сопротивления производится по формуле закона Ома

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_V}{I_A}. \quad (7.8)$$

Такой способ измерения сопротивлений отличается большой точностью, но схема измерения усложняется: необходимо применять нуль-индикатор и регулировочные реостаты для уравнивания моста. Время измерения также увеличивается, поскольку уравнивание моста необходимо выполнять перед измерением каждого сопротивления.

Следует иметь в виду, что определенные погрешности вносят в результаты измерений по всем приведенным трем схемам собственные сопротивления соединительных проводов и переходных контактов. Однако их сопротивлениями при использовании достаточно коротких соединительных проводов большого сечения и надежных контактов можно пренебречь, поскольку они имеют порядок тысячных или сотых долей Ома. Приведенные схемы применяются для измерения средних сопротивлений.

Порядок выполнения работы

А. Косвенное измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра

1. Собрать схему (рис. 7.1).
2. Измерить в порядке нумерации сопротивления, размещенные на стенде:
 - а) перед включением схемы поставить ручку регулятора напряжения источника питания A в положение, соответствующее минимальному (нулевому) напряжению;
 - б) напряжение изменять плавно, не допуская увеличения тока выше 100 мА;

в) при измерениях поддерживать в схеме максимальный возможный ток (но не выше 100 мА);

г) при введении поправок записать значения сопротивлений вольтметра и амперметра со шкал этих приборов в зависимости от использовавшегося предела измерений.

3. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 7.1.

При обработке результатов измерений учитывать значения абсолютной и относительной погрешностей.

Таблица 7.1

Результаты измерений и вычислений (задание А, рис. 7.1)

Измерено		Вычислено			
U , В	I , А	R'_{x1} , Ом	R_{x1} , Ом	$\Delta R_{x1} = R'_{x1} - R_{x1}$	$\delta_1 = \frac{\Delta R_{x1}}{R_{x1}} \cdot 100 \%$

4. Собрать схему (рис. 7.2).

5. Измерить сопротивления, размещенные на стенде, в том же порядке, что и в первом случае. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 7.2. При расчетах учитывать знак погрешности.

Таблица 7.2

Результаты измерений и вычислений (задание А, рис. 7.2)

Измерено		Вычислено			
U , В	I , А	R'_{x2} , Ом	R_{x2} , Ом	$\Delta R_{x2} = R'_{x2} - R_{x2}$	$\delta_2 = \frac{\Delta R_{x2}}{R_{x2}} \cdot 100 \%$

Б. Измерение сопротивлений с помощью амперметра и вольтметра, включенных по мостовой схеме

1. Собрать схему (рис. 7.3).

2. Перед измерением сопротивления R_x уравновесить мостовую схему при минимальном напряжении питания, устанавливаемом с помощью движка потенциометра. Для этого, изменяя сопротивления регулировочных реостатов R_1 и R_2 , добиться нулевого показания гальванометра, включенного в диагональ моста.

3. С помощью потенциометра установить требуемую величину тока через измеряемое сопротивление (по амперметру). Если при повышении напряжения питания схемы наблюдается отклонение стрелки гальванометра от нулевого положения, необходимо с помощью реостатов R_1 и R_2 произвести дополнительное уравнивание моста (при точном уравнивании мостовой схемы изменение напряжения питания не должно приводить к отклонению стрелки гальванометра).

4. Снять показания амперметра и вольтметра.

5. Произвести измерения остальных сопротивлений, размещенных на стенде, в том же порядке, как и в предыдущих опытах. Перед каждым измерением заново производить уравнивание мостовой схемы, в соответствии с п. 2 и 3. При изменении напряжения питания балансировка схемы не должна нарушаться.

6. Результаты измерений занести в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Результаты измерений и вычислений (задание Б, рис. 7.3)

Измерено		Вычислено
U , В	I_x , А	R_x , Ом

Контрольные вопросы

1. На какие группы можно условно разделить измеряемые сопротивления?

2. Каковы наиболее распространенные методы измерения сопротивлений?

3. В чем отличие методической и инструментальной погрешности при измерении сопротивлений косвенными методами?

4. Какая из приведенных схем дает меньшую методическую погрешность при измерении малых (больших) сопротивлений?

5. В каких условиях получают минимальную методическую погрешность при измерении методом амперметра и вольтметра?

6. Каковы преимущества и недостатки мостовых методов измерения сопротивлений?

7. Как уменьшить погрешность за счет сопротивления соединительных проводов и контактных сопротивлений?

Лабораторная работа № 8

КОСВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ И МАГНИТОСВЯЗАННЫХ КАТУШЕК

Цель работы:

1. Ознакомиться с методами косвенного измерения параметров катушек индуктивности (индуктивности L и добротности Q) и взаимной индуктивности M_{12} магнитосвязанных катушек.
2. Произвести косвенное измерение параметров катушек индуктивности и магнитосвязанных катушек.

Общие сведения

Измерения параметров катушек индуктивности с высокой точностью выполняются с помощью мостов переменного тока. При отсутствии моста и не очень высоких требованиях к точности можно выполнить косвенное измерение. Для этого собирается схема, показанная на рис. 8.1.

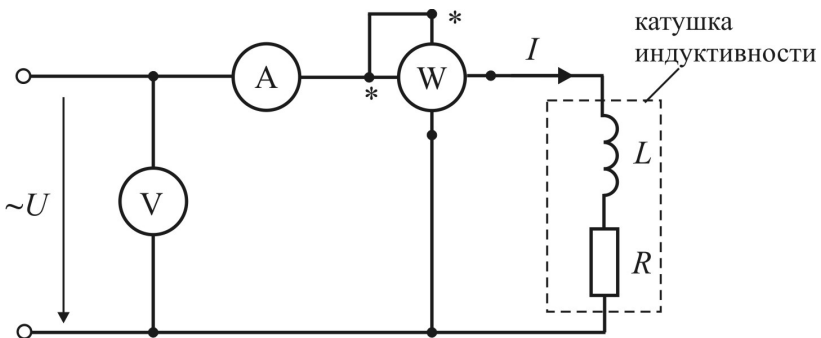


Рис. 8.1. Косвенное измерение параметров катушки индуктивности с использованием амперметра, вольтметра и ваттметра

По показаниям амперметра и вольтметра по закону Ома определяется полное сопротивление катушки:

$$Z = \frac{U_v}{I_A}. \quad (8.1)$$

Активное сопротивление провода, из которого выполнена катушка, определяется на основании закона Джоуля–Ленца:

$$R = \frac{P_w}{I_A^2}.$$

Полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2},$$

откуда

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (8.2)$$

После чего определяется добротность катушки:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}. \quad (8.3)$$

При отсутствии ваттметра, но наличии источника постоянного и переменного тока параметры катушки можно определить следующим образом:

1. Катушка поочередно подключается к источнику переменного и постоянного тока.

2. По показаниям амперметра и вольтметра на *переменном* токе по формуле (8.1) находится полное сопротивление Z .

3. По показаниям амперметра и вольтметра на *постоянном* токе определяется активное сопротивление R (на постоянном токе индуктивное сопротивление X_L равно нулю):

$$R = \frac{U_{v-}}{I_{A-}}.$$

Далее по формулам (8.2) и (8.3) находятся L и Q .

Необходимо использовать амперметр и вольтметр такой системы, которая позволяет выполнять измерения на постоянном и переменном токе примерно с одинаковой погрешностью, например электромагнитной системы.

Измерение параметров магнитосвязанных катушек индуктивности (M_{12})

Взаимную индуктивность магнитосвязанных катушек M_{12} можно определить по формуле

$$M_{12} = \frac{L_c - L_b}{4}, \quad (8.4)$$

где L_c , L_b – индуктивность катушек при согласном и встречном их включении соответственно.

Если имеется в наличии мост переменного тока, то катушки попеременно соединяют согласно и встречно и измеряют их индуктивности L_c и L_b . Затем по формуле (8.4) определяют M_{12} .

При отсутствии моста переменного тока прибегают к косвенному измерению L_c и L_b , а затем определяют M_{12} .

Для измерения собирается схема, показанная на рис. 8.2.

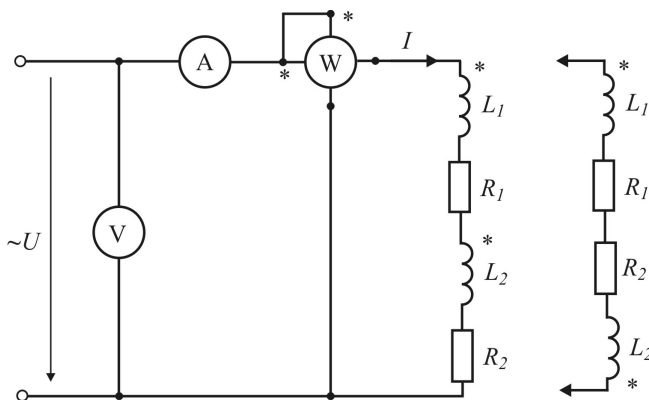


Рис. 8.2. Косвенное измерение взаимной индуктивности магнитосвязанных катушек с использованием амперметра, вольтметра и ваттметра

Выполняют измерения силы тока, напряжения и мощности при согласном и встречном включении катушек. Затем, действуя аналогично изложенному, находят полные и активные сопротивления катушек, потом L_c и L_b , а затем по формуле (8.4) определяют M_{12} .

При наличии вольтметра с достаточно большим входным сопротивлением (например, электронного аналогового или цифрового) можно измерить M_{12} , собрав схему, как показано на рис. 8.3.

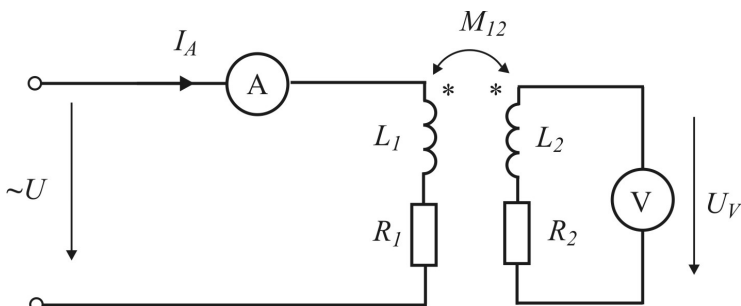


Рис. 8.3. Косвенное измерение взаимной индуктивности с использованием амперметра и вольтметра с большим входным сопротивлением

ЭДС, наводимая на второй катушке при протекании переменного тока по первой, определяется зависимостью

$$E_2 = \omega M_{12} I_1.$$

Если сопротивление вольтметра достаточно велико, то $E_2 \approx U_V$, тогда

$$M_{12} = \frac{U_V}{\omega I_A} = \frac{U_V}{2\pi f I_A}.$$

Порядок выполнения работы

А. Измерение индуктивности L и добротности Q катушек индуктивности с использованием амперметра, вольтметра и ваттметра

1. Собрать электрическую схему, показанную на рис. 8.4.

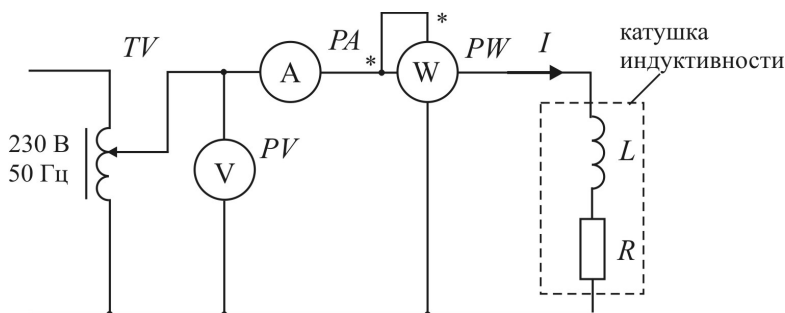


Рис. 8.4. Схема лабораторной установки для косвенного измерения параметров катушки индуктивности с использованием амперметра, вольтметра и ваттметра

2. После проверки схемы преподавателем включить питание и установить ЛАТРоМ по амперметру ток, не превышающий 0,2 А.
3. Результаты измерений занести в табл. 8.1.
4. Повторить измерения для других катушек, предложенных преподавателем.

