

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

МЕТРОЛОГИЯ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация
технологических процессов и производств»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 389
ББК 30.10
М54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «9» декабря 2025 г.,
протокол № 4

Составители: канд. техн. наук, доц. В. Ф. Поздняков;
ст. преподаватель Е. В. Позднякова

Рецензент канд. техн. наук Н. В. Герасименко

Методические рекомендации к лабораторным работам предназначены для
студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических про-
цессов и производств» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

МЕТРОЛОГИЯ

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевнича

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Инструктаж по технике безопасности при работе с электрическими приборами. Подготовка к работе и общие правила эксплуатации электроизмерительных приборов	4
2 Лабораторная работа № 2. Методы поверки аналоговых измерительных приборов. Поверка миллиамперметра и вольтметра	6
3 Лабораторная работа № 3. Методы поверки аналоговых измерительных приборов. Поверка ваттметра	9
4 Лабораторная работа № 4. Измерение постоянных и переменных токов и напряжений аналоговыми и цифровыми приборами.....	11
5 Лабораторная работа № 5. Методы и схемы расширения диапазона измерения электроизмерительных приборов.....	13
6 Лабораторная работа № 6. Исследование методов и средств измерения параметров цепей постоянного и переменного токов.....	15
7 Лабораторная работа № 7. Методы и схемы измерения параметров периодических и импульсных сигналов.....	19
8 Лабораторная работа № 8. Схемы и методы измерения температуры.....	24
9 Лабораторная работа № 9. Исследование емкостных преобразователей.....	25
10 Лабораторная работа № 10. Исследование резистивных преобразователей.....	27
11 Лабораторная работа № 11. Исследование индуктивных преобразователей.....	28
12 Лабораторная работа № 12. Исследование преобразователей магнитных величин.....	30
13 Лабораторная работа № 13. Обработка результатов прямых измерений.....	33
14 Лабораторная работа № 14. Обработка результатов косвенных измерений.....	36
Список литературы.....	40
Приложение А. Пример выполнения задания по обработке результатов прямых измерений.....	41
Приложение Б. Исключение грубых погрешностей результатов наблюдений.....	44
Приложение В. Проверка нормального закона распределения результатов наблюдений.....	45
Приложение Г. Пример выполнения обработки результатов косвенных измерений.....	47

1 Лабораторная работа № 1. Инструктаж по технике безопасности при работе с электрическими приборами. Подготовка к работе и общие правила эксплуатации электроизмерительных приборов

Цель работы: изучить основные правила подготовки и безопасной работы с электроизмерительными приборами; усвоить основные правила эксплуатации средств измерений; получить практические навыки по эксплуатации электроизмерительных приборов.

1.1 Общие положения

Электроизмерительная техника включает большой арсенал разнообразных по своим принципам, конструкции, назначению и исполнению средств. В основном это дорогостоящие и высокоточные приборы, комплексы, системы. С их помощью осуществляют контрольно-измерительные операции в условиях лаборатории, цехов, а также в полевых условиях. При всем их многообразии специфики имеются некоторые общие правила, которые обеспечивают безопасную эксплуатацию и охрану труда.

Каждое средство измерений должно иметь паспорт и инструкцию по эксплуатации, которыми руководствуется обслуживающий персонал. Без изучения инструкции пользоваться приборами, установками, комплексами запрещается. Перед включением в сеть проверяется наличие заземления, а коммутирующие и регулирующие устройства выставляются в исходное состояние.

Работа в лаборатории проводится под наблюдением. При этом к каждой лабораторной установке должен быть обеспечен свободный доступ: не допускается загромождение проходов, хождение студентов и посторонних лиц во время занятий. Мероприятия по технике безопасности и охране труда, технической надежности и пожарной защите являются составной частью подготовки и проведения лабораторных занятий. Эти мероприятия должен знать и обязательно выполнять каждый студент. Руководитель эксперимента и испытаний должен проинструктировать перед началом эксперимента каждого участника правилам безопасной эксплуатации данной установки и проверить наличие защитных и контрольных устройств. Все участники эксперимента должны вести себя так, чтобы не создавать опасные ситуации. Перед включением все участники извещаются об этом, например, фразой: «Включаю установку», «Подаю напряжение» и т. д. По окончании эксперимента устройство должно быть отключено и надежно защищено от повторного включения. Работа на электроустановках требует внимательного и ответственного отношения со стороны всех участников эксперимента. Электрический ток оказывает на организм вредное физиологическое воздействие. Нужно учитывать, что сопротивление тела человека колеблется от 10 до 100 кОм и при сравнительно небольшом напряжении может быть смертельный исход. Однако при неблагоприятных обстоятельствах воздействие тока на организм человека может быть еще хуже. Каждый участник эксперимента должен знать, как в кратчайший срок обесточить установку.

При несчастных случаях с кажущимся смертельным исходом необходимо отключить установку, начать принимать меры к оживлению пострадавшего и не прекращать их до прибытия врача, даже если для этого потребуется несколько часов. Безопасная и надежная эксплуатация средств измерений может быть обеспечена при соблюдении следующих рекомендаций: измерительные средства используются в строгом соответствии с инструкцией; измерительные средства необходимо защищать от ударов и сотрясений, от пыли; у приборов, снабженных арретиром, последний освобождается только при измерениях и сразу после измерения он должен быть арретирован; выбор прибора и его рабочего диапазона согласовывается с целью применения.

Подготовка к измерениям. Измерения требуют тщательной и всесторонней подготовки. Прежде всего необходимо четко и конкретно определить, что должно быть измерено и в каких условиях. Подготовка к измерениям нужно вести на высоком техническом уровне, с отчетливым представлением измерительной задачи, требований к результатам и программы обработки. При выборе места, схемы и средства измерений следует предварительно аналитически оценить возможные результаты с учетом того, что при обработке полученных данных они могут быть улучшены. На этот выбор оказывают влияние место и время проведения измерения.

Выполнение измерений. Перед включением обязательно проверяются измерительная схема, положение переключателей на передних панелях приборов, режим их охлаждения, наличие заземления.

При отсчете показаний следует избегать погрешностей от параллакса, особенно для приборов с профильной шкалой. Чтобы уменьшить влияние вариаций, показания снимают один раз при уменьшении, другой – при увеличении измеряемой величины и из двух показаний находят среднее арифметическое. При выборе диапазона измерений необходимо отсчитывать результат на участие с более высокой чувствительностью и линейностью и в положении ближе к оцифрованному значению.

1.2 Программа работы

1 Ознакомиться с лабораторной установкой и особенностями составляющих ее устройств.

2 Изучить инструкции по подготовке и эксплуатации приборов (по заданию).

3 Подготовить измерительные приборы к работе, проверить соответствие всех положений переключателей рекомендациям инструкции и включите приборы в сеть.

4 Произвести измерения, установить влияние субъективных и объективных причин на результат (оценить погрешность от параллакса, погрешность отсчета при повторных измерениях и т. д.).

В результате выполнения работы студент должен иметь навыки практической работы с комплексом и свободно подключать его к заданному объекту для измерения контролируемых параметров.

Контрольные вопросы

- 1 Какой вид тока опасней для человека и почему?
- 2 Поясните порядок включения учебного стенда.
- 3 Какие средства индивидуальной защиты от поражения электрическим током вы знаете?
- 4 Какие средства общей защиты от поражения электрическим током вы знаете?
- 5 Что необходимо сделать перед включением и работой с измерительным прибором?

2 Лабораторная работа № 2. Методы поверки аналоговых измерительных приборов. Поверка миллиамперметра и вольтметра

Цель работы: изучить основные метрологические характеристики средств измерений; изучить методы поверки измерительных средств, схему поверки амперметра, схему поверки вольтметра; определить класс точности поверяемых амперметра и вольтметра; получить практические навыки поверки аналоговых электроизмерительных приборов.

2.1 Общие положения

Поверкой СИ называется определение метрологической службой погрешностей СИ и установление его пригодности к применению. Поверка включает в себя ряд операций, позволяющих всесторонне оценить состояние прибора и допустить его к применению или забраковать. Она является одним из звеньев в многоступенчатой цепи передачи размера единицы от эталона к рабочему СИ. Именно эта связь с эталоном позволяет обеспечить единообразие СИ и единство измерений. Поверка СИ осуществляется путем сличения его показаний с показаниями более точного образцового СИ.

Поверку осуществляют территориальные органы Госстандарта РБ. Поверка СИ производится в соответствии с методиками поверки или калибровки.

Классы точности СИ. В случаях, когда СИ имеют только аддитивную погрешность, предел допускаемой абсолютной погрешности $\Delta_{\text{дон}}$ будет постоянен во всем диапазоне. Поэтому его выбирают в качестве нормирующего значения

$$\delta_{\text{дон}} = \frac{\Delta_{\text{дон}}}{X} 100 \% = \pm q.$$

Такая запись означает, что абсолютная погрешность СИ в любой точке диапазона измерений не превышает a единиц измеряемой величины:

$$\Delta_{\text{дон}} = \pm q.$$

Однако указание только абсолютной погрешности не позволяет сравнивать между собой по точности приборы с разными диапазонами измерений, поэтому для электроизмерительных приборов большое распространение получило нормирование приведенной погрешности, определяемой формулой

$$\gamma = \frac{\delta_{\text{дон}}}{X_N} 100 \% = \pm p,$$

где X_N – нормирующее значение.

Значение $\gamma_{\text{дон}}$, так же как и $\Delta_{\text{дон}}$, постоянно во всем диапазоне и может быть представлено одним числом p .

Для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, а также для измерительных преобразователей, если нулевое значение измеряемого параметра находится на краю или вне диапазона измерений, нормирующее значение устанавливается равным большему из пределов измерений. Для средств измерений, нулевое значение измеряемого параметра которых находится внутри диапазона измерений, нормирующее значение устанавливается равным большему из модулей пределов измерений. Для электроизмерительных приборов с практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений нормирующее значение устанавливается равным сумме модулей пределов измерений. Для средств измерений с установленным номинальным значением нормирующее значение устанавливают равным этому номинальному значению. Для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой нормирующее значение устанавливают равным всей длине шкалы, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах измерения длины в миллиметрах.

Условное обозначение класса точности зависит от нормирующего значения. Если X_N выражено в единицах измеряемой величины, то класс точности обозначается числом, совпадающим с пределом допускаемой приведенной погрешности. Например, если $\gamma_{\text{дон}} = \pm 1,5 \%$, то класс точности обозначается 1,5. Если нормирующее значение выражается длиной шкалы, то обозначение класса точности имеет вид 1,5. Это означает, что предел допускаемой погрешности равен 1,5 % длины шкалы.

В СИ преобладающей мультипликативной погрешностью удобнее нормировать предел допускаемой относительной погрешности, поскольку его значение будет постоянным во всем диапазоне:

$$\delta_{\text{дон}} = \frac{\Delta_{\text{дон}}}{X} 100 \% = \pm q.$$

Данная запись означает, что относительная погрешность СИ в любой точке диапазона измерения не превышает q процентов от показания СИ.

Условное обозначение класса точности, наносимое на СИ, в этом случае

имеет вид 0,5. Это означает, что предел допускаемой относительной погрешности $\delta_{\text{дон}} = \pm 0,5 \%$.

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

$$\delta_{\text{дон}} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_k}{X} \right| - 1 \right) \right] 100 \% ,$$

где X_k – конечное значение выбранного предела измерения;

c, d – постоянные числа.

Класс точности в этом случае обозначают числами C и d , разделенными косой чертой (C/d), например 0,05/0,01.

Методы поверки. Поверка аналоговых электроизмерительных приборов может производиться одним из следующих методов:

- сопоставления (сличения) показаний поверяемого и образцового приборов;
- сравнения показаний поверяемого прибора с мерой данной величины.

Выбор образцового СИ. Независимо от выбранного метода поверки соотношение пределов допускаемой абсолютной погрешности образцового и поверяемого СИ должно быть не более 1 : 3 (при поверке приборов классов точности от 0,05 до 0,5) и не более 1 : 4 (при поверке приборов классов точности от 1,0 до 5,0). В качестве образцовых можно использовать как аналоговые, так и цифровые СИ. Класс точности аналогового СИ при выборе в качестве образцового должен удовлетворять неравенству

$$K_o \leq a \cdot K_{II} \frac{X_{NI}}{X_{NO}},$$

где K_o, K_{II} – классы точности образцового и поверяемого приборов;

a – требуемое соотношение (1 : 3, 1 : 4);

X_{NI}, X_{NO} – нормирующее значение образцового и поверяемого приборов.

2.2 Программа работы

1 Для определения класса точности амперметра собрать схему, приведенную в описании на лабораторный стенд.

2 Выполнить необходимые действия при проведении исследований методов поверки амперметров.

3 Вычислить приведенную погрешность поверяемого амперметра.

4 Определить класс точности поверяемого амперметра и сравнить его с классом точности нанесенного на шкале поверяемого амперметра.

5 Для определения класса точности вольтметра собрать соответствующую схему, приведенную в описании на лабораторный стенд.

6 Выполнить необходимые действия при проведении исследований методов поверки вольтметров.

7 Вычислить приведенную погрешность поверяемого вольтметра.

8 Определить класс точности поверяемого амперметра и сравнить его с классом точности нанесенного на шкале поверяемого вольтметра.

Контрольные вопросы

1 Что такое класс точности измерительного прибора?

2 Какие варианты способа сличения показаний поверяемого и образцового приборов вам известны?

3 Какие операции выполняются при поверке электроизмерительных приборов?

4 Как выбирается при поверке образцовое средство измерения?

5 Как определяется вариация показаний аналоговых приборов?

6 Что такое нормирующее значение шкалы прибора и как оно определяется?

7 Возможно ли проведение поверки вольтметра класса 0,5 с помощью вольтметра класса 0,2?

3 Лабораторная работа № 3. Методы поверки аналоговых измерительных приборов. Поверка ваттметра

Цель работы: изучить основные метрологические характеристики приборов измерения мощности; изучить методы поверки измерительных средств, схему поверки ваттметра; определить класс точности поверяемого ваттметра; получить практические навыки поверки аналоговых электроизмерительных приборов.

3.1 Общие положения

Самый простой способ измерения мощности в цепях переменного и постоянного токов – это метод двух приборов с последующим расчетом. Погрешность измерения в данном случае состоит из погрешности вольтметра и амперметра и погрешности метода. Погрешность метода обусловлена потреблением мощности приборов и зависит от схемы их включения.

Для измерения мощности с помощью вольтметра и амперметра в цепях постоянного тока чаще всего используют приборы магнитоэлектрической системы, которые обеспечивают широкий диапазон измерения и сравнительно высокую точность. Для измерения мощности более удобно использовать прямой метод измерения мощности посредством ваттметра.

Ваттметр PW измеряет активную мощность. Активная мощность P измеряется в ваттах (Вт). Полная мощность определяется как произведение напряжения на ток, измеренные, соответственно, вольтметром и амперметром: $S = I \cdot U$. Полная мощность измеряется в вольтамперах (ВА). Реактивная мощность Q вычисляется по формуле

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} .$$

Для расширения диапазона измерения приборов в цепях переменного тока при измерении мощности включают трансформаторы тока и напряжения.

3.2 Программа работы

1 Для поверки ваттметра косвенным методом по результатам измерения тока и напряжения на активной нагрузке собрать соответствующую схему, приведенную в описании на лабораторный стенд.

2 Для расчета величины полной (в цепи переменного тока с активной нагрузкой полная мощность будет равна активной мощности) мощности использовать формулу

$$P = U \cdot I,$$

сравнив с расчетом по формуле

$$P = R \cdot I^2.$$

3 В качестве эталонного вольтметра и эталонного омметра, необходимого для измерения активного сопротивления нагрузки, использовать цифровые мультиметры, расположенные на стенде.

4 Рассчитать погрешность на оцифрованных делениях шкалы ваттметра. Сравнить с классом точности, указанным на шкале ваттметра.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое нормирующее значение шкалы прибора и как оно определяется?
- 2 Какие типы электромеханических приборов используются для прямого измерения мощности в электрической цепи?
- 3 В каких единицах измеряется мощность в цепи переменного тока?
- 4 Поясните принцип действия ферродинамического ваттметра.
- 5 Поясните принцип действия электродинамического ваттметра.

4 Лабораторная работа № 4. Измерение постоянных и переменных токов и напряжений аналоговыми и цифровыми приборами

Цель работы: получить практические навыки измерения постоянных и переменных токов и напряжений аналоговыми и цифровыми приборами, оценки методических погрешностей и правильного оформления результатов измерений.

4.1 Общие положения

Ток и напряжение – основные параметры, характеризующие режим электрической цепи. Диапазон значений тока и напряжения, измеряемых в современной практике, весьма широк: от 10^{-8} до 10^6 А и от 10^{-6} до 10^7 В; их частотный диапазон составляет от нуля до сотен мегагерц. Выбирая метод и средство измерения тока или напряжения, следует учитывать не только примерное значение амплитуды и частоты измеряемой величины, допустимую погрешность измерения, ожидаемые значения влияющих величин, но также и мощность цепи, в которой осуществляется измерение, т. к. включение амперметра или вольтметра в маломощную электрическую цепь может вызвать изменение измеряемой величины и возникновение методической погрешности. Амперметр при измерении тока включается так, чтобы через него протекал весь измеряемый ток. Он должен обладать возможно меньшим сопротивлением, т. к. ток I_x в цепи до включения амперметра $I_x = U / R$, а после его включения

$$I_x = \frac{U}{(R + R_A)}, \quad (4.1)$$

где U – напряжение цепи;

R – сопротивление цепи;

R_A – сопротивление амперметра.

Лишь при $R_A \ll R$ имеем $I_x \approx I_x$.

Измерение напряжения прямым методом производится вольтметром, который подключается параллельно к тому участку цепи, на котором необходимо измерить напряжение. Он должен обладать возможно большим сопротивлением. Это следует из того, что до включения вольтметра падение напряжения на R

$$U_x = \frac{U \cdot R}{(R + R_0)}, \quad (4.2)$$

где R_0 – сопротивление всей цепи без сопротивления.

После включения вольтметра получаем

$$U_x = U \cdot \frac{\frac{R \cdot R_V}{R + R_V}}{R_0 + \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}}. \quad (4.3)$$

Если $R_A \ll R$, то $U_x \approx U$.

Относительные значения методической погрешности при измерении тока и напряжения можно рассчитать по формулам

$$\delta_M(I) = \frac{I'_X - I_X}{I_X} = -\frac{R_A}{R + R_A}; \quad \delta_M(U) = \frac{U'_X - U_X}{U_X} = -\frac{\frac{R}{R_V}}{1 + \frac{R}{R_V} + \frac{R}{R_0}}.$$

4.2 Программа работы

1 Внимательно ознакомиться с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации аналоговых и цифровых амперметров и вольтметров (по заданию).

2 Выставить на выходных клеммах источника питания постоянное напряжение (по заданию) и измерить его значение аналоговыми и цифровыми вольтметрами. Сравнить показания приборов.

3 Используя более точный вольтметр в качестве образцового, определить величину систематической погрешности результата измерения напряжения другим вольтметром.