Таблица 8.1

Результаты измерений и вычислений (задание А, рис. 8.4)

Объект измерения	Измерено			Вычислено			
	I , А	U , В	P , Вт	Z , Ом	R , Ом	L , Гн	Q
Катушка индуктивности № 1							
Катушка индуктивности № 2							
Катушка индуктивности № 3							

5. По результатам прямых измерений силы тока, напряжения и мощности определить искомые параметры катушек индуктивности L и Q .

Б. Измерение индуктивности L и добротности Q катушек индуктивности с использованием амперметра, вольтметра и источников постоянного и переменного тока

1. Исключить из схемы на рис. 8.4 ваттметр PW и произвести измерения тока и напряжения для всех катушек, фигурировавших

в первом опыте, устанавливая те же значения силы тока. Результаты измерений занести в табл. 8.2.

2. Собрать электрическую схему, показанную на рис. 8.5.

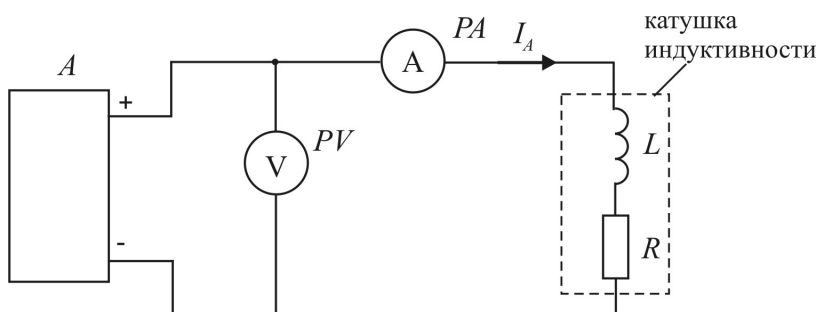


Рис. 8.5. Схема лабораторной установки для косвенного измерения параметров катушки индуктивности с использованием амперметра, вольтметра и источника постоянного тока

3. После проверки схемы преподавателем включить питание и установить по амперметру ток, не превышающий 0,2 А.

4. Результаты измерений занести в табл. 8.2.

5. Повторить измерения для других катушек.

Таблица 8.2

Результаты измерений и вычислений (задание Б, рис. 8.5)

Объект измерения	Измерено				Вычислено			
	Переменный ток		Постоянный ток					
	I , А	U , В	I , А	U , В	Z , Ом	R , Ом	L , Гн	Q
Катушка индуктивности № 1								
Катушка индуктивности № 2								
Катушка индуктивности № 3								

В. Измерение параметров магнитосвязанных катушек индуктивности (M_{12})

1. Собрать электрическую схему, показанную на рис. 8.6.

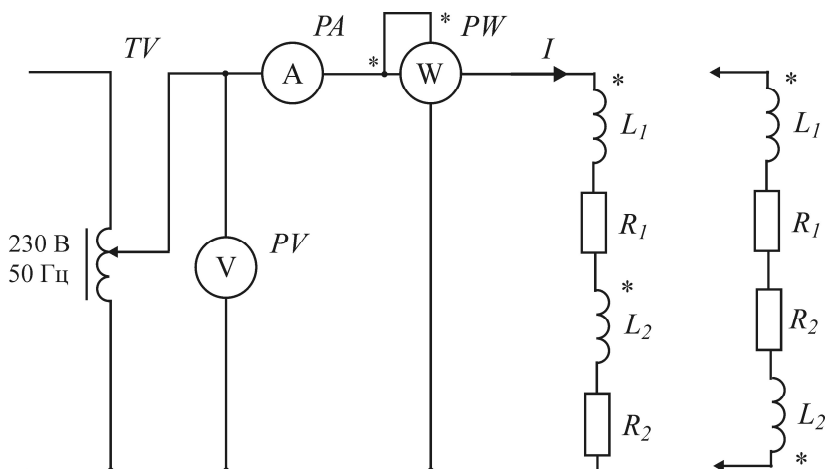


Рис. 8.6. Схема лабораторной установки для косвенного измерения взаимной индуктивности магнитосвязанных катушек (M_{12}) с использованием амперметра, вольтметра и ваттметра

2. После проверки схемы преподавателем включить питание и установить по амперметру ток, не превышающий 0,2 А.
3. Результаты измерений занести в табл. 8.3.
4. Повторить измерения, изменив согласное соединение катушек на встречное.

Таблица 8.3

Результаты измерений и вычислений (задание В, рис. 8.6)

Объект измерения	Измерено						Вычислено					
	Согласное включение			Встречное включение								
	I_c , А	U_c , В	P_c , Вт	I_v , А	U_v , В	P_v , Вт	Z_c , Ом	Z_v , Ом	R_{12} , Ом	L_c , Гн	L_v , Гн	M_{12} , Гн
Магнито- связанные катушки												

5. Собрать электрическую схему, показанную на рис. 8.7.
6. После проверки схемы преподавателем включить питание и установить по амперметру ток, не превышающий 0,2 А.
7. Результаты измерений занести в табл. 8.4.

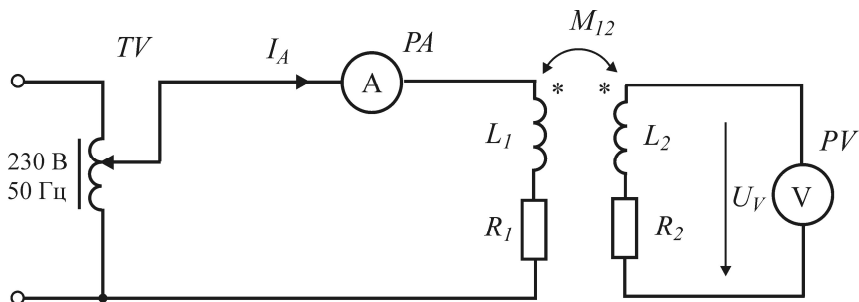


Рис. 8.7. Схема лабораторной установки для косвенного измерения взаимной индуктивности магнитосвязанных катушек (M_{12}) с использованием амперметра и вольтметра

Таблица 8.4

Результаты измерений и вычислений (задание В, рис. 8.7)

Объект измерения	Измерено		Вычислено
	I, A	U, B	$M_{12}, ГН$
Магнито-связанные катушки			

Контрольные вопросы

1. Какой метод позволяет наиболее точно измерить индуктивность и добротность катушки?
2. Какие законы используются при косвенном измерении параметров катушки индуктивности?
3. Какому требованию должен удовлетворять вольтметр при косвенном измерении взаимной индуктивности согласно рис. 8.7? Почему?

Лабораторная работа № 9

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Цель работы:

1. Ознакомиться с методами измерения активной мощности и энергии в трехфазных цепях.
2. Измерить активную мощность трехфазной цепи методом двух приборов при различном характере нагрузки.

Общие сведения

Активная мощность трехфазной системы равна сумме мощностей отдельных фаз. Это справедливо для мгновенных значений

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \quad (9.1)$$

и для среднего значения мощности за период

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = P_A + P_B + P_C = \\ &= U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C. \end{aligned} \quad (9.2)$$

Измерение активной мощности трехфазного тока может быть произведено одним или несколькими однофазными ваттметрами, включенными по разным схемам, либо одним трехфазным ваттметром. Количество ваттметров и схемы их включения в цепи трехфазного тока определяются системой питания (трех- или четырехпроводная), нагрузкой (равномерная или неравномерная) и ее соединением (звездой или треугольником). При использовании однофазных ваттметров различаются методы одного, двух и трех приборов.

Метод одного прибора

Этот метод может использоваться только при полной симметрии трехфазной цепи, т. е. при симметричной трехфазной системе напряжений и симметричной нагрузке.

Мощность одной фазы определяется по формуле

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi, \quad (9.3)$$

где U_{ϕ} , I_{ϕ} – фазные напряжение и ток соответственно.

Ваттметр включается по одной из схем, приведенных на рис. 9.1.

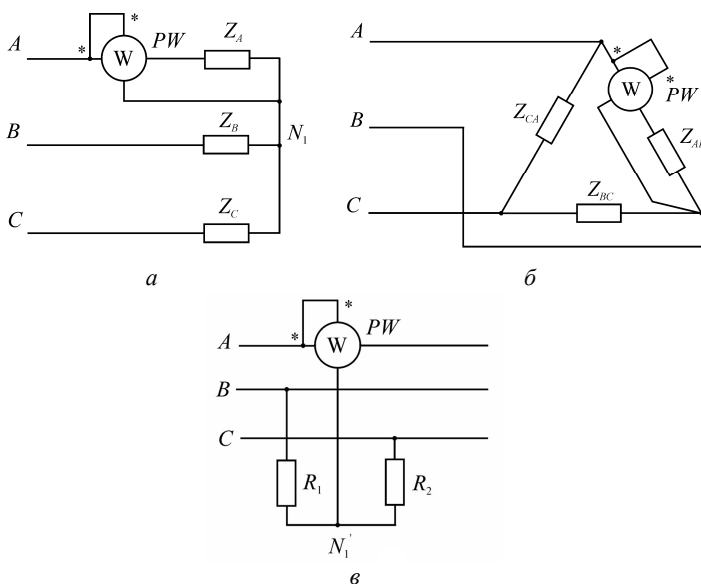


Рис. 9.1. Схемы включения ваттметра при измерении мощности в симметричных цепях методом одного прибора:

а – при соединении звездой; б – при соединении треугольником; в – с искусственной нулевой точкой

Из схем видно, что при таком включении по токовой обмотке ваттметра протекает фазный ток, а обмотка напряжения подключена на фазное напряжение, значит в соответствии с формулой (9.3) он измеряет мощность одной фазы.

Поскольку при симметричной нагрузке мощности фаз равны, то для определения мощности трехфазной системы его показания необходимо утроить:

$$P = 3P_w. \quad (9.4)$$

Схема рис. 9.1, в применяется в тех случаях, когда недоступна нулевая точка звезды или невозможно включить ваттметр в одну из фаз приемника, соединенного треугольником. Это т. н. схема с искусственной нулевой точкой, созданной благодаря включению в звезду активных резисторов R_1 , R_2 и R_W . Условием искусственного нуля служит равенство сопротивлений R_1 , R_2 и сопротивления параллельной цепи ваттметра R_W , т. е. при $R_1 = R_2 = R_W$.

Метод двух приборов

Этот метод может использоваться при измерениях мощности и энергии в трехпроводных цепях как при симметричной так и несимметричной нагрузке, независимо от способа соединения нагрузки (звездой или треугольником).

Мгновенное значение мощности трехфазной системы равно сумме мгновенных значений мощности отдельных фаз:

$$p = p_A + p_B + p_C. \quad (9.5)$$

После подстановки мгновенных значений тока и напряжения в это уравнение оно имеет следующий вид (для соединения в звезду):

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C. \quad (9.6)$$

Для этого случая (по 1-му закону Кирхгофа) сумма мгновенных значений токов равна нулю:

$$i_A + i_B + i_C = 0. \quad (9.7)$$

Заменяв любой из токов парой других (например, $i_B = -(i_A + i_C)$) и подставив в выражение для мгновенной мощности, его приводят к следующему виду:

$$\begin{aligned} p &= u_A i_A - u_B (i_A + i_C) + u_C i_C = \\ &= (u_A - u_B) i_A + (u_C - u_B) i_C = u_{AB} i_A + u_{BC} i_C. \end{aligned} \quad (9.8)$$

Для случая соединения приемника треугольником получается точно такое же выражение мгновенного значения мощности. Но в этом случае

производится замена одного из напряжений из условия равенства нулю суммы мгновенных значений напряжений (по 2-му закону Кирхгофа).