4 Выполнить гп. 2 и 3 для переменного напряжения

5 Исследовать амплитудно-частотную характеристику вольтметра (по заданию), подав на него сигнал (с выхода генератора синусоидальных колебаний) равной частоты (от $F_{\min} = 20$ Гц до $F_{\max} = 200$ кГц) и постоянной амплитуды.

6 Подключить к источнику постоянного напряжения резистор, чтобы ток в цепи был равным 5...10 мА. Измерить величину тока, протекающего через резистор, аналоговым и цифровым амперметрами. Сравнить показания приборов.

Контрольные вопросы

1 Как включается в электрическую цепь амперметр?

2 Как включается в электрическую цепь вольтметр?

3 Почему возникает методическая погрешность при измерении тока и напряжения прямым методом?

4 Почему различны показания двух приборов (амперметров или вольтметров) при измерении одного и того же значения тока или напряжения?

5 Как определяется амплитудно-частотная характеристика вольтметра (амперметра)?

6 Чем отличается диапазон измерений от диапазона показаний?

5 Лабораторная работа № 5. Методы и схемы расширения диапазона измерения электроизмерительных приборов

Цель работы: изучить методы расширения пределов измерения амперметров; изучить методы расчета сопротивления шунтов; изучить методы расширения пределов измерения вольтметров; изучить методы расчета сопротивления добавочных резисторов.

5.1 Общие положения

Расширение пределов измерения амперметра. Для расширения пределов измерения амперметров применяют особые вспомогательные устройства – шунты.

Шунт представляет собой резистор $R_{ш}$, который вместе с измерительным механизмом включается в измерительную цепь.

Это позволяет расширить пределы измерения измерительного механизма по току, т. е. измерять токи, значительно превосходящие ток, на который рассчитан измерительный механизм. Сопротивление шунта рассчитывается по формуле

$$R_{ш} = R_{им} / (n - 1), \quad (5.1)$$

где $R_{им}$ – сопротивление измерительного механизма.

Шунты изготавливаются из манганина и применяются почти исключительно с магнитоэлектрическими измерительными механизмами на постоянном токе. Применять шунты для электродинамической системы и других систем нецелесообразно, поскольку эти измерительные механизмы потребляют большую мощность, что приводит к необходимости иметь значительные $U_{ш}$, а следовательно, и $R_{ш}$, приводящие, в свою очередь, к увеличению габаритов и массы шунтов.

На токи до 30...50 А применяют внутренние шунты, помещаемые в корпусе прибора. На большие токи шунты делаются наружными – для исключения нагревания прибора выделяемой в шунте мощностью. Наружные шунты изготавливаются на токи до 10000 А и имеют массивные наконечники из красной меди для включения в цепь тока.

Расширение пределов измерения вольтметра. Резистор, включенный последовательно с измерительным механизмом, называется добавочным. Его основное назначение – преобразовать напряжение в ток.

Отсюда сопротивление резистора

$$R_{д} = R_{им} \cdot (n - 1), \quad (5.2)$$

где $R_{им}$ – сопротивление измерительного механизма.

Добавочные резисторы изготавливаются обычно из манганиновой проволоки, намотанной на каркас из изоляционного материала.

У вольтметров с верхним пределом измерения до 300 В добавочные резисторы встраивают внутри корпуса прибора. При устройстве вольтметров с пределом измерения свыше 300 В добавочные резисторы из-за их размеров и по условиям охлаждения устанавливают вне корпуса прибора.

В зависимости от точности подгонки добавочные резисторы подразделяются на следующие классы: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0.

5.2 Программа работы

1 Для выполнения работы по исследованию шунтов собрать соответствующую схему, приведенную в описании на лабораторный стенд.

2 Для расчета величины сопротивления шунта измерить омметром сопротивление рамки измерительного механизма.

3 Сделать необходимое для расчетов количество замеров.

4 По результатам исследований рассчитать сопротивление шунта по формуле (5.1).

5 Для выполнения работы по исследованию добавочных сопротивлений собрать соответствующую схему, приведенную в описании на лабораторный стенд.

6 Сделать необходимое для расчетов количество замеров.

7 Для расчета величины добавочного сопротивления измерить омметром сопротивление рамки измерительного механизма. По результатам исследований рассчитать добавочное сопротивление вольтметра по формуле (5.2).

Контрольные вопросы

1 Какой вид имеет схема включения наружных шунтов?

2 Определите сопротивление шунта для измерительного механизма с током полного отклонения 5 мА и $R_{им} = 3$ Ом, если нужно измерить ток 150 А.

3 Каким должно быть сопротивление шунта к миллиамперметру, рассчитанному на 75 мВ, с током полного отклонения 7,5 мА для измерения тока 7,5 А?

4 Какой ток можно измерить прибором, рассчитанным на 10 мА ($R_{им} = 10$ Ом), если его включить с шунтом, сопротивление которого $R_{ш} = 0,01$ Ом?

5 Какие вспомогательные элементы применяются для изменения пределов измерения магнитоэлектрических вольтметров?

6 Какого порядка должно быть сопротивление добавочного резистора к измерительному механизму с $R_o = 1$ Ом и падением напряжения на рамке $U_o = 10$ мВ для получения вольтметра с $U_n = 10$ В?

7 До какого значения напряжения будет расширен предел измерения вольтметра с сопротивлением рамки $R_o = 1$ Ом и падением напряжения на ней $U_o = 10$ мВ при включении добавочного резистора $R_d = 100$ кОм?

6 Лабораторная работа № 6. Исследование методов и средств измерения параметров цепей постоянного и переменного токов

Цель работы: изучить схемы определения сопротивлений по методу вольтметра и амперметра; оценить погрешность измерения при различных способах включения вольтметра и амперметра; изучить косвенный метод измерения индуктивности.

6.1 Общие положения

Измерение сопротивлений косвенным методом. Метод вольтметра и амперметра – косвенный способ определения различных сопротивлений, позволяющий ставить элемент с определенным сопротивлением в рабочие условия. Этот метод основан на использовании закона Ома для участка цепи, сопротивление R_x которого определяется по известному падению напряжения U_x на нем и току I_x :

$$R_x = U_x / I_x, \quad (6.1)$$

Существуют различные способы измерения падения напряжения U_x и тока I_x (рисунок 6.1).

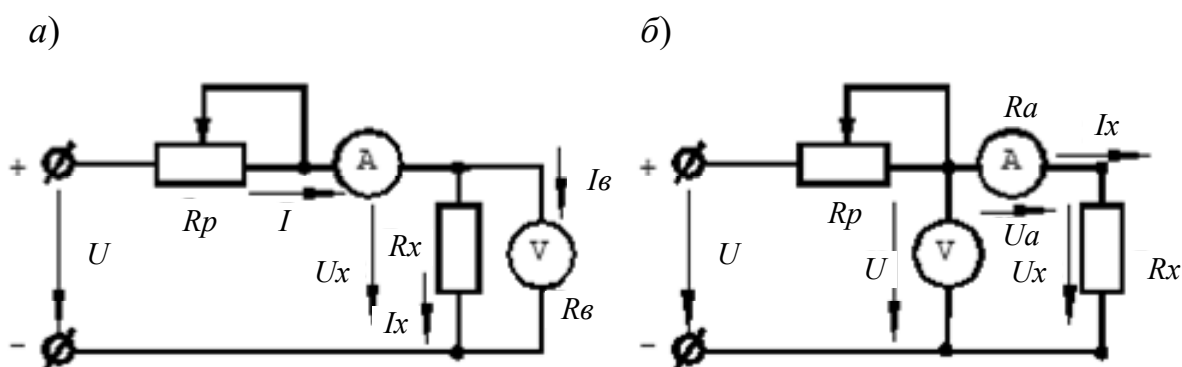


Рисунок 6.1 – Схемы для измерения сопротивлений косвенным методом

Измерительные части приведенных схем не обеспечивают одновременное измерение напряжения U_x и тока I_x . Так, первая схема (см. рисунок 6.1, б) позволяет измерить с помощью вольтметра напряжение U_x , а амперметр дает возможность определить ток I , равный сумме I_x и I_g , из которых последний является током обмотки вольтметра. В этом случае определяемое сопротивление

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I - I_g} = \frac{U_x}{I - \frac{U_x}{R_g}},$$

где R_g – сопротивление вольтметра.

Во второй схеме амперметр учитывает ток I_x , но вольтметр показывает напряжение U , равное сумме падений напряжений U_x на сопротивлении R_x и U_a на амперметре. Поэтому определяемое сопротивление

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_a}{I_x} = \frac{U}{I_x} - R_a,$$

где R_a – сопротивление амперметра.

Следовательно, если при расчете определяемого сопротивления учитывать сопротивления приборов, то все схемы равноценны.

Если определяемое сопротивление R_x мало по сравнению с сопротивлением вольтметра R_v , током I_v можно пренебречь и, применяя первую схему (см. рисунок 6.1, *a*), находить сопротивление R_x так:

$$R_x = \frac{U_x}{I}.$$

В этих случаях, когда определяемое сопротивление R_x сравнимо с сопротивлением вольтметра R_v и пренебречь током I_v нельзя, следует пользоваться второй схемой (см. рисунок 6.1, *б*) и при расчете не учитывать падение напряжения U_a на амперметре, определяя сопротивление R_x так:

$$R_x = R'_x = \frac{U_x}{I},$$

при относительной погрешности измерения

$$\gamma'_0 = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = \frac{R_a}{R_x + R_a} = \frac{R_x}{R_x}.$$

Для выявления пределов целесообразности использования той или другой схемы следует приравнять относительные погрешности, а затем найти значение сопротивления R_x , для которого обе схемы равноценны:

$$\frac{R_x}{R_x - R_a} = \frac{R_a}{R_x}$$

или

$$R_x^2 - R_a \cdot R_x - R_v \cdot R_a = 0.$$

Откуда

$$R_x \cong \sqrt{R_v \cdot R_a}.$$

Следовательно, для сопротивлений $R_x < \sqrt{R_g \cdot R_a}$ предпочтительна первая схема (см. рисунок 6.1, а), а для сопротивлений $R_x > \sqrt{R_g \cdot R_a}$ – вторая (см. рисунок 6.1, б). Первую называют схемой определения «малых» сопротивлений, а вторую – схемой для определения «больших» сопротивлений.