Аналогично после замены других токов или напряжений можно получить другие равенства:

$$p = u_{AC}i_A + u_{BC}i_B \text{ и } p = u_{BA}i_B + u_{CA}i_C. \quad (9.9)$$

Перейдя после интегрирования приведенных выражений мгновенных значений мощности к средним за период, можно записать три уравнения в действующих значениях тока и напряжения:

$$P = U_{AC}I_A \cos \alpha_1 + U_{BC}I_B \cos \alpha_2 = P_{W1} + P_{W2}; \quad (9.10)$$

$$P = U_{AB}I_A \cos \alpha_1 + U_{CB}I_C \cos \alpha_2 = P_{W1} + P_{W2}; \quad (9.11)$$

$$P = U_{BA}I_B \cos \alpha_1 + U_{CA}I_C \cos \alpha_2 = P_{W1} + P_{W2}. \quad (9.12)$$

Углы α_1, α_2 представляют собой фазовые сдвиги между соответствующими напряжениями и токами. Следовательно, для измерения мощности трехпроводной трехфазной системы необходимо подключить два ваттметра таким образом, чтобы каждый из них измерял мощность, выражаемую одним из членов соответствующей формулы. При подключении ваттметров необходимо соблюдать определенность присоединения генераторных зажимов (помеченных на приборах звездочками) в соответствии с последовательностью индексов у напряжений. Буква, стоящая в индексе напряжений первой, указывает линию, к которой должен быть подключен генераторный зажим параллельной цепи ваттметра. Мощность всей системы определяется как алгебраическая сумма показаний обоих ваттметров. Согласно записанным уравнениям возможны три варианта включения двух приборов в трехфазную цепь, показанные на рис. 9.2.

Эти схемы в равной степени относятся к случаям соединения приемников в звезду и в треугольник.

На рис. 9.3 построена векторная диаграмма напряжений и токов, действующих в цепях ваттметров, включенных по схеме рис. 9.2, б для случая симметричной нагрузки, имеющей активно-индуктивный характер.

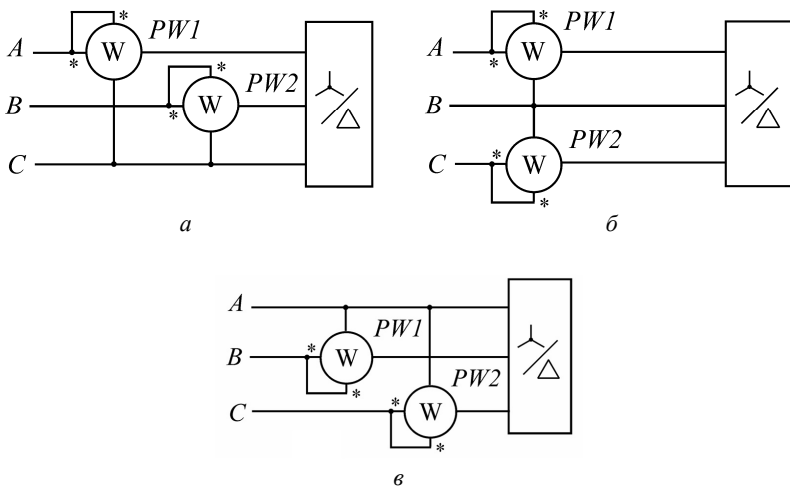


Рис. 9.2. Схема включения ваттметров по методу двух приборов в соответствии с формулой:
 a – (9.10); $б$ – (9.11); $в$ – (9.12)

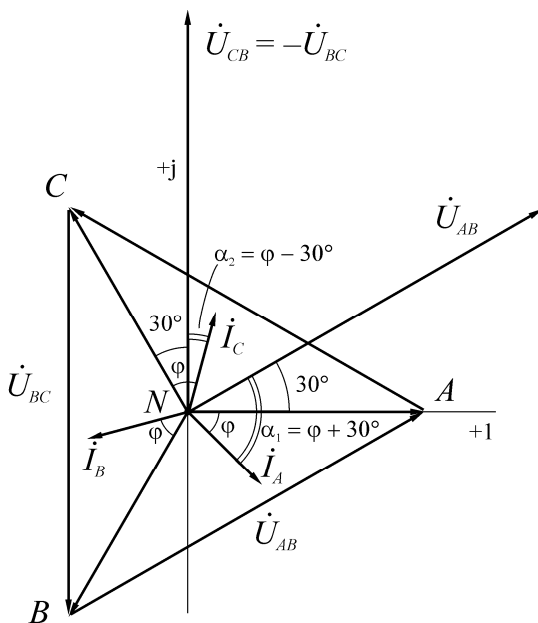


Рис. 9.3. Векторная диаграмма напряжений и токов

Из диаграммы видно, что $\alpha_1 = \varphi + 30^\circ$, а $\alpha_2 = \varphi - 30^\circ$. Следовательно, показания ваттметров P_{W1} и P_{W2} соответственно

$$P_{W1} = U_{AB} I_A \cos(\varphi + 30^\circ); \quad (9.13)$$

$$P_{W2} = U_{CB} I_C \cos(\varphi - 30^\circ). \quad (9.14)$$

Из этих равенств следует, что показания ваттметров одинаковы только при активной симметричной нагрузке: если $\varphi = 0$, то

$$P_{W1} = P_{W2} = UI \cos 30^\circ. \quad (9.15)$$

Если $\varphi = -60^\circ$, то показание второго ваттметра $P_{W2} = 0$; если $\varphi = 60^\circ$, то показание первого ваттметра $P_{W1} = 0$. В этих случаях мощность трехфазной системы равна показанию одного из ваттметров.

При углах сдвига $\varphi < -60^\circ$ или $\varphi > 60^\circ$ показание одного из ваттметров становится отрицательным. В этом случае необходимо поменять полярность одной из обмоток ваттметра и учитывать его показание со знаком минус (в современных электродинамических ваттметрах имеется специальный переключатель направления тока в катушке напряжения).

Рассматривая сумму и разность показаний P_{W1} и P_{W2} , получают:

$$P_{W1} + P_{W2} = UI [\cos(\varphi + 30^\circ) + \cos(\varphi - 30^\circ)] = \sqrt{3} UI \cos \varphi = P; \quad (9.16)$$

$$P_{W2} - P_{W1} = UI [\cos(\varphi - 30^\circ) - \cos(\varphi + 30^\circ)] = UI \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}}. \quad (9.17)$$

Тогда угол сдвига фаз при симметричной нагрузке можно определить из выражения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \frac{P_{W2} - P_{W1}}{P_{W1} + P_{W2}}. \quad (9.18)$$

Приведенные рассуждения справедливы для любой несимметричной системы с той разницей, что в этом случае численные зна-

чения углов α_1 и α_2 будут иными, чем указанные в их выражениях для случая симметричной нагрузки.

Метод трех приборов

При несимметричной нагрузке и наличии нулевого провода используется метод трех приборов, включенных по схеме, показанной на рис. 9.4. Если параллельные обмотки ваттметров включены на напряжение каждой фазы, а последовательные обмотки – в расщелку линий, по которым протекают фазные токи, то каждый из ваттметров показывает мощность своей фазы и сумма их показаний равна мощности трехфазной системы.

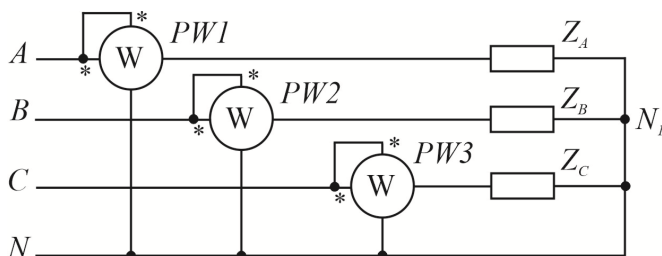


Рис. 9.4. Схема включения ваттметров по методу трех приборов

Измерение активной мощности и энергии в трехпроводных и четырехпроводных цепях удобнее производить специальными трехфазными ваттметрами и счетчиками. Эти приборы снабжены двумя или тремя измерительными элементами, действующими на общую подвижную часть, связанную с системой отсчета. Электрические схемы соединений этих измерительных элементов аналогичны приведенным схемам включения двух или трех приборов (см. рис. 9.2, 9.4).

В настоящее время измерение активной мощности все чаще выполняется с применением цифровых ваттметров. Схемы их включения аналогичны приведенным выше схемам включения электромеханических ваттметров.

Порядок выполнения работы

А. Измерение активной мощности трехфазной цепи методом двух приборов при чисто активной нагрузке

1. Собрать схему, показанную на рис. 9.5.

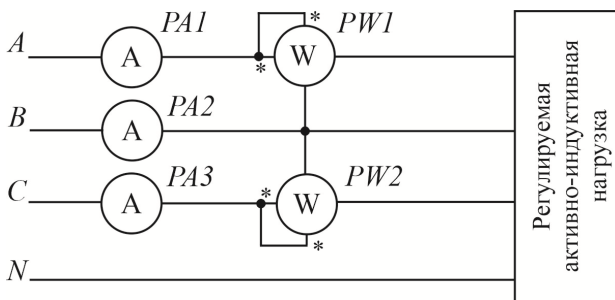


Рис. 9.5. Схема лабораторной установки

2. Снять показания ваттметров и других приборов сначала для трехпроводной, затем для четырехпроводной цепи, изменяя нагрузку отдельных фаз в соответствии с указаниями табл. 9.1.

3. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 9.1.

Расчетные формулы:

$$S = U_{AN1} I_A + U_{BN1} I_B + U_{CN1} I_C;$$

$$P = P_{W1} + P_{W2}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Б. Измерение активной мощности трехфазной цепи методом двух ваттметров при активно-индуктивной нагрузке.

1. Подключить индуктивную трехфазную нагрузку к ранее собранной схеме. Нулевой провод отсоединить.

2. Произвести измерение по пунктам, указанным в табл. 9.2.

3. Результаты замеров и расчетов занести в табл. 9.2.

Расчетные формулы:

$$P = P_{W1} + P_{W2}; \quad Q = \sqrt{3}(P_{W2} - P_{W1});$$

$$\alpha_1 = \varphi + 30^\circ; \quad \alpha_2 = \varphi - 30^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}.$$

Для пунктов, указанных преподавателем, построить по данным табл. 9.1 и 9.2 векторные диаграммы.

Таблица 9.1

Результаты измерений и вычислений (задание А)

Нагрузка	Измерено								Вычислено			
	$U_{AN1},$ В	$U_{BN1},$ В	$U_{CN1},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_{W1},$ Вт	$P_{W2},$ Вт	$P,$ Вт	$S,$ ВА	$\cos\varphi$	$\varphi,$ град.
1. Симметричная: по 3 резистора в каждой фазе												
2. Несимметричная: 1 резистор в фазе A , 2 резистора в фазе B , 3 резистора в фазе C												
3. То же, но с нулевым проводом												

Таблица 9.2

Результаты измерений и вычислений (задание Б)

Нагрузка	Измерено								Вычислено							
	$U_{AN1},$ В	$U_{BN1},$ В	$U_{CN1},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_{W1},$ Вт	$P_{W2},$ Вт	$P,$ Вт	$Q,$ вар	$S,$ ВА	$\text{tg}\varphi$	$\varphi,$ град.	$\alpha_1,$ град.	$\alpha_2,$ град.	
1. Индуктивная нагрузка + по 3 резистора в каждой фазе																
2. Сохраняя симметрию нагрузки (выключая в фазах одинаковое число резисторов), добиться нулевого показания одного из ваттметров																
3. Выключить все резисторы, оставив только индуктивную нагрузку																

Контрольные вопросы

1. Какой метод измерения мощности и энергии можно применить в случае симметричной нагрузки?
2. Каковы схемы включения прибора при соединении приемников звездой и треугольником?
3. Как создается искусственная нулевая точка?
4. Когда применяется метод двух приборов?
5. В каком случае метод двух приборов дает ложные показания?
6. В каком случае один из ваттметров будет показывать нуль?
7. В каком случае показания одного из ваттметров будут отрицательными?
8. Можно ли по показаниям двух ваттметров определить реактивную мощность трехфазной системы? При какой нагрузке?
9. Когда следует использовать метод трех приборов?
10. От чего зависят число приборов и схемы их включения при измерении активной мощности трехфазной системы?