При определении сопротивлений методом вольтметра и амперметра следует выбирать магнитоэлектрические приборы с такими пределами измерений, чтобы показания их были близки к номинальным значениям, т. к. это обеспечивает меньшие погрешности измерения.

Измерение индуктивности косвенным методом. Как и при измерении сопротивления постоянному току, для измерения индуктивности применим метод амперметра и вольтметра. Необходимо лишь иметь в виду, что в данном случае определение погрешностей измерения Z_x (полного сопротивления катушки индуктивности), обусловленных сопротивлением приборов, затруднительно, т. к. погрешности зависят не только от значения Z_x , но и от составляющих полного сопротивления измерительных приборов.

В связи с этим применяется метод трех приборов – амперметра, вольтметра и ваттметра. Для больших сопротивлений используется схема, показанная на рисунке 6.2, а, а для малых – на рисунке 6.2, б.

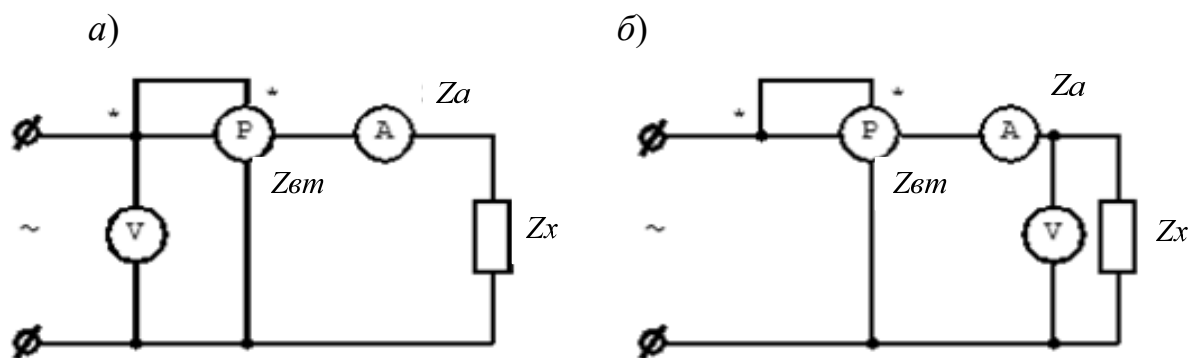


Рисунок 6.2 – Схема для косвенных измерений сопротивления

В первом случае значение полного сопротивления, определенное по показаниям вольтметра и амперметра как

$$Z'_x = \frac{U}{I},$$

будет больше действительного Z_x на величину геометрической суммы сопротивлений амперметра и последовательной обмотки ваттметра.

По показаниям приборов в схеме (см. рисунок 6.1, а) можно определить активное сопротивление

$$R'_x = \frac{P}{I^2} = R_x + R_a + R_{em},$$

7 Определить значение индуктивности катушки без учета R_a , R_{em} , X_a , X_{em} по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра:

$$R_x = \frac{P}{I^2}; \quad X_x = \sqrt{Z_x^2 + R_x^2}; \quad L = X_x / (2 \cdot \pi \cdot f).$$

8 Определить абсолютную Δ и относительную δ погрешности.

Контрольные вопросы

- 1 Что понимают под измерением сопротивления?
- 2 Почему при определении сопротивления по методу амперметра и вольтметра следует применять различные схемы включения измерительных приборов?
- 3 Какие сопротивления при определении по методу вольтметра и амперметра принято считать «большими» и какие «малыми»?
- 4 В чем суть косвенного метода измерения?
- 5 Зависит ли схема включения А, V, P от значения неизвестного сопротивления катушки индуктивности?

7 Лабораторная работа № 7. Методы и схемы измерения параметров периодических и импульсных сигналов

Цель работы: изучить методы измерения параметров периодических и импульсных сигналов; изучить методы измерения параметров периодических и импульсных сигналов; получить навыки работы с электроизмерительными приборами.

7.1 Общие положения

Для детерминированных сигналов характерна привязка ко времени и взаимному положению. Условно их можно отнести к импульсным и синусоидальным. Все эти сигналы характеризуются рядом параметров: частотой, амплитудой, фазой, длительностью импульсов.

Синусоидальные сигналы описываются следующим образом:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где A – определяет амплитуду сигнала и может быть как положительной, так и отрицательной величиной;

ω – является круговой частотой;

φ – характеризует фазовый сдвиг относительно момента начала измерения, он может быть как положительным, так и отрицательным.

Графически эти параметры можно изобразить следующим образом (рисунок 7.1).

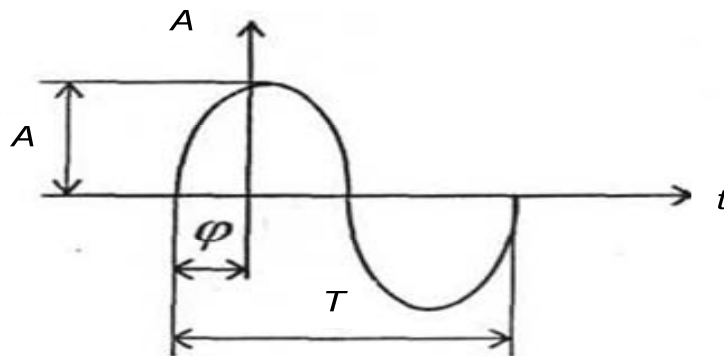


Рисунок 7.1 – Основные параметры синусоидального сигнала

Для двух сигналов, имеющих одинаковые частоты, существует сдвиг фаз

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1);$$

$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2);$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Графически он отобразится следующим образом (рисунок 7.2).

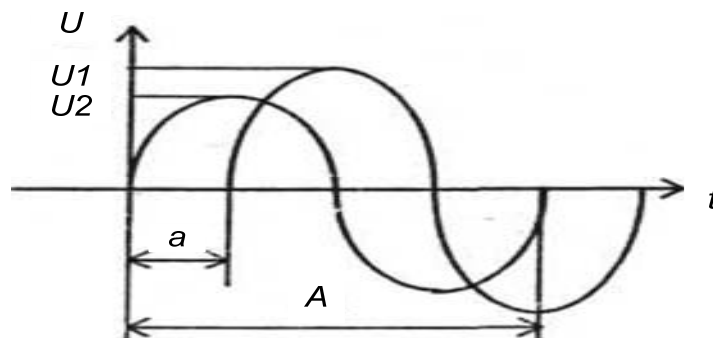


Рисунок 7.2 – Сдвиг фаз двух синусоидальных сигналов

Синусоидальные сигналы могут модулироваться.

Модуляция – это преобразование сигнала в другой сигнал путем изменения других параметров несущего сигнала согласно преобразующему (модулирующему) сигналу.

В синусоидальном сигнале имеются три параметра: амплитуда, частота, фаза.

Импульсные сигналы, как и синусоидальные, характеризуются своей частотой и периодом. Но в отличие от синусоидальных сигналов они имеют ряд специфических параметров.

Длительность импульсов τ_u – интервал от момента появления до момента исчезновения импульса.

Сквозность импульсов σ – отношение периода импульсов к длительности импульса (рисунок 7.3).

Величина, обратная сквозности, называется коэффициентом заполнения:

$$K = \frac{\tau_u}{T}$$

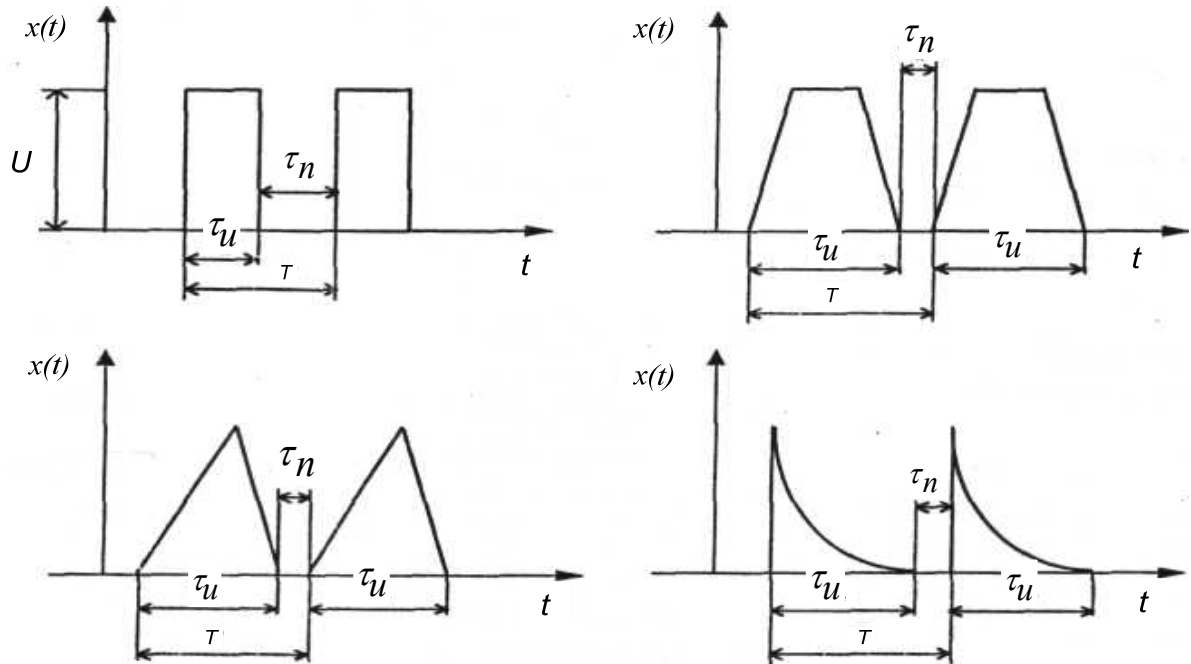


Рисунок 7.3 – Общий вид некоторых импульсных сигналов

Полярность импульсов – положительная или отрицательная.

Для измерения длительности импульса в таких случаях необходимо масштабирование его длительности и значение его временного положения плавной задержкой относительно реального времени появления.

Основные характеристики импульса (рисунок 7.4):

- длительность переднего фронта Δt_1 ;
- длительность заднего фронта Δt_2 ;
- величина выброса;
- величина спада;
- величина нижнего выброса.

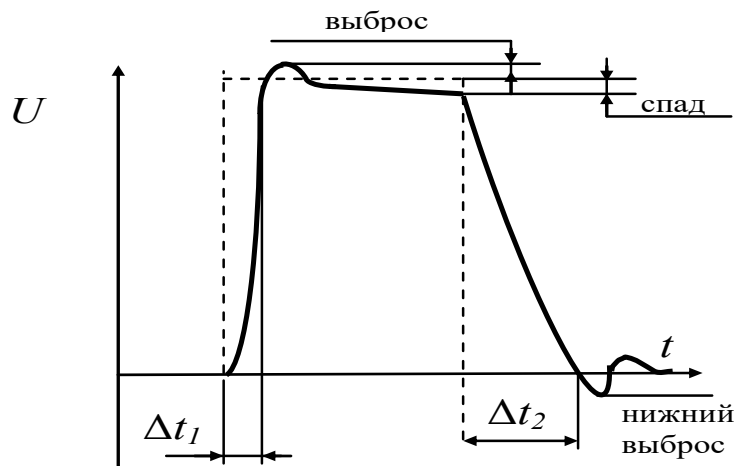


Рисунок 7.4 – Параметры одиночного прямоугольного импульса

Амплитудная модуляция – изменение амплитуды несущего сигнала согласно модулирующего.

Частотная модуляция – изменение несущей частоты согласно модулирующего сигнала.

Фазовая модуляция – изменение фазы несущей частоты согласно модулирующего сигнала.

При амплитудной модуляции полезный сигнал преобразуется в изменение амплитуды несущего сигнала. Результирующий сигнал записывается выражением

$$U(t) = U_m (1 + m \cdot \sin \Omega t) \sin \omega t ,$$

где ω – несущая частота;

Ω – моделирующая частота;

m – глубина модуляции, $m = \frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} 100 \%$.

Коэффициент амплитудной модуляции является основным параметром моделируемого сигнала. Он может изменяться посредством осциллографа или с помощью стрелочных или цифровых модуляторов.

Общий вид амплитудно-модулированного сигнала приведен на рисунке 7.5.

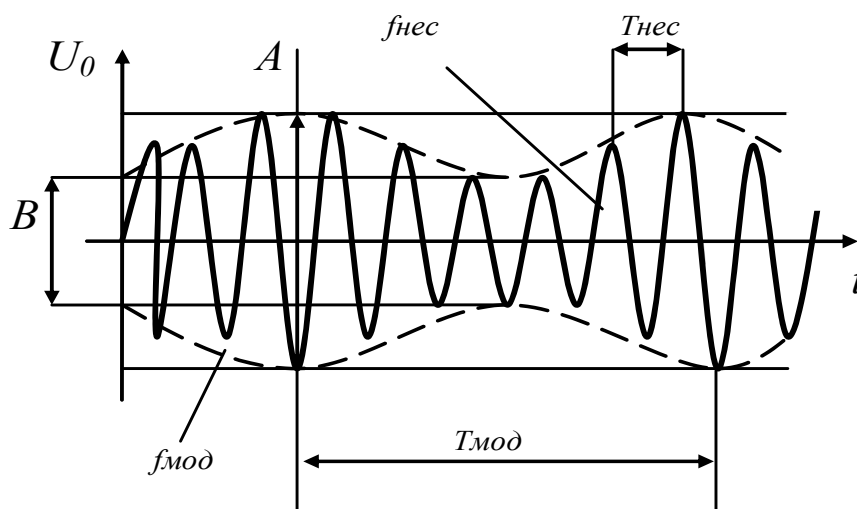


Рисунок 7.5 – Общий вид амплитудно-модулируемого сигнала

Для измерения коэффициента m также используют и цифровые измерители модуляции.

Длительность импульсов измеряется методом сравнения с периодами колебаний известной частоты. Он может осуществляться с помощью электронного осциллографа или цифрового частотомера. При измерениях по осциллограмме определяется длина отрезка от переднего и заднего фронта и производится оценка масштаба деления шкалы. В результате умножения получается длительность импульса.

В случае большой скважности импульса $\sigma > 10$ весь период последовательности не уменьшается на экране осциллографа.

5.2 Программа работы

- 1 Ознакомиться с приборами на лабораторной установке.
- 2 Изучить необходимые разделы инструкции по эксплуатации приборов.
- 3 Подготовить к работе измерительную аппаратуру.
- 4 Измерить характеристики различных периодических сигналов: синусоидального, трапециевидных, треугольных (частоту, период, амплитудное значение, среднеквадратичное значение).
- 5 Частоту сигналов измерить посредством осциллографа и частотомера. Сравнить показания и определить погрешность измерения.
- 6 Измерить сдвиг фаз двух синусоидальных сигналов (по заданию преподавателя) посредством осциллографа и частотомера.
- 7 Измерить длительность импульсов с помощью осциллографа и частотомера (длительности и частоты задаются преподавателем).
- 8 Измерить характеристики импульсного сигнала посредством осциллографа.
- 9 Провести измерение амплитудно-модулированных и частотно-модулированных сигналов посредством осциллографа и модулеметра.
- 10 Оценить точность проведенных измерений.

Контрольные вопросы

- 1 Какие методы измерения частоты вы знаете?
- 2 Какие приборы используются для измерения частоты промышленной сети переменного тока? Какие принципы работы заложены в их основе?
- 3 Какие приборы позволяют измерять частоты свыше 10 МГц?
- 4 Что такое сдвиг фаз сигналов и чем он отличается от временного сдвига импульсов?
- 5 Какие методы используются для определения сдвига фаз сигналов ?
- 6 Какие приборы позволяют его определить?
- 7 Что такое длительность, скважность и коэффициент заполнения импульсов?
- 8 Какими методами измеряют длительность импульсов?
- 9 Каким образом можно определить длительность импульсов при скважности $\sigma = 100$? Есть ли особенности при измерении различными приборами?
- 10 Что такое модуляция? Какие виды модуляции вы знаете?
- 11 Что такое коэффициент амплитудной модуляции?
- 12 Как измерить коэффициент амплитудной модуляции?
- 13 Какие основные параметры импульсных сигналов?

8 Лабораторная работа № 8. Схемы и методы измерения температуры

Цель работы: изучить методы, первичные преобразователи и схемы измерения температуры; провести исследование первичных преобразователей температуры.

8.1 Общие положения

Общие сведения о термопреобразователях. Все приборы и методы, в зависимости от значений измеряемых температур, делятся на две группы. Первая группа охватывает методы и приборы для измерения в области средних и низких температур. Она характеризуется применением контактных методов измерения и относительно узким рабочим диапазоном приборов. Вторая группа включает методы, в которых используется энергия излучения нагретого объекта без непосредственного контакта с ним преобразователя. Эти методы применяются для измерения как высоких, так и низких температур.

Наиболее разработанными и широко применяемыми в промышленности в области низких и средних температур являются методы измерения, использующие термопары и терморезисторы.

Электрические термометры сопротивления. Электрические термометры сопротивления, состоящие из преобразователя и измерительного устройства, применяются для измерения температур от минус 200 °С до плюс 1500 °С.

Термоэлектрические термометры. Для измерения температур от 650 °С до 2800 °С используются в основном термоэлектрические термометры.

Сопротивление проводов изменяется при колебаниях температуры воздуха. Для уменьшения влияния изменения сопротивления термопары и проводов целесообразно применять милливольтметры с большим внутренним сопротивлением.

Для бесконтактных измерений температуры используются приборы, называемые пирометрами. По принципу действия они делятся на радиационные, яркостные, цветовые.

8.2 Программа работы

1 Исследовать работу термопары. Собрать схему подключения термопары и согласующих цепей в соответствии с описанием лабораторного стенда.

2 Снять статическую характеристику термопары, нагревая объект до 100 °С.

3 Снять статическую характеристику термопары, остужая объект до температуры в лаборатории.

4 Исследовать работу медного термометра сопротивления.

5 Снять статическую характеристику термометра сопротивления, нагревая объект до 100 °С.

6 Снять статическую характеристику термометра сопротивления, остужая объект до температуры в лаборатории.

7 Исследовать работу полупроводникового терморезистора КМТ-1.

8 Снять статическую характеристику полупроводникового терморезистора, нагревая объект до 100 °С.

9 Снять статическую характеристику полупроводникового терморезистора, остужая объект до температуры в лаборатории.

10 Графически построить статические характеристики исследованных термопреобразователей.

11 Рассчитать чувствительность исследованных термопреобразователей.

12 Установить нелинейность статических характеристик и рабочий диапазон термопреобразователя по заданной погрешности.

13 Оформить отчет о проведенных исследованиях.