Лабораторная работа № 10

ИЗУЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СЧЕТЧИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Цель работы:

1. Ознакомиться с устройством и конструкцией трехфазного электронного счетчика электроэнергии СЕ301ВУ.
2. Освоить методику снятия показаний в ручном и автоматическом режиме и определить количество потребленной электроэнергии опытным и расчетным путем.
3. По показаниям счетчика научиться определять параметры нагрузки.

Общие сведения

Современный трехфазный счетчик активной энергии СЕ301ВУ предназначен для учета активной и реактивной энергии в цепях переменного тока (в режимах однотарифности или многотарифности), а также для использования в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) с целью передачи измеренных и вычисленных параметров через устройства сбора и передачи данных (УСПД) на диспетчерский пункт по контролю, учету и распределению электрической энергии.

Примерная блок-схема подобного счетчика представлена на рис. 10.1.

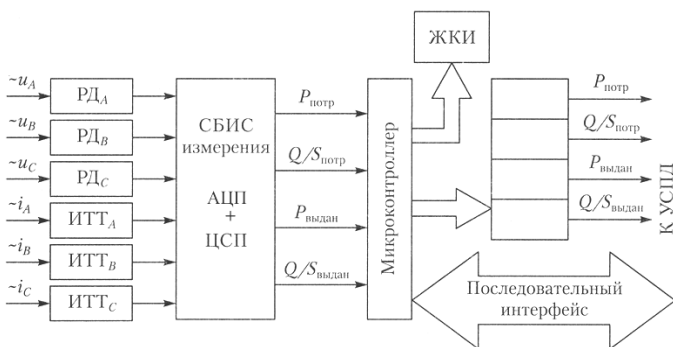


Рис. 10.1. Блок-схема многофункционального микропроцессорного счетчика электроэнергии

Ток и напряжение в линии переменного тока измеряются соответственно при помощи специальных датчиков (трансформаторов) тока (ИТТ_А, ИТТ_В, ИТТ_С) и резистивных делителей напряжения (РД_А, РД_В, РД_С). Преобразования величин выполняются с использованием микросхемы измерителя (СБИС измерения), которая объединяет все первичные функциональные группы элементов, требуемые для осуществления измерения электрических величин. В микросхему включены: аналоговое подготовительное устройство, включающее в себя шестиканальный мультиплексор и 21-битное АЦП, независимый цифровой вычислитель на 32 бита, который выполняет одну инструкцию в цикл синхроимпульсов, источник опорного напряжения, температурный датчик, дешифратор индикатора на жидких кристаллах, ОЗУ, RAM- и FLASH-память, часы реального времени, два порта UART – один предназначен для работы оптопорта (IrDA), второй для подключения одного из интерфейсов. АЦП осуществляет преобразование мгновенных значений входных аналоговых сигналов в цифровой код, вычислитель производит расчет среднеквадратичных значений токов и напряжений, активных мощностей и энергий, а также углов сдвига и частоты основной гармоники сигналов напряжения. Микросхема измерителя через UART, I2C и порты ввода-вывода осуществляет связь между всеми периферийными устройствами схемы счетчика.

Энергия, переданная в нагрузку, может быть выражена формулой

$$E = \int_0^t i(t)u(t)dt. \quad (10.1)$$

Измерения активной энергии производятся по формуле

$$W = UI\cos\varphi t = Pt, \quad (10.2)$$

где W – потребленная активная энергия;

U – фазное напряжение;

I – фазный ток;

φ – угол сдвига по фазе между фазным напряжением и фазным током;

t – длительность i -го периода измерения энергии;

P – активная мощность.

Просмотр информации

Просмотр информации возможен в *автоматическом* циклическом режиме при задании соответствующего режима по интерфейсу с задаваемым периодом смены кадра. По интерфейсу можно задать для просмотра параметры соответственно из шести первых групп, описанных ниже в этом разделе. Группа служебных параметров 2, тарифное расписание и группы архивов в циклическом режиме не индицируются.

Просмотр информации в *ручном* режиме осуществляется с помощью кнопок «КАДР» и «ПРСМ».

Различается два типа нажатия на кнопку:

- длительное – время удержания кнопки в нажатом состоянии 1–2 с;

- короткое – удержание кнопки в нажатом состоянии менее 1 с.

Длительное нажатие на кнопку «КАДР» последовательно переключает отображение групп (на индикаторе индицируется словом PArt) параметров от «01» до «12»:

- 1) энергетические параметры нарастающим итогом;
- 2) параметры сети и напряжение батареи;
- 3) служебные параметры 1 (время, дата, коэффициенты трансформации, время усреднения);
- 4) накопления текущих месяца и суток;
- 5) накопление и прогнозируемая мощность текущего интервала усреднения;

- 6) максимумы мощностей текущего месяца;

- 7) служебные параметры 2;

- 8) тарифное расписание;

- 9) архив месячных значений;

- 10) архив суточных значений;

- 11) архив максимальных месячных мощностей;

- 12) архив фактических величин мощности.

Короткое нажатие на кнопку «КАДР» листает кадры параметров внутри групп. Возврат в режим автоматического просмотра происходит через 1 мин после последнего нажатия любой из кнопок.

Группа 1. Индицируется количество потребленной энергии нарастающим итогом суммарно и по тарифам.

Группа 2. На экран ЖКИ выводится следующая информация:

- *bAt* – значение напряжения батареи в вольтах;

• pH – признаки наличия фазных напряжений и индикация правильности подключения. Индикация цифр 1, 2 и 3 свидетельствует о наличии соответствующих фаз, отсутствующая фаза индицируется символом «дефис»;

- F – частота сети в герцах;
- $U1$ – среднеквадратичное значение напряжения фазы A в вольтах;
- $U2$ – среднеквадратичное значение напряжения фазы B в вольтах;
- $U3$ – среднеквадратичное значение напряжения фазы C в вольтах;
- $I1$ – среднеквадратичное значение тока фазы A в амперах;
- $I2$ – среднеквадратичное значение тока фазы B в амперах;
- $I3$ – среднеквадратичное значение тока фазы C в амперах;
- P – мощность по фазам A, B, C (индицируется мнемоника «kW»);
- $P1$ – мощность по фазе A (индицируется мнемоника «kW»);
- $P2$ – мощность по фазе B (индицируется мнемоника «kW»);
- $P3$ – мощность по фазе C (индицируется мнемоника «kW»);
- $u12$ – угол сдвига между фазами A и B ;
- $u23$ – угол сдвига между фазами B и C ;
- $u31$ – угол сдвига между фазами C и A ;
- $iU1$ – угол между векторами тока и напряжения фазы A ;
- $iU2$ – угол между векторами тока и напряжения фазы B ;
- $iU3$ – угол между векторами тока и напряжения фазы C ;
- cOS – коэффициент мощности суммарный (без знака);
- $cOS1$ – коэффициент мощности фазы A ;
- $cOS2$ – коэффициент мощности фазы B ;
- $cOS3$ – коэффициент мощности фазы C ;
- t – коэффициент реактивной мощности суммарный (по модулю без знака);
- $t1$ – коэффициент реактивной мощности фазы A ;
- $t2$ – коэффициент реактивной мощности фазы B ;
- $t3$ – коэффициент реактивной мощности фазы C .

Группа 3. На экран ЖКИ выводится следующая информация:

• t – время (часы, минуты, секунды); в этом окне доступна функция ручной коррекции времени;

• дата (день недели, день месяца, месяц, год). На рис. 10.2 показана дата в следующем формате: 3 – третий день недели (среда), 19 ноября 2008 г.;

- FI – коэффициент трансформации трансформатора тока;
- FU – коэффициент трансформации трансформатора напряжения;
- t – время усреднения (в правой части ЖКИ).

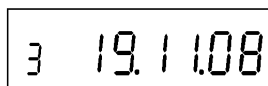


Рис. 10.2. Формат даты

Параметры оставшихся групп описаны в руководстве по эксплуатации.

Кроме ЖКИ на лицевой панели счетчика присутствует *световой индикатор*, который можно использовать для поверки счетчика (450 импульсов соответствуют 1 кВт·ч электрической энергии).

Порядок выполнения работы

А. Учет электрической энергии

1. Собрать схему, показанную на рис. 10.3.

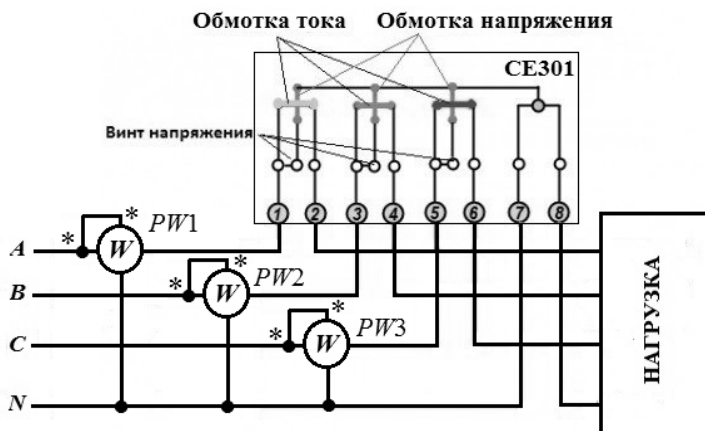


Рис. 10.3. Схема подключения трехфазного счетчика

2. Снять суммарные показания счетчика (TOTAL) в ручном режиме.
3. Включить активную нагрузку (2 резистора в каждой фазе).
4. В табл. 10.1 записать показания ваттметров и засечь время – 2, 4, 6, 8 и 10 импульсов светового индикатора.
5. Определить количество потребленной электрической энергии по количеству импульсов светового индикатора $W_{\text{и}}$ и расчетным путем W .

Таблица 10.1

Результаты измерений и вычислений (задание А)

Измерено					Вычислено		
N	$t, \text{с}$	$P_A, \text{Вт}$	$P_B, \text{Вт}$	$P_C, \text{Вт}$	$P, \text{Вт}$	$W_{\text{и}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$
2							
4							
6							
8							
10							

Расчетные формулы:

$$W_{\text{и}} = \frac{N}{450}; \quad W = Pt.$$

Б. Определение параметров нагрузки по показаниям счетчика

1. Для различной нагрузки снять показания счетчика, указанные в табл. 10.2.

2. По измеренным данным рассчитать параметры нагрузки.

Расчетные формулы:

$$R = \frac{U_A}{I_A} \cos \varphi_A; \quad x = \frac{U_A}{I_A} \sin \varphi_A;$$

$$L = \frac{x}{2\pi f}; \quad C = \frac{1}{x2\pi f}.$$

Контрольные вопросы

1. В каких единицах ведется учет электрической энергии?
2. Какие преимущества у электронных счетчиков по сравнению с индукционными?
3. Какие недостатки у электронных счетчиков?
4. Как устроен электронный счетчик?
5. Каков принцип действия электронного счетчика?
6. Как снять показания электронного счетчика?
7. Какого класса точности исследуемый счетчик?

Таблица 10.2

Результаты измерений и вычислений (задание Б)

Нагрузка	Измерено							Вычислено			
	f , Гц	U_A , В	I_A , А	P_A , Вт	φ_A , град.	$\cos\varphi_A$	$\sin\varphi_A$	R , Ом	x , Ом	L , Гн	C , мкФ
1. Активная: по 2 резистора в каждой фазе											—
2. Активно- индуктивная: то же плюс индук- тивная нагрузка											—
3. Емкостная: по 1 конденсатору в каждой фазе										—	

Лабораторная работа № 11

ИЗУЧЕНИЕ ВЛАГОМЕРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы:

1. Изучить наиболее распространенные методы и приборы для измерения влажности.
2. Ознакомиться с методами поверки влагомеров зерна и других твердых материалов.
3. Приобрести практические навыки работы с влагомерами.