Контрольные вопросы

1 В каком диапазоне можно измерять температуру с помощью термосопротивления? Термопар?

2 Какие достоинства и недостатки металлических термометров сопротивления?

3 Какие достоинства и недостатки полупроводниковых термометров сопротивления?

4 Назовите устройства, относящиеся к контактным методам измерения температуры.

5 Зачем в неравновесном мосте пятое плечо выполняется частично из марганца, а частично из меди?

6 По какому принципу работают пирометры?

7 Какие типы пирометров существуют?

9 Лабораторная работа № 9. Исследование емкостных преобразователей

Цель работы: изучить конструкцию емкостных преобразователей; изучить конструкцию емкостных преобразователей; изучить конструкцию емкостных преобразователей; провести исследование преобразователей, снять их статические характеристики.

9.1 Общие положения

Ёмкостные преобразователи. Ёмкостными называются преобразователи, в которых под воздействием механической величины изменяется емкость. Наиболее часто используют плоские и цилиндрические конденсаторы. Емкость плоского конденсатора (преобразователя) определяется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta}, \quad (9.1)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;
 ϵ – относительная диэлектрическая постоянная;
 S – площадь пластины плоского конденсатора;
 δ – расстояние между пластинами.

Наиболее часто изменяют площади пластин и диэлектрическую постоянную.

Исходя из выражения (9.1) емкость может изменяться в зависимости от изменения трех составляющих: δ , ϵ , S . В связи с этим преобразователи делятся на преобразователи с изменяющимся зазором, преобразователи с изменяемой площадью и преобразователи с изменяющейся диэлектрической постоянной.

При включении в цепь емкостного преобразователя изменение емкости преобразуется в изменение напряжения или тока либо в частоту синусоидального или импульсного сигнала. При этом могут быть использованы резонансная, мостовая, емкостно-диодная цепи.

Функциональная зависимость преобразователей не линейна, погрешность составляет 1 %...3 %. Емкостные преобразователи используются для измерения перемещений, давления, уровня, вибраций и др.

8.2 Программа работы

- 1 Исследовать работу емкостного преобразователя угла поворота.
- 2 Снять статическую характеристику преобразователя, при помощи рукоятки изменяя угол от 0° до 180° .
- 3 Исследовать работу емкостного преобразователя уровня.
- 4 Снять статическую характеристику преобразователя, изменяя уровень жидкости или сыпучего вещества по заданию преподавателя.
- 5 Определить нелинейность и чувствительность преобразователей.
- 6 Оформить отчет о проделанной работе. Отчет должен содержать наименование работы, цель работы, схемы включения преобразователей, результаты исследований, графики и краткие теоретические выкладки по полученным результатам исследований.

Контрольные вопросы

- 1 Объясните принцип действия и устройство емкостных преобразователей.
- 2 Каким образом подключаются емкостные преобразователи?
- 3 От чего зависит чувствительность и погрешность емкостных преобразователей?
- 4 На каком принципе должен работать емкостный преобразователь для измерения толщины полимерных материалов?

10 Лабораторная работа № 10. Исследование резистивных преобразователей

Цель работы: изучить конструкцию резистивных преобразователей; ознакомиться с методами включения преобразователей, изучить их достоинства и недостатки; провести исследование преобразователей, снять их статические характеристики.

10.1 Общие положения

Резистивные преобразователи. Резистивными называются преобразователи, которые преобразуют механическое перемещение в электрическое сопротивление.

Реостатными называются преобразователи, выполненные в виде реостата, движок которого перемещается под действием механической величины. В зависимости от конструктивного исполнения реостатные преобразователи делятся на линейные, вращательные и функциональные.

Сопротивление преобразователя можно подсчитать по следующей формуле:

$$R_{\Pi} = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление материала, из которого изготовлена обмотка преобразователя, Ом·м;

l – длина проволоки преобразователя, м;

S – площадь сечения проволоки, м².

Реостатные преобразователи конструктивно выполняют проволочными и не проволочными. В проволочных преобразователях, выполненных намоткой проволоки, имеющей высокое удельное сопротивление на каркас, существует погрешность квантования.

Число витков обычно составляет 100...200, а в прецизионных – тысячи.

Суммарная погрешность составляет 0,05 %...0,1 %. Внешние условия эксплуатации также оказывают влияние на погрешность преобразователей.

Резистивные преобразователи могут быть включены в цепь следующим образом: в цепь с последовательным включением, в цепь с параллельным включением (реостатная), в мостовую схему.

10.2 Программа работы

1 Собрать схему исследования резистивного преобразователя с последовательной схемой включения.

2 Снять и построить статическую характеристику преобразователя, перемещая рукоятку от 0 до 100 мм.

3 Определить нелинейность преобразователя и чувствительность.

4 Исследовать работу резистивного преобразователя с реостатной схемой

включения.

5 Снять и построить статическую характеристику преобразователя, перемещая рукоятку от 0 до 100 мм.

6 Определить нелинейность преобразователя и чувствительность с реостатной схемой включения.

Контрольные вопросы

1 Каков принцип действия резистивных преобразователей?

2 Объясните схемы включения резистивных преобразователей.

3 Являются ли резистивные преобразователи аналоговыми?

4 От чего зависит погрешность и чувствительность резистивных преобразователей?

5 Как построить резистивный преобразователь с функциональной зависимостью?

11 Лабораторная работа № 11. Исследование индуктивных преобразователей

Цель работы: изучить принцип действия и конструктивные особенности индуктивных преобразователей; провести исследование индуктивных преобразователей; изучить схемы подключения, снять статические характеристики при различных схемах подключения.

11.1 Общие положения

Электромагнитными называются преобразователи, принцип действия которых основан на изменении параметров электромагнитной цепи под воздействием физической величины.

К параметрическим индуктивным преобразователям относятся и индуктивные, и взаимоиндуктивные (трансформаторные).

В индуктивных преобразователях используется зависимость индуктивности катушки от параметров магнитной цепи, индуктивность обмотки, расположенной на магнитопроводе.

Если пренебречь потерями в сердечнике и его сопротивлением, то получим индуктивность катушки

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \omega^2 \cdot S_\delta}{Z_M},$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

ω – число витков;

S_δ – площадь поперечного сечения зазора;

δ – длина магнитного зазора;

Z_M – магнитное сопротивление.

Таким образом, индуктивность преобразователя зависит от длины воздушного зазора площади поперечного сечения воздушного зазора.

Лучшими параметрами обладают взаимноиндуктивные преобразователи, в которых цепи питания и измерения разделены.

Якорь в магнитном поле притягивается сердечником, что нежелательно при измерениях.

Еще один тип индуктивных преобразователей, часто используемых в практике, – преобразователи с подвижным сердечником и разомкнутой магнитной цепью (по подобию соленоида). Перемещение сердечника в них вызывает изменение индуктивности или взаимоиндуктивности.

Чувствительность преобразователя зависит в основном от конструктивных параметров: диаметра используемой проволоки, удельного сопротивления материала проволоки, геометрических параметров каркаса.

На погрешность индуктивных преобразователей влияют следующие факторы: температура – изменение активной составляющей обмотки; напряжения питания – изменение магнитной проницаемости магнитопровода; частота – изменение реактивной составляющей сопротивления. Погрешность индуктивных преобразователей составляет 1,5 %...2,0 %.

Индуктивные преобразователи используются для измерения перемещений (от единиц микрон до 100 мм), параметров вибраций, давления, скорости перемещения, расхода и других физических величин, которые можно связать с перемещением.

11.2 Программа работы

1 Составить схему для исследования взаимноиндуктивного преобразователя, руководствуясь описанием лабораторного стенда.

2 Снять статические характеристики преобразователя, перемещая рукоятку от 0 до 100 мм, для различных частот питающего напряжения ($F = 100$ Гц; $F = 500$ Гц; $F = 1000$ Гц; $F = 2000$ Гц; $F = 5000$ Гц).

3 Построить статические характеристики для каждой из частот.

4 Определить нелинейность и чувствительность индуктивного преобразователя для каждой из частот питающего напряжения.

5 Построить зависимость чувствительности преобразователя от частоты $S = F(f)$.

Контрольные вопросы

1 Какие разновидности индуктивных преобразователей вы знаете?

2 Опишите принцип действия и конструкцию индуктивных преобразователей.

3 От чего зависит погрешность индуктивных преобразователей?

4 В какие электрические цепи включаются индуктивные преобразователи?

5 От чего зависит чувствительность индуктивных преобразователей?

6 От чего зависит чувствительность индукционных преобразователей?

7 Для каких физических величин используются индуктивные преобразователи?

8 Для каких физических величин используются индукционные преобразователи?

12 Лабораторная работа № 12. Исследование преобразователей магнитных величин

Цель работы: изучить методы измерения и принцип действия приборов для измерения переменных магнитных полей; приобрести навыки практической работы с приборами для измерения переменных магнитных полей.

12.1 Общие положения

Существуют следующие типы первичных преобразователей магнитных величин.

Индукционные. Принцип действия данных преобразователей основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в катушке датчика наводится ЭДС пропорционально, скорости изменения магнитного потока:

$$e = -\omega \cdot d\Phi/dt,$$

где ω – число витков катушки;

$d\Phi/dt$ – скорость изменения магнитного потока.

Если величина не изменяется во времени, то необходимо создать кажущееся изменения поля приведением катушки в движение – однократное или периодическое (например, во вращение).

Гальваномагнитные преобразователи. Основаны на физических эффектах, возникающих в находящихся в магнитном поле твердых телах при движении в них заряженных частиц. В качестве измерительных преобразователей практическое применение получили главным образом полупроводниковые гальваномагнитные преобразователи, основанные на использовании эффектов Холла и Гаусса.

Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов (ЭДС Холла) на боковых гранях пластины.

Преобразователь Холла представляет собой четырехполюсник, обычно выполняемый в виде тонкой пластины или пленки из полупроводникового материала. Токовые электроды выполняются по всей ширине поперечных граней, что обеспечивает равномерное распределение входного тока по сечению преобразователя. Потенциальные (Холловые) электроды расположены в центральной части продольных граней.

В магнитном поле носители заряда под действием сил Лоренца $F = e\upsilon B$ изменяют свою траекторию вследствие чего на одной из боковых граней концентрация зарядов одного знака увеличивается, в то время как на противополож-

ной грани уменьшается. Возникающая при этом разность потенциалов (ЭДС Холла) определяется выражением

$$E = C \frac{I \cdot B}{h} E,$$

где E – ЭДС Холла;

I – сила тока;

B – магнитная индукция (вектор ее должен быть перпендикулярен плоскости пластинки либо будет измерена лишь нормальная составляющая вектора B);

C – постоянная Холла;

h – толщина пластинки.

Кристаллические преобразователи Холла выполняются в виде тонких пластинок ($d = 0,01 \dots 0,2$ мм), которые вырезают из монокристаллов и шлифовкой доводят до необходимой толщины. Выводы укрепляются на боковых гранях путем пайки или сварки. Пластины наклеиваются на подложки из радиотехнической слюды, ультрафорфора или ситалла.

Магниторезистивные преобразователи. Под воздействием магнитного поля изменяется его электрическое сопротивление вследствие изменения подвижности носителей зарядов и их средней концентрации. Магниторезистивный эффект можно наблюдать в чистых металлах, полупроводниках, а также в электролитах.

К магниторезистивным преобразователям относятся магниторезисторы, магнитодиоды, биполярные магнитотранзисторы, гальваномагниторекомбинационные преобразователи и полевые магнитотриоды. В настоящее время для создания средств измерений практическое применение нашли магниторезисторы и гальваномагниторекомбинационные преобразователи. Остальные типы магниторезистивных преобразователей, за исключением магнитодиодов, находятся еще в стадии развития. Магнитодиоды применяются главным образом в качестве бесконтактных переменных резисторов.

12.2 Программа работы

- 1 Ознакомиться с методами и приборами для измерения магнитных величин.
- 2 Собрать схему для тарирования измерительной катушки (рисунок 12.1).
- 3 Подключить автотрансформатор к соленоиду, а измерительную катушку к цифровому милливольтметру.
- 4 Вставить в соленоид датчик измерителя магнитных параметров ИМП-1 и измерительную катушку согласно рисунку 12.2.
- 5 Снять показания ИМА-400Ц и милливольтметра при следующих значениях напряжения на соленоиде: 2, 5, 10, 15, 20, 25 В.
- 6 Показания занести в таблицу и построить градуировочную характеристику преобразователя (зависимость напряжения на катушке от индукции магнитного поля $U = f(B)$) измерительной катушки.
- 7 Исследовать объект контроля посредством измерительной катушки

(см. рисунок 12.2).

8 Построить на графике распределение магнитной индукции поля вдоль объекта контроля, измеряя ее в пяти точках вдоль образующей объекта и в поперечном сечении согласно рисунку 12.2.

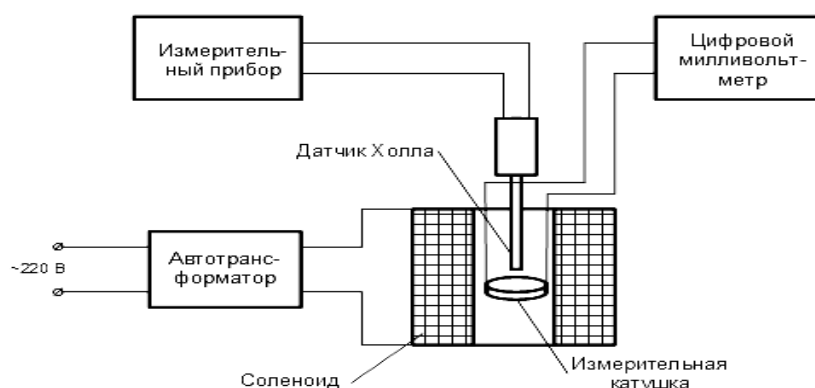


Рисунок 12.1 – Схема установки для тарировки измерительной катушки

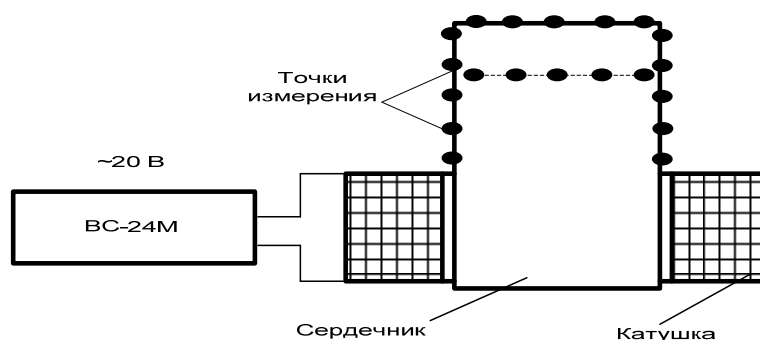


Рисунок 12.2 – Схема измерения магнитной индукции на объекте контроля

Контрольные вопросы

- 1 Какие преобразователи используются для измерения параметров переменных и постоянных магнитных полей?
- 2 Что такое тарировочная характеристика?
- 3 Поясните сущность эффекта Холла.
- 4 Поясните сущность магнетронного эффекта.
- 5 Перечислите основные характеристики преобразователей Холла.
- 6 Как посредством измерительной катушки измерить параметры постоянного магнитного поля?
- 7 Поясните сущность эффекта Гаусса.

13 Лабораторная работа № 13. Обработка результатов прямых измерений

Цель работы: приобрести навыки применения полученных знаний на практике при обработке результатов многократных прямых измерений.

13.1 Общие положения

При статистической обработке группы результатов наблюдений необходимо выполнить следующие операции [1].

1 Исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений.

2 Вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения \tilde{A} .

3 Вычислить оценку среднего квадратического отклонения (СКО) результата наблюдения.

4 Оценить среднее квадратическое отклонение $\sigma(\tilde{A})$ результата измерения.

5 Проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению (приложение А). Проверку этой гипотезы проводить с уровнем значимости q от 10 % до 2 %. Конкретные значения уровней значимости должны быть указаны в методике выполнения измерений.

При $n > 50$ для проверки принадлежности результатов наблюдений к нормальному распределению предпочтительным является один из критериев: Пирсона χ^2 или Мизеса – Смирнова ω^2 . Если $15 < n < 50$, то предпочтителен составной критерий (см. приложение А). При $n \leq 50$ принадлежность результатов наблюдений к нормальному распределению не проверяют. При этом нахождение доверительных границ случайной погрешности по методике, предусмотренной ГОСТ 8.207–76, возможно в том случае, если заранее известно, что результаты наблюдения принадлежат нормальному распределению.

6 Если результаты наблюдений удовлетворяют нормальному закону распределения, то грубые погрешности исключить в соответствии со стандартом. Так, при известном среднеквадратическом отклонении σ_n критерием аномальности служит соотношение между $t_n = \frac{|\tilde{A} - x_1|}{\sigma_n}$ или $t_n = \frac{|x_n - \tilde{A}|}{\sigma_n}$ и значением β ,

которое для данного n и принятой вероятности (уровня значимости) $\alpha = 1 - P(t_n \geq \beta)$ берут из таблицы Б.2. Если $t_n \geq \beta$, то результат x_1 (или x_n) аномальный. При неизвестном σ_n критерием аномальности служит соотношение между $U_n = \frac{|\tilde{A} - x_1|}{S(x)}$ или $U_n = \frac{|x_n - \tilde{A}|}{S(x)}$ и значением β , которое для данного n

и принятой вероятности $\alpha = 1 - P(U_n \geq \beta)$ берут из таблицы Б.2. Если $U_n \geq \beta$, то результат x_1 (или x_n) отбрасывается как аномальный. В этом случае заново вычисляют результат измерения и оценку СКО результата измерения.

7 Определить доверительные границы ε (без учета знака) случайной по-

7 Определить доверительные границы ε (без учета знака) случайной по-

грешности результата измерения используя, коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности P , числа результатов наблюдений n находят по таблице Б.1.

Доверительную вероятность P принимают равной 0,95. Допускается указывать границы для доверительной вероятности $P = 0,99$. В особых случаях, например при измерениях, результаты которых имеют значение для здоровья людей, допускается вместо $P = 0,99$ принимать более высокую доверительную вероятность.

8 Вычислить границы неисключенной систематической погрешности (неисключенных остатков систематической погрешности) результата измерения (НСП).

9 Вычислить доверительные границы погрешности результата измерения.

10 Форма записи результатов измерений.

Оформление результатов измерений производят по ГОСТ 8.011–72.

При симметричной доверительной погрешности результаты измерений представляют в следующей форме:

$$\tilde{A} \pm \Delta, P, n, \quad (13.1)$$

где \tilde{A} – результат измерения.

Числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и погрешности Δ .

При отсутствии данных о виде функций распределений составляющих погрешности результата и необходимости дальнейшей обработки результатов или анализа погрешностей результаты измерений представить в форме $\tilde{A}; S(\tilde{A}), n; \Theta$.

11 Правила округления.

Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами (все цифры, стоящие справа после нулей), если первая из них равна 1 или 2, и одной, если первая есть 3 и более. Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные расчеты выполняются не менее чем с одним-двумя лишними знаками.

13.2 Программа работы

Студент должен выполнить тот вариант задачи, порядковый номер которого совпадает с его номером в журнале группы студентов.