Общие сведения

Влажность – содержание влаги в физических телах или средах, выраженное в процентах:

$$W = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{вл}}} \cdot 100 \% = \frac{m_{\text{вл}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{вл}}} \cdot 100 \%,$$

где $m_{\text{вл}}$ – масса влажного образца;
 $m_{\text{сух}}$ – масса сухого образца.

Контроль влажности сельскохозяйственных материалов осуществляется в настоящее время влагомерами трех типов: полевыми, поточными и лабораторными. Большинство из них основаны на кондуктометрическом, диэлькометрическом и СВЧ-методах измерений.

Работа *кондуктометрических* влагомеров основана на зависимости сопротивления материала от его влажности. Для большинства сельскохозяйственных материалов эта зависимость выражается показательной функцией вида

$$R = AW^{-n}, \quad (11.1)$$

где R – сопротивление датчика с влажным материалом;
 A – постоянная, определяемая свойствами измеряемого объекта;
 W – влажность объекта измерения.

Показатель степени n определяется структурой и природой исследуемого вещества. Например, для хлопчатобумажных тканей n составляет 8–10, для шелка и шерсти 1,0–16,5.

В основе *диэлькометрического* метода лежит сильная зависимость диэлектрической проницаемости влажного материала от количества воды в нем. Действительно, если для воздушно сухих органических материалов ε составляет 2–4, то для воды на радиочастотах при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение $\varepsilon = 81$. Таким образом, по измеренному значению диэлектрической проницаемости (или ее действительной и мнимой составляющей, а также $\text{tg}\delta$) можно судить о влажности материала.

На результат измерения любой электрической величины (R , C , ε' , ε'' , $\text{tg}\delta$ и пр.) кроме контролируемой влажности значительное влияние оказывают температура и плотность материала, а также сорт, вид, тип материала, химический и гранулометрический состав, район произрастания и пр. Если температура и плотность относятся к т. н. информативным мешающим факторам, то все остальные являются трудно учитываемыми и определяющими в конечном счете предельную точность влагомера, основанного на том или ином методе. Температуру и плотность необходимо учитывать и вносить коррекцию независимо от метода измерения, что же касается неинформативных мешающих факторов, то их влияние уменьшают выбором оптимального метода (оптимальной частоты измерений). В настоящее время экспериментально доказано, что с ростом частоты влияние неинформативных параметров уменьшается. С учетом этого наиболее перспективными являются влагомеры, работающие на высоких (ВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частотах.

Электронно-цифровой влагомер зерна «Колос-1» – типичный представитель полевых влагомеров. В нем использован диэлькометрический метод измерения влажности нормированного количества контролируемого зерна.

Сущность метода заключается в раздельном преобразовании диэлектрической проницаемости влажного зерна в частоту, а активной проводимости – в амплитуду выходного сигнала. Диэлектрическая проницаемость зерна определяется в основном его влажностью, а активная проводимость существенно зависит также от сорта, района и условий произрастания культуры, кроме этого на диэлектрические характеристики влажного зерна значительно влияет температура. Поэтому многопараметровое преобразование позволяет существенно

снизить погрешности от температуры и специфики измеряемого объекта, а массовое дозирование пробы снижает влияние плотности (натурного веса) зерна.

Конструктивно влагомер состоит из трех частей:

– цифрового преобразователя с емкостным датчиком – бункером коаксиального типа, платой преобразователя, платой индикации и батареей;

– кожуха;

– засыпного стакана.

Бункер выполнен в виде двух цилиндрических концентрических электродов, закрепленных на основании из диэлектрика. Центральный электрод в верхней его части имеет конусную насадку для равномерного распределения зерна по бункеру. Сам бункер является подвижной частью весового устройства. На кронштейне весового устройства установлены контакты. Бункер под действием массы засыпаемого зерна, равной (200 ± 1) г, движется вниз, замыкает контакты и включает электропитание влагомера.

На крышке влагомера имеется градуировочная таблица для перевода показаний прибора в проценты влажности культур.

Диапазон измерения влажности прибором «Колос-1» – от 8 % до 35 %, дискретность отсчета – 0,1 %.

Предел допускаемой основной погрешности при доверительной вероятности 0,95 на зерне естественной влажности не превышает:

1) в диапазоне 8 %–18 % – $\pm 1,5$ %;

2) в диапазоне 18 %–35 % – $\pm 2,0$ %.

Предел допускаемой дополнительной погрешности от изменения температуры контролируемого продукта в диапазоне 5 °С–40 °С не превышает $\pm 0,5$ %.

Среднее время одного измерения – 60 с.

Более современным представителем диэлькометрических влагомеров является влагомер зерна «Фауна-М». Он предназначен для измерения влажности зерновых и масличных культур в полевых условиях при уборке, при послеуборочной обработке и сушке зерна на токах, при размещении зерна в хранилищах, а также при переработке на предприятиях, где необходим экспресс-анализ влажности непосредственно на месте отбора проб.

Основная абсолютная погрешность – от 0,5 % до 1,0 %.

Диапазон измерения влажности – от 3,0 % до 38,0 %.

Как указывалось выше, применение для целей влагометрии электромагнитных волн СВЧ-диапазона позволяет существенно снизить влияние неинформативных мешающих факторов. При условии коррекции по температуре и плотности это позволяет снизить погрешность измерения влажности сверхвысокочастотным лабораторным влагомером зерна «Микрорадар-101.3» до $\pm 0,5$ % в диапазоне до 20 % влажности.

Принцип действия влагомера основан на измерении параметров электромагнитной волны СВЧ-диапазона, прошедшей через слой влажного материала.

СВЧ-колебания, вырабатываемые генератором, проходят через влажный материал, вследствие чего их параметры изменяются по отношению к значению при отсутствии материала. Параметры изменяются тем сильнее, чем больше влажность материала. Характер этих изменений известен, поэтому, если измерить изменения параметров сигнала, прошедшего через влажный материал, можно вычислить значение влажности.

СВЧ-колебания, в параметрах которых заложена информация о влажности материала, поступают на СВЧ-детектор, где преобразуются в низкочастотный сигнал, сохраняющий эту информацию. Этот сигнал, а также сигнал с датчика температуры поступают на вход блока управления и контроля. В процессе градуировки влагомера в блок управления и контроля записывается информация об амплитуде СВЧ-колебаний для различных значений влажности и температуры исследуемого материала. Сравнение измеренных значений амплитуды сигнала со значениями, записанными в процессе градуировки, позволяет вычислить действительное значение влажности материала. Значение влажности высвечивается на ЖКИ блока управления и контроля.

Поверка влагомеров сельскохозяйственных материалов

Поверку влагомеров сельскохозяйственных материалов можно проводить по натуральным образцам. Влажность этих образцов определяют с помощью лабораторных влагомеров. Выбор образцового метода определяется исходя из условия обеспечения в три раза более высокой точности измерения по отношению к поверяемому влагомеру. Так, для влагомера «Колос-1» с абсолютной погрешностью в диапазоне 8 %–18 % $\pm 1,5$ % образцовый должен иметь погрешность не более $\pm 0,5$ %.

Порядок выполнения работы

Ознакомиться с измерительными приборами «Колос-1», «Фауна-М» и другими средствами измерений.

А. Измерение влажности зерна и поверка влагомера «Колос-1»

Подготовка прибора к работе:

1. Перед переноской влагомера необходимо установить движок «стопор» на белую точку и поставить засыпной стакан в бункер.
2. Поставить влагомер на горизонтальную плоскость, обеспечив его устойчивость и наклон не более 3°.
3. Убедиться в работоспособности влагомера, для чего установить движок «стопор» на красную точку и нажать рукой на весовое устройство. При этом на индикаторе должны появиться цифры. Кратковременное (менее 0,8 с) появление цифр на индикаторе указывает на разрядку батареи «Крона ВЦ» или аккумулятора 7Д-0,115 и необходимость замены батареи или зарядки аккумулятора.

Порядок проведения измерений:

1. Установить движок «стопор» на белую точку и освободить бункер от остатков зерна.
2. Освободить засыпной стакан от остатков зерна.
3. Установить движок «стопор» на красную точку.
4. Заполнить насыпной стакан пробой зерна.
5. Равномерно засыпать пробу зерна в бункер с высоты 3–5 см над уровнем датчика в течение 10–12 с, обеспечив равномерность заполнения объема бункера, до включения влагомера (появление информации на индикаторе – первое показание влагомера).
6. Через 30–35 с после включения зафиксировать результат измерения (второе показание влагомера).

Примечание. При температуре зерна, равной 20 °С, изменения показаний влагомера может не произойти.

7. По таблице, прилагаемой к влагомеру, определить влажность для соответствующей культуры. Измерения выполнить трижды, результаты занести в табл. 11.1.

8. Освободить бункер влагомера от зерна и установить движок «стопор» на белую точку.

9. Рассчитать среднее значение влажности по формуле

$$W_{\text{cp}} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3}. \quad (11.2)$$

10. Рассчитать абсолютную погрешность измерения влажности по формуле

$$\Delta W = W_{\text{cp}} - W_0 \quad (11.3)$$

и вариацию показаний влагомера «Колос-1» по формуле

$$V = \frac{W_{\text{пр. max}} - W_{\text{пр. min}}}{W_{\text{cp}}} \cdot 100 \%. \quad (11.4)$$

11. Выполнить измерения влажности других образцов зерна (по указанию преподавателя).

Таблица 11.1

Результаты измерений и вычислений (задание А)

Культура	Измерено				Вычислено		
	W			W ₀ , %	W _{cp} , %	ΔW, %	V, %
	W ₁ , %	W ₂ , %	W ₃ , %				
№ 1							
№ 2							
№ 3							
№ 4							

Б. Измерение влажности зерна и поверка влагомера «Фауна-М»

1. Выдержать влагомер и зерно в условиях измерения не менее 60 мин. Точность измерений будет тем выше, чем меньше отличается температура влагомера от температуры контролируемого зерна и температуры (20 ± 2) °С.

2. Перед измерением извлечь совек из измерительной камеры и убедиться, что камера пустая, сухая и чистая. При необходимости протереть ее мягкой сухой тканью. Ни в коем случае не продувать

измерительную камеру, т. к. образовавшийся при этом конденсат приведет к ошибке измерений.

3. Для проверки работоспособности влагомера нажать и удерживать кнопку включения. При этом на дисплее появляются надписи: в верхней строке – «Влагомер зерна», в нижней – символ «Б» (батарея) и линейный индикатор заряда батареи. Символы «***» на индикаторе соответствуют напряжению 9 В, символы «000» – 7,5 В и предупреждают о необходимости замены батареи питания при первой возможности. Отпустить кнопку включения. Влагомер выходит в режим «Выбор культуры», а на дисплее в верхней строке появляется название зерна, которое контролировалось в прошлый раз, в нижней строке – последовательно исчезающие символы «...». Через 4 с влагомер переходит в режим «Измерение». В верхней строке дисплея сохраняется название зерна и появляется значение температуры влагомера, а в нижней – слово «Влажность» и символы «<<<<<<», обозначающие выход за нижний предел измерений. Через 7 с влагомер автоматически выключается.

4. Очистить измеряемую пробу от сорных примесей и поврежденных зерен.

5. Без уплотнения и встряхивания равномерно засыпать зерно в течение 5–7 с в измерительную камеру до краев.

6. Кратковременным нажатием на кнопку включения войти в режим «Выбор культуры». На дисплее появляется наименование измеренной ранее культуры. Для выбора другой зерновой культуры необходимо во время появления на дисплее символов «...» кратковременным нажатием на кнопку установить наименование требуемой зерновой культуры, затем кнопку отпустить. После этого влагомер автоматически входит в режим «Измерение» и на дисплее появляются наименование измеряемого зерна, значение его влажности и температуры влагомера.

7. Измерения повторить трижды. Результаты измерений занести в табл. 11.2. После каждого измерения очистить измерительную камеру мягкой сухой тканью или кисточкой. При повторных измерениях того же зерна процедуру установки названия зерна не проводить.

8. По формулам (11.2), (11.3) и (11.4) рассчитать среднее значение, абсолютную погрешность и вариацию измерения влажности.

9. Сделать заключение о соответствии погрешности поверяемого влагомера паспортным данным.

Таблица 11.2

Результаты измерений и вычислений (задание Б)

Культура	Измерено				Вычислено		
	W			W ₀ , %	W _{ср} , %	ΔW, %	V, %
	W ₁ , %	W ₂ , %	W ₃ , %				
№ 1							
№ 2							
№ 3							
№ 4							

Контрольные вопросы

1. Какие существуют прямые и косвенные методы измерения влажности?
2. Как определяется влажность зерна по методу высушивания?
3. В чем сущность электрических (кондуктометрического, диэлькометрического, СВЧ) методов измерения влажности?
4. Какие параметры измеряемого объекта (кроме влажности) влияют на показания влагомера?
5. Как устраняется влияние мешающих факторов на результат измерения?
6. Как производится поверка влагомеров?

Лабораторная работа № 12

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

Цель работы:

1. Ознакомиться с методами измерения уровня жидкостей и принципом действия наиболее распространенных уровнемеров жидкостей.
2. Изучить устройство и принцип действия гидростатического уровнемера, состоящего из измерительного преобразователя давления «Сенсор-М-122-t1» и измерителя-регулятора МТ2.
3. Определить основные метрологические характеристики гидростатического уровнемера.

Общие сведения

Наиболее распространенные методы измерения уровня жидкостей, реализованные в промышленном оборудовании, показаны на рис. 12.1.

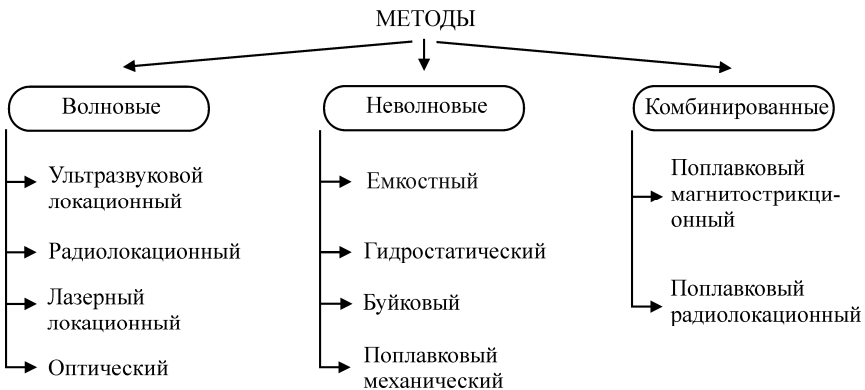


Рис. 12.1. Методы измерения уровня жидкостей

В волновых измерителях уровня используются эффекты, связанные с распространением электромагнитных или акустических волн в жидкости, парогазовой смеси либо в конструктивных элементах (волноводах, звуководных трубах), контактирующих со средами.

В неволновых измерителях уровня используются иные принципы измерения уровня, основанные на изменении емкости конструктивного конденсатора, давления столба жидкости и выталкивающей силы, действующей на погруженное в жидкость тело.

Комбинированные измерители уровня сочетают в себе элементы волновых и неволновых. В магнитострикционном уровнемере уровень фиксируется поплавком, определение положения которого производится с помощью механических колебаний в звукопроводе.

В АПК в настоящее время наиболее широко используются неволновые уровнемеры: поплавковые, буйковые, емкостные и гидростатические.

В *поплавковых уровнемерах* (рис. 12.2) имеется плавающий на поверхности жидкости поплавок, в результате чего измеряемый уровень преобразуется в перемещение поплавка. В таких приборах используется легкий поплавок, изготовленный из коррозионно стойкого материала. Показывающее устройство прибора соединено с поплавком тросом или с помощью рычагов.

Поплавок может быть снабжен магнитом и заключен в измерительную трубу либо может скользить по направляющему стержню. Магнит может влечь за собой ползунок реостата. Изменение сопротивления преобразуется в электрический выходной сигнал, что дает помимо визуального контроля возможность дистанционной передачи показаний и включения в систему автоматизации.

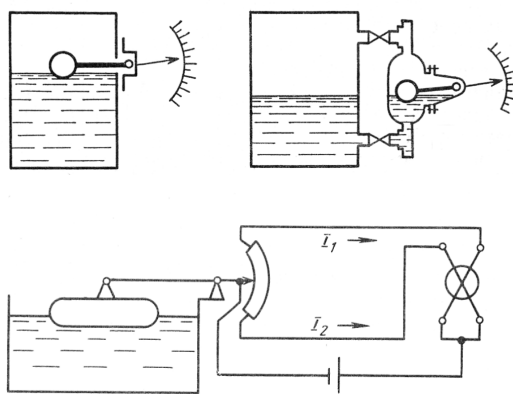


Рис. 12.2. Примеры поплавковых уровнемеров

Поплавковые уровнемеры могут содержать в теле направляющего стержня цепочку герконов, замыкаемых движущимся магнитом и резистивную матрицу (рис. 12.3). Дискретность измерения уровня таких приборов составляет 6–12 мм.

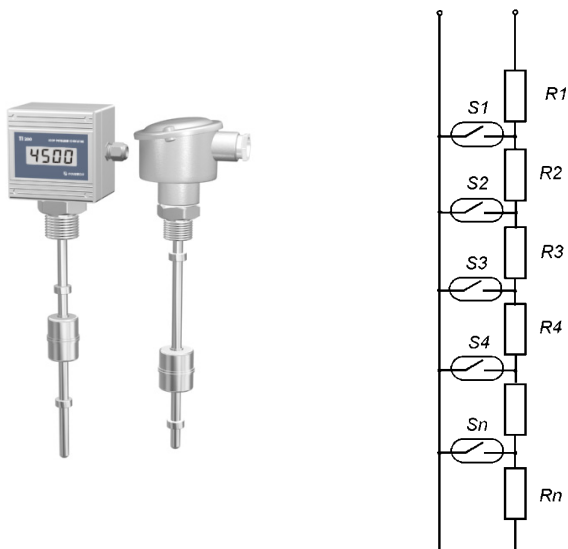


Рис. 12.3. Поплавковый уровнемер с резистивной матрицей и герконовыми реле

В буйковых уровнемерах (рис. 12.4) применяется неподвижный буюк, погруженный в жидкость. Принцип действия буйковых уровнемеров основан на том, что на погруженный буюк со стороны жидкости действует выталкивающая сила. По закону Архимеда эта сила равна весу жидкости, вытесненной буйком. Количество вытесненной жидкости зависит от глубины погружения буйка, т. е. от уровня жидкости в емкости. Таким образом, в буйковых уровнемерах измеряемый уровень преобразуется в пропорциональную ему выталкивающую силу. Поэтому зависимость выталкивающей силы от измеряемого уровня линейная. В буйковых уровнемерах буюк передает усилие на рычаг промежуточного преобразователя.

Принцип действия буйковых уровнемеров позволяет в широких пределах изменять их диапазон измерения. Это достигается как заменой буйка, так и изменением передаточного отношения рычажного механизма промежуточного преобразователя.

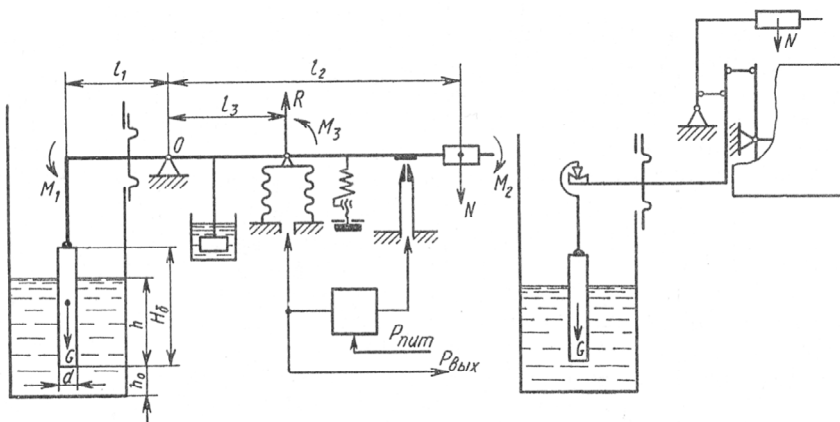


Рис. 12.4. Буйковые уровнемеры

Работа емкостных уровнемеров (рис. 12.5) основана на различии диэлектрической проницаемости жидкостей и воздуха. Простейший первичный преобразователь емкостного прибора представляет собой электрод (металлический стержень или провод), расположенный в вертикальной металлической трубке. Стержень вместе с трубкой образуют конденсатор. Емкость такого конденсатора зависит от уровня жидкости, т. к. при его изменении от нуля до максимума диэлектрическая проницаемость будет изменяться от диэлектрической проницаемости воздуха до диэлектрической проницаемости жидкости. Роль второй обкладки конденсатора может играть металлическая стенка емкости. В случае проводящей жидкости стержень покрывается изолятором, обычно фторопластом.

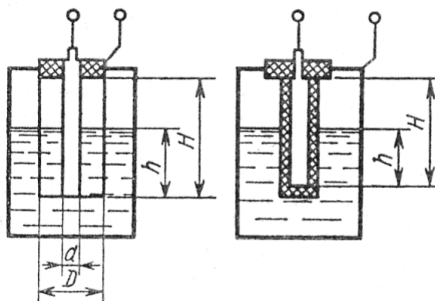


Рис. 12.5. Емкостные уровнемеры

Измерение уровня *гидростатическими уровнемерами* (рис. 12.6) сводится к измерению гидростатического давления P , создаваемого столбом жидкости h постоянной плотности ρ , согласно равенству

$$P = \rho gh, \quad (12.1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Из равенства (12.1)

$$h = \frac{P}{\rho g}. \quad (12.2)$$

Измерение гидростатического давления может осуществляться:

1) манометром, подключаемым на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня (в открытых емкостях – рис. 12.6, *а, б*);

2) дифференциальным манометром, подключаемым одним входом к резервуару на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня, а вторым входом – к газовому пространству над жидкостью (в закрытых емкостях – рис. 12.6, *в*).

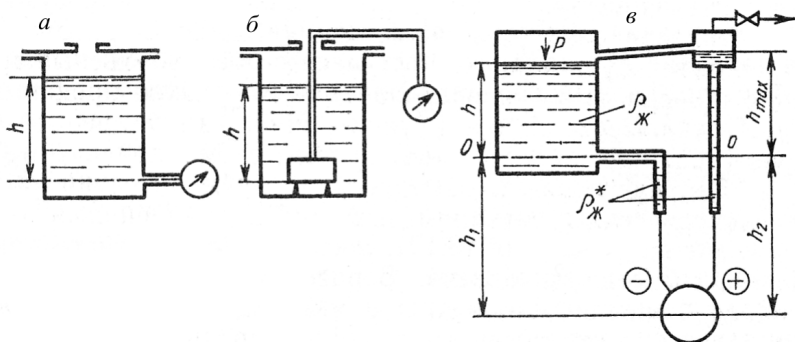


Рис. 12.6. Схемы гидростатических уровнемеров

В настоящей лабораторной работе рассматривается гидростатический уровнемер, состоящий из измерительного преобразователя (датчика) избыточного давления «Сенсор-М-122-т1» и измерителя-регулятора МТ2 (рис. 12.7).

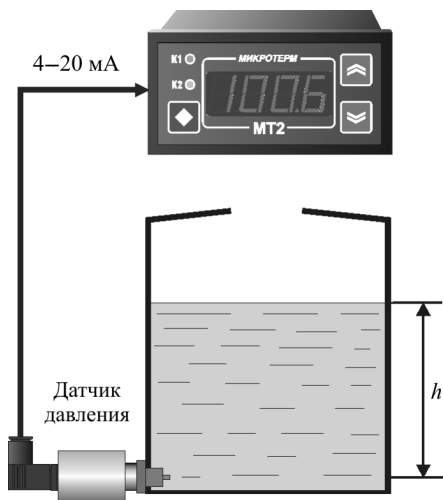


Рис. 12.7. Гидростатический уровнемер

Измерительный преобразователь (датчик) избыточного давления «Сенсор-М-122-t1» преобразует гидростатическое давление столба жидкости h в унифицированный линейный токовый сигнал, изменяющийся в диапазоне 4–20 мА, а измеритель-регулятор MT2 преобразует его в цифровой отсчет значения уровня.

Определение метрологических характеристик гидростатического уровнемера

Основными метрологическими характеристиками уровнемера являются диапазон измерений, погрешности (абсолютная, относительная, приведенная) и вариация показаний.

Диапазон измерений уровнемера определяется по формуле (12.2). Как видно из формулы он зависит от диапазона преобразования датчика давления, плотности жидкости и ускорения свободного падения.

Погрешности уровнемера определяются по следующим зависимостям:

– абсолютная погрешность:

$$\Delta h = h - h_d, \quad (12.3)$$

где h – показание уровнемера (измеренное значение);

h_d – действительное значение уровня;

– относительная погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta h}{h_d} \cdot 100 \%; \quad (12.4)$$

– приведенная погрешность:

$$\gamma = \frac{\Delta h}{h_N} \cdot 100 \%, \quad (12.5)$$

где h_N – нормирующее значение (обычно принимается равным верхнему пределу диапазона измерений).

Вариация показаний определяется по формуле

$$V = \frac{h_b - h_y}{h_N} \cdot 100 \%, \quad (12.6)$$

где h_b , h_y – показания уровнемера при возрастающих и убывающих значениях уровня соответственно.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методами измерения уровня жидкостей и принципом действия наиболее распространенных уровнемеров жидкостей.

Изучить устройство и принцип действия гидростатического уровнемера, состоящего из измерительного преобразователя (датчика) давления «Сенсор-М-122-t1» и измерителя-регулятора МТ2.

2. Определить основные метрологические характеристики гидростатического уровнемера воды, руководствуясь приведенными рекомендациями.

Плотность воды принять равной $998,23 \text{ кг/м}^3$, ускорение свободного падения – $9,815 \text{ м/с}^2$, верхний предел преобразования датчика давления «Сенсор-М-122-t1» – 16 кПа .

Для определения погрешностей и вариации проводится измерение уровня при его возрастании в диапазоне от 0 до 100 см и убывании от 100 до 0 см. Действительное значение уровня определяется с помощью меры длины (мерной линейки).

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Таблица

Результаты измерений и вычислений

Измерено			Вычислено			
h_d , см	$h_{вz}$, см	h_y , см	Δh , см	δ , %	γ , %	V , %
0						
20						
40						
60						
80						
100						

При определении абсолютной погрешности Δh по формуле (12.3) используется то показание уровнемера, которое дает бóльшую (по модулю) погрешность.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы измерения уровня жидкости?
2. Каков принцип действия поплавковых уровнемеров?
3. Каков принцип действия буйковых уровнемеров?
4. Каков принцип действия емкостных уровнемеров?
5. Каков принцип действия гидростатических уровнемеров?
6. От чего зависит диапазон измерения гидростатического уровнемера?
7. Каковы основные метрологические характеристики гидростатического уровнемера? Как они определяются?

Лабораторная работа № 13

ИЗУЧЕНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы:

1. Ознакомиться с методами бесконтактного измерения температуры.
2. Изучить устройство и принцип действия пирометра «Нимбус-530».
3. Приобрести навыки настройки пирометра «Нимбус-530» и его использования для измерения температуры.

Общие сведения

Бесконтактные методы измерения температуры охватывают широкий диапазон температур – от 173 до 6000 К, включающий в себя низкие, средние и высокие температуры. Эти методы, основанные на определении температуры по тепловому излучению объекта без нарушения его температурного поля, получили название пирометрических. Тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение, возбуждаемое тепловым движением атомов и молекул в твердых, жидких и газообразных веществах.

Теория пирометрических методов измерений температуры основана на законах, устанавливающих связь между излучением абсолютно черного тела (АЧТ) и его температурой. Абсолютно черным телом называется тело, поглощающее все падающее на него излучение и, соответственно, способное при данной температуре излучать максимальную энергию. Хорошим приближением к АЧТ является закрытая со всех сторон полость с малым отверстием, площадь которого пренебрежимо мала по сравнению с общей поверхностью полости.

Закон Планка устанавливает связь между абсолютной температурой и спектральным распределением потока излучения (светимости) АЧТ:

$$M_{\lambda T}^o = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (13.1)$$

где $M_{\lambda T}^O$ – спектральная плотность потока излучения АЧТ, т. е. энергия, излучаемая в единицу времени единицей площади поверхности излучателя, приходящаяся на единицу диапазона длин волн;

$C_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ Вт·м², $C_2 = 0,01438786$ м·К – первая и вторая постоянные излучения соответственно.

При малых значениях λT можно вместо выражения (13.1) пользоваться законом Вина:

$$M_{\lambda T}^O = C_1 \lambda^{-5} e^{\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (13.2)$$

Полная энергия, излучаемая с единицы поверхности АЧТ в единицу времени, определяется законом Стефана–Больцмана:

$$M_T^O = \sigma T^4, \quad (13.3)$$

где $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана.

Приборы для измерения температур объектов по их тепловому электромагнитному излучению называются пирометрами (другие названия – ИК-термометры, термометры излучения).

В зависимости от естественной входной величины пирометры подразделяются:

– на *пирометры полного излучения (радиационные пирометры)*, воспринимающие полную (интегральную) энергию излучения;

– *пирометры частичного излучения (яркостные пирометры)*, основанные на зависимости от температуры энергетической яркости излучения в ограниченном диапазоне длин волн;

– *пирометры спектрального отношения (цветовые пирометры)*, в которых используется зависимость от температуры отношения спектральных плотностей энергетических яркостей на двух или нескольких длинах волн.

Пирометры полного излучения, или радиационные пирометры. Принцип их действия основан на зависимости от температуры интегральной мощности излучения АЧТ во всем диапазоне длин волн, определяемой законом Стефана–Больцмана (13.3).

Для реального тела эта зависимость определяется выражением

$$M_T = \varepsilon \sigma T^4, \quad (13.4)$$

где $0,04 \leq \varepsilon \leq 1$ – коэффициент теплового излучения (коэффициент излучательной способности), зависящий от материала излучателя и от состояния и температуры его поверхности. Например, для стальных изделий в зависимости от появления на них окалины значение ε может изменяться от 0,1 до 0,9. Пирометр, градуированный по излучению АЧТ, при измерении на реальном объекте покажет т. н. радиационную температуру T_p , значение которой всегда меньше действительной температуры объекта T . Радиационной температурой объекта называется такая температура АЧТ, при которой его полная мощность излучения (плотность излучения во всем диапазоне длин волн – от $\lambda_1 = 0$ до $\lambda_2 = \infty$) равна полной мощности излучения рассматриваемого объекта при температуре T .

Связь между T_p и T определяется из равенства $\sigma T_p^4 = \varepsilon \sigma T^4$, откуда

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}. \quad (13.5)$$

Пирометры полного излучения применяются для измерения в диапазоне температур от -50 °С до $+3500$ °С. Наиболее целесообразно использовать такие пирометры для измерения температуры объектов, излучательные свойства которых мало отличаются от свойств АЧТ. Этому условию удовлетворяют большинство закрытых печей и топок с малым отверстием, кожа человека, стекло, резина и др.

На рис. 13.1 показана упрощенная структура пирометра полного излучения.

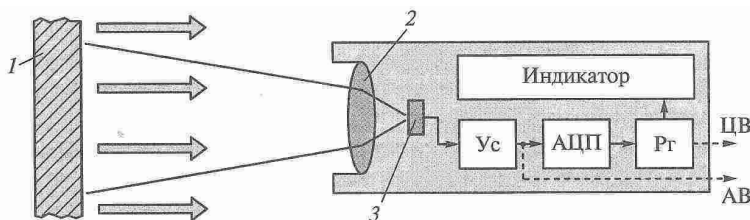


Рис. 13.1. Упрощенная структура пирометра полного излучения:
1 – объект; 2 – объектив; 3 – приемник

Тепловое излучение поверхности объекта объективом прибора фокусируется на приемник, в роли которого часто выступает термопара. ТермоЭДС термопары увеличивается усилителем ($Ус$), преобразуется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в цифровой код, который некоторое время хранится в запоминающем регистре (Рг) и представляется на индикаторе результатом измерения. Объектив пирометра одновременно выполняет функцию полосового фильтра частот.

Пирометр может также содержать узлы связи (аналоговой или цифровой) с внешними устройствами. На рис. 13.1 показаны аналоговый (АВ) и цифровой (ЦВ) выходы. Наличие у пирометра выхода аналогового сигнала, пропорционального текущему значению измеряемой температуры, позволяет подключить прибор к внешнему аналоговому самопишущему прибору или к цифровому измерительному регистратору.

Для задач длительного мониторинга применяются также пирометрические измерительные преобразователи. Эти устройства не имеют индикатора, их выходной аналоговый сигнал представлен пропорциональным измеряемой температуре током (например, 4–20 мА) или напряжением (например, 0–5 В). Они предназначены для работы совместно с показывающими приборами или регистраторами в составе измерительных установок, комплексов или систем.

Пирометры частичного излучения. Принцип их действия основан на использовании зависимости мощности от температуры излучения в ограниченном диапазоне длин волн. Рабочий диапазон измерения таких пирометров – от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+6000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вследствие неполноты излучения реальных тел яркостные пирометры измеряют не действительную температуру тела T , а т. н. *яркостную температуру* T_{λ} . Соотношение между действительной и яркостной температурами, как следует из законов излучения, определяется выражением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\lambda}} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_{\lambda}, \quad (13.6)$$

где ε_{λ} – коэффициент теплового излучения для длины волны λ . В зависимости от материала излучателя и состояния его поверхности значения коэффициента теплового излучения ε_{λ} колеблются в широких пределах: $0 < \varepsilon_{\lambda} \leq 1$.

Разновидностью пирометра частичного излучения является *монокроматический яркостный пирометр*, основанный на сравнении энергетической яркости объекта исследования с энергетической яркостью образцового излучателя в узком участке спектра излучения. В качестве образцовых излучателей обычно используются лампы накаливания с плоской вольфрамовой нитью, которые при температуре нити ниже $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеют стабильную зависимость яркости от тока накала нити.

В свое время широкое применение для измерения температур в диапазоне $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ получили визуальные пирометры с исчезающей нитью. В таком пирометре (рис. 13.2) изображение объекта 1 путем перемещения объектива 2 совмещается с плоскостью нити накаливания эталонной лампы накаливания 3. Наблюдая изображения объекта и нити через светофильтр 4 и окуляр 5, наблюдатель меняет при помощи реостата 6 ток накала нити лампы до тех пор, пока середина накаливаемой нити не исчезнет на фоне изображения объекта. Это свидетельствует о равенстве энергетических яркостей излучающего объекта и нити в области спектра, определяемого характеристикой пропускания красного фильтра $\tau(\lambda)$ и спектральной характеристикой чувствительности глаза наблюдателя $v(\lambda)$, максимум которой для нормальных глаз соответствует длине волны $\lambda = 0,555\text{ мкм}$.

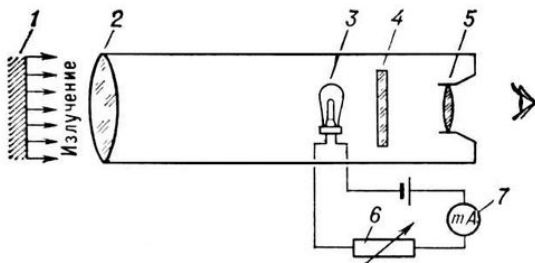


Рис. 13.2. Принципиальная схема визуального яркостного пирометра с исчезающей нитью:

- 1 – объект; 2 – объектив; 3 – лампа накаливания; 4 – светофильтр;
5 – окуляр; 6 – реостат; 7 – миллиамперметр

Зависимость между током лампы, измеряемым прибором 7, и яркостной температурой определяется путем градуировки термометра по температуре АЧТ.

Пирометры спектрального отношения, или цветковые пирометры. Показывают *цветовую температуру* тела $T_{\text{ц}}$ – условную температуру, при которой АЧТ имеет такое же относительное спектральное распределение энергетической яркости, что и исследуемое реальное тело с действительной температурой T .

Показания пирометра спектрального отношения соответствуют действительной температуре, если объект является абсолютно черным или серым телом, т. е. таким телом, у которого излучательная способность для всех длин волн одинакова.

Если ε зависит от длины волны, то связь между действительной и цветовой температурой определяется выражением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} + \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ln \left(\frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \right)}{C_2 (\lambda_2 - \lambda_1)}, \quad (13.7)$$

где ε_{λ_1} , ε_{λ_2} – коэффициенты излучательной способности тела на длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно.

Из выражения (13.7) следует, что пирометры спектрального отношения, в отличие от пирометров полного или частичного излучения, показывают действительную температуру серых тел и их показания не зависят от излучательной способности тела до тех пор, пока $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$.

Для многих тел значение ε_{λ} не остается постоянным с изменением длины волны. У металлов ε_{λ} уменьшается с ростом длины волны, у неметаллических тел в ряде случаев ε_{λ} , наоборот, увеличивается. Поскольку при $\lambda_2 > \lambda_1$ величина ε_{λ_2} больше, равна или меньше ε_{λ_1} , то измеренная цветовая температура, как следует из выражения (13.7), может быть больше действительной температуры, меньше нее или равна ей. Из этого же выражения следует, что цветовая температура $T_{\text{ц}}$ тела тем ближе к действительной температуре, чем больше значение разности $\lambda_2 - \lambda_1$.

В целом погрешности пирометров спектрального отношения меньше, чем у пирометров полного или частичного излучения. Их

показания принципиально не зависят от расстояния до объекта исследования, а также от поглощения излучения в промежуточной среде между объектом и пирометром, если $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$.

Подготовка к работе и порядок работы с пирометром «Нимбус-530»

Выбор единиц измерения температуры. Для пирометров «Нимбус-530» следует нажать на кнопку режима несколько раз, пока символ единиц измерения температуры на дисплее не начнет мигать. Затем необходимо нажать на кнопку «Вверх/Лазер» или «Вниз/Подсветка», чтобы выбрать единицы измерения температуры (градусы Фаренгейта или градусы Цельсия), затем «Триггер», чтобы подтвердить выбор.

Измерение температуры. Для измерения температуры следует навести пирометр на объект и нажать на кнопку «Триггер». В зависимости от настроек дисплей покажет текущее значение температуры.

Возможны следующие настройки режима измерения: максимальное/минимальное значение температуры, верхний/нижний предел, настройка коэффициента излучения, включение/выключение функции смещения, включение/выключение подсветки. Каждый раз, когда кнопка «Триггер» отпущена, функция удержания включает новый режим при помощи этой кнопки. При однократном нажатии на кнопку «Режим» мигающий дисплей указывает на включенный режим работы.

При помощи кнопок «Вверх» и «Вниз» следует выбрать и изменить нужное значение, повторным нажатием на кнопку «Режим» сохранить выбранную настройку. Одновременно происходит переход к следующей настройке режима. Повторить предыдущую процедуру.

Если в течение 7 с ни одна кнопка не нажата, прибор сохраняет текущее значение измерения и выключается. Если заново нажать на кнопку «Триггер», на дисплее включаются последние сохраненные настройки функции.

Показания дисплея. Дисплей отображает измеренную температуру в градусах Цельсия или в градусах Фаренгейта. При отображении температуры по шкале Цельсия на дисплее справа от

значения температуры появляется символ «°C». При отображении температуры по шкале Фаренгейта на дисплее справа от значения температуры появляется символ «F». Ниже под значением температуры указывается значение излучательной способности ϵ (рис. 13.3).

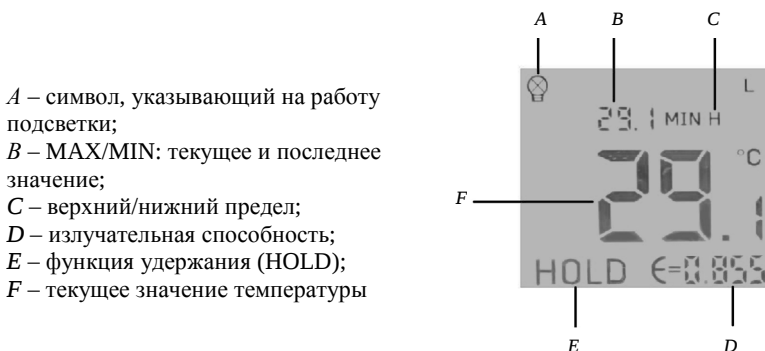


Рис. 13.3. Показания дисплея

Рекомендации по измерению температуры

Показатель визирования и поле зрения. С увеличением расстояния от пирометра до измеряемого объекта увеличивается область, измеряемая пирометром, в соответствии с показателем визирования пирометра. Для пирометра «Нимбус-530» показатель визирования равен 10:1, т. е. при измерении температуры объекта с данного расстояния пирометр измеряет температуру области диаметром в 10 раз меньше расстояния, с которого производится измерение.

Для точного измерения температуры необходимо, чтобы размер измеряемого объекта был больше области, измеряемой пирометром. При необходимости измерить меньшие объекты следует производить измерения с меньшего расстояния.

Учет коэффициента излучения различных веществ. Большинство окружающих объектов, таких как органические вещества, окрашенные поверхности, окисленные поверхности, почва и т. п. имеют коэффициент излучения, равный 0,95 или близкий к этому значению (для пирометра «Нимбус-530» по умолчанию установлен

коэффициент 0,95, но он может быть изменен в пределах 0,1...1,0). Большинство пищевых продуктов в горячем или замороженном состоянии имеют коэффициент излучения, равный 0,97 или близкий к этому значению. *Не рекомендуется* измерять температуру блестящих полированных металлических поверхностей. Если все же возникла такая необходимость, то для более точного измерения температуры подобных объектов следует перед измерением покрыть их маскирующей полимерной лентой. Перед измерением температуры следует подождать, пока температура ленты и измеряемого объекта не станут равными.

Настройка коэффициента излучения. Режим удержания: нажать один раз на кнопку «Режим» и войти в режим установки коэффициента излучения. Начинает мигать символ ϵ . Чтобы увеличить значение коэффициента излучения, нажать на кнопку «Вверх». Чтобы уменьшить значение коэффициента излучения, нажать на кнопку «Вниз». Отображаемое значение температуры соответствует настройке коэффициента излучения. Нажать на кнопку «Режим» второй раз, чтобы сохранить настройку.

Настройка функции MIN/MAX-HOLD. После установки настроенного коэффициента излучения при помощи кнопки «Режим» можно одновременно активировать функцию удержания минимального или максимального значения температуры текущего измерения. На дисплее загорается символ MIN или MAX соответственно.

Настройка верхнего и нижнего пределов. Функция сигнализации превышения диапазона активируется сразу, как только на дисплее загорается знак . Верхний и нижний предел диапазона можно установить дополнительно, активировав при помощи кнопки «Вверх» или «Вниз» на дисплее символы H или L.

Настройка лазера. Лазер позволяет наводить прибор на объект. Чтобы включить или выключить лазер, нажать одновременно на кнопки «Триггер» и «Вверх».

Настройка подсветки дисплея. Подсветку можно включить, нажав на кнопку «Вниз» во время измерения, а также в режиме удержания.

Функция быстрого сканирования. Пирометры этих моделей позволяют быстро сканировать объекты измерения, а затем получать минимальное и максимальное значения температуры в функции удержания, нажав на кнопку «Вверх».

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципами и методами бесконтактного измерения температуры.

2. Ознакомиться с устройством пирометра «Нимбус-530». Освоить основные настройки прибора.

3. Произвести измерения температуры объекта с расстояния 0,5–0,6 м с коэффициентом излучения $\varepsilon = 0,95$ (установлен по умолчанию при выпуске из производства). Сравнить измеренное значение с действительным значением температуры (показанием измерителя-регулятора МТ2). Определить абсолютную и относительную погрешности измерения.

4. Изменяя коэффициент ε , добиться одинакового (близкого) показания пирометра и измерителя-регулятора МТ2. Записать значение ε . Определить абсолютную и относительную погрешности измерения.

5. Произвести измерение температуры с расстояния 4,0–4,5 м. Сравнить результат измерения с результатом, полученным в п. 4.

6. Произвести измерение (с расстояния 0,5–0,6 м) температуры части объекта, покрытой алюминиевой фольгой. Сравнить измеренное значение с действительным значением температуры, определить абсолютную и относительную погрешности измерения. Изменяя ε , попытаться добиться одинаковых показаний пирометра и прибора МТ2. Записать коэффициент ε , при котором имеет место минимальная погрешность.

7. Результаты занести в таблицу.

Таблица

Результаты измерений и вычислений

Объект измерения	Расстояние до объекта, м	Измерено			Вычислено	
		ε	t , °C	t_d , °C	Δt , °C	δ , %
1. Нагревательный элемент (без покрытия)	0,5–0,6	0,95				
2. Нагревательный элемент (без покрытия)	0,5–0,6					
3. Нагревательный элемент (без покрытия)	4,0–4,5					

Объект измерения	Расстояние до объекта, м	Измерено			Вычислено	
		ε	$t, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$
4. Нагревательный элемент (покрытый фольгой)	0,5–0,6	0,95				
5. Нагревательный элемент (покрытый фольгой)	0,5–0,6					

Контрольные вопросы

1. На чем базируются методы бесконтактного измерения температуры?
2. Какие различают разновидности пирометров в зависимости от естественной входной величины?
3. Что такое радиационная температура? Как она связана с действительной температурой объекта?
4. Что такое яркостная температура?
5. Каков принцип действия визуального пирометра с исчезающей нитью?
6. Что такое цветовая температура?
7. Что такое показатель визирования? Как его нужно учитывать при измерении температуры пирометром?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника : учебное пособие / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, В. Ю. Барбарович, Б. Я. Литвинов. – СПб. : Питер, 2010. – 368 с.

2. Пелевин, В. Ф. Метрология и средства измерений : учебное пособие / В. Ф. Пелевин. – Минск : Новое знание, 2013 ; М. : ИНФРА-М, 2013. – 272 с.

3. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений : учебник / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – 6-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 336 с.

Дополнительная

4. Панфилов, В. А. Электрические измерения : учебник / В. А. Панфилов. – 8-е изд., испр. – М. : Академия, 2013. – 285 с.

5. Ковалев, В. А. Метрология и электроизмерительная техника. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие / В. А. Ковалев, И. И. Скочек, М. И. Булко. – Минск : БГАТУ, 2021. – 172 с.

6. Метрология и электроизмерительная техника. Практикум : учебно-методическое пособие / В. А. Ковалев, И. И. Скочек, М. И. Булко. – Минск : БГАТУ, 2023. – 68 с.

Учебное издание

**Ковалев Василий Александрович,
Скочек Игорь Иосифович,
Булко Михаил Иванович**

**МЕТРОЛОГИЯ
И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *А. И. Зеленькевич*

Редактор *Д. А. Значёнок*

Корректор *Д. А. Значёнок*

Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*

Дизайн обложки *Д. О. Михеевой*

Подписано в печать 28.07.2025. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 5,45. Тираж 99 экз. Заказ 199.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.