Необходимо произвести оценку результата измерения постоянного тока по результатам 25 наблюдений с помощью амперметра, имеющего предел основной приведенной погрешности γ . Неисключенные систематические погрешности измерительного прибора определяются пределом допускаемой абсолютной погрешности. Задачу решить для заранее выбранного уровня значимости $q_1 / 2 = 5\%$, $q_2 = 5\%$. Статистическую обработку результатов наблюдений выполнить для доверительной вероятности P . Исходные данные по заданию.

Пример выполнения задания приведен в приложении А.

Задания для выполнения работы приведены в таблице 13.1.

Таблица 13.1 – Исходные данные величин для выполнения работы

Порядковый номер	Результат наблюдений, I A									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,4	5,9	5,8	5,9	5,6	5,1	4,8	4,3	5,1	5,3
2	5,4	4,8	4,9	3,3	4,8	5,4	4,2	5,2	5,8	4,7
3	31,5	30,7	29,9	31,8	32	31,7	30,9	23,5	31,9	30,6
4	7,9	7,1	7,3	7,5	7,6	7,2	7,4	7,1	6,1	6,9
5	32,2	28,5	29,8	31,4	30,9	30	30,2	32,2	32,3	33,3
6	5,2	5,7	5,5	5,2	6,7	7,8	5,5	5,6	6,0	5,1
7	10,3	10,4	9,4	9,6	9,3	8,9	8,7	9,6	9,3	11,0
8	1,63	1,75	0,90	1,74	1,60	1,54	1,57	1,59	1,79	1,59
9	7,5	6,4	7,3	7,1	6,0	6,8	7,5	7,5	7,7	7,0
10	44,3	44,4	43,2	44,1	45	45,2	44,7	44,9	44,1	44,2

Продолжение таблицы 13.1

Порядковый номер	Результат наблюдений, I A							P	γ	X_N
	11	12	13	14	15	16	17			
1	5,4	5,6	5,0	5,3	5,1	5,6	5,6	0,99	1,5	10
2	5,4	4,7	4,8	5,2	5,1	4,4	5,2	0,95	2	10
3	29,5	31,9	30,5	29,6	31,5	30,4	31,3	0,95	2	50
4	7	7,2	7,2	7,1	7	6,9	7,4	0,99	2	10
5	30,7	33,2	26,6	29,4	31,2	28,2	32,1	0,95	2	50
6	6,7	6,1	6,9	7,3	6,2	7,8	6,2	0,99	1,5	10
7	9,1	11,1	6	8,1	8,6	7,2	10,2	0,95	1	10
8	1,22	1,76	1,69	1,61	1,24	0,75	1,67	0,95	2,5	2
9	7,8	5,7	6,6	7,2	6,3	7,5	7,2	0,99	1	10
10	44,4	44,7	45,1	44,9	44,2	44,3	44,6	0,95	2	100

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные этапы обработки результатов прямых измерений.
- 2 Как правильно представлять результаты обработки измерений?
- 3 Дайте определение понятию «среднее значение».
- 4 Дайте определение понятию «дисперсия».
- 5 Дайте определение понятию «среднеквадратичное отклонение».
- 6 Чем отличаются между собой среднеквадратичная величина результата наблюдения от среднеквадратичного отклонения результата измерения?

14 Лабораторная работа № 14. Обработка результатов косвенных измерений

Цель работы: приобрести навыки применения полученных знаний на практике при обработке результатов многократных косвенных измерений.

14.1 Основные теоретические положения

Пусть x_1, x_2, \dots, x_n – величины, измеренные прямыми методами. Тогда если измеряемая величина X является функцией от x_1, x_2, \dots, x_n , $X = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, то измерение считают косвенным. Погрешность определения величины X зависит не только от погрешности измерения величин x_n , но и от вида функциональной зависимости F .

Рассмотрим пример вычисления погрешности при косвенных измерениях, два случая косвенных измерений, отличающихся подходами при оценке их погрешности.

Случай 1. Измеряемые аргументы невязаносвязаны. Оценку действительного значения измеряемой величины \bar{X} производят по формуле

$$\tilde{Q} = \bar{X} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n),$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – среднее значение аргументов, получаемое по результатам прямых измерений.

Оценку абсолютной погрешности косвенного измерения производят по формуле

$$\tilde{\Delta} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_i} \cdot \Delta x_i.$$

Составляющую погрешности Δx_i вычисляют по формуле

$$\Delta_i(x_i) = \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_i} \cdot \Delta x_i.$$

Оценку среднего квадратического отклонения составляющих результирующей погрешности определяют из соотношения

$$S_i(\bar{X}) = \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_i} \cdot S(\bar{x}_i),$$

где $S(\bar{x}_i)$ – оценки среднего квадратического отклонения случайной погрешности результата измерения отдельных x_i .

Оценка СКО результата измерения

$$S(\bar{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2(X_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_i}^2 \cdot S^2(\bar{x}_i)}.$$

Границы интервала, в котором с заданной вероятностью находится случайная погрешность результата измерения,

$$\varepsilon = \pm t_p^{\text{эТМ}} \cdot S(\bar{X}),$$

где $t_p^{\text{эТМ}}$ – квантильный множитель распределения итогового результата косвенного измерения, соответствующий доверительной вероятности P .

Если число измерений не менее 20, t_p определяется из таблиц нормированного нормального распределения; если же число прямых измерений меньше 20, то можно воспользоваться распределением Стьюдента с эффективным числом степеней свободы

$$k_{\text{эТМ}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n_i - 1} \cdot E_i^4} - 2,$$

где n_i – число прямых измерений величины x_i .

$$E_i = \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_i} \cdot S(\bar{x}_i).$$

В качестве $t_p^{\text{эТМ}}$ можно выбрать квантильный множитель распределения Стьюдента, число измерений которого соответствует минимальному числу произведенных измерений.

Если имеются систематические погрешности Δ_{ci} прямо измеряемых величин x_i , то общую систематическую погрешность Δ_c вычисляют по формуле

$$\Delta_c = \sum \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_i} \cdot \Delta_{ci}.$$

Ее исключают из результата измерения введением поправки $(-\Delta_c)$.

Граница неисключенной систематической погрешности результата косвенного измерения вычисляется по формуле

$$\Theta = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_i}^2 \cdot \Theta_i^2},$$

где k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, $k = 1,1$ при $P = 0,95$.

Суммарную погрешность результата косвенного измерения определяют согласно ГОСТ 8.207–76 в зависимости от соотношения Θ и $S(\bar{X})$, как и для

прямых измерений.

Случай 2. Измеряемые аргументы взаимосвязаны (коррелированы) и различие между результатами определяется как погрешностями измерений, так и теснотой связи измеряемых аргументов.

Оценка дисперсии результата косвенных измерений определяется по формуле

$$S^2(\bar{X}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \cdot S^2(\bar{x}_i) + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial x_j} \right) \cdot \rho_{ij} \cdot S(x_i) \cdot S(x_j),$$

где ρ_{ij} – коэффициент корреляции погрешностей измерения величин x_i и x_j , учитывающий тесноту зависимости между ними.

Возможные значения коэффициента корреляции лежат в интервале $-1 \leq \rho_{ij} \leq +1$. Если $\rho_{ij} = 0$, то погрешности некоррелированы. Равенство $\rho_{ij} = \pm 1$ свидетельствует о наличии функциональной (а не вероятностной) зависимости.

Оценку коэффициента корреляции производят по формуле

$$\tilde{\rho}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_i) \cdot (x_{kj} - \bar{x}_j)}{S(\bar{x}_i) \cdot S(\bar{x}_j)},$$

где m – наименьшее из чисел наблюдений за величинами x_i и x_j .

14.2 Программа работы

Произвести оценку суммарной погрешности определения величины Z по результатам измерений величин X и Y . Величина Y измеряется инструментом с ценой деления h . Предел основной относительной погрешности измерения величины X составляет δ .

Необходимо оценить погрешность определения Z по результатам наблюдений, приведенным в таблицах 14.1–14.5 согласно варианту по списку группы. Доверительная вероятность $P = 0,95$. Результаты измерений распределены по нормальному закону.

Таблица 14.1 – Вариант 1 ($Z = \frac{X^2}{Y}$)

Номер измерения	1	2	3	4	5
X	100,3	100,2	100,4	100,6	100,3
Y	26,6	26,5	26,8	26,9	26,5
h	0,1				
$\delta, \%$	1				

Таблица 14.2 – Вариант 2 ($Z = \frac{Y}{X^2}$)

Номер измерения	1	2	3	4	5
X	2,5	2,6	2,1	2,4	2,3
Y	4,8	4,9	4,4	4,3	4,8
h	0,2				
$\delta, \%$	5				

Таблица 14.3 – Вариант 3 ($Z = \frac{2Y}{3X}$)

Номер измерения	1	2	3	4	5
X	26,3	26,5	26,9	26,6	26,7
Y	13,2	13,3	13,5	13,4	13,3
h	0,2				
$\delta, \%$	2				

Таблица 14.4 – Вариант 4 ($Z = X \cdot Y^2$)

Номер измерения	1	2	3	4	5
X	44,3	44,5	44,8	44,7	44,5
Y	103	102	104	105	106
h	0,2				
$\delta, \%$	2				

Таблица 14.5 – Вариант 5 ($Z = \frac{3Y}{5X}$)

Номер измерения	1	2	3	4	5
X	5,0	5,2	5,4	5,1	5,6
Y	3,3	3,4	3,2	3,1	3,4
h	0,2				
$\delta, \%$	6				

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные этапы обработки результатов косвенных измерений.
- 2 Как правильно представлять результаты обработки измерений?
- 3 Поясните понятия «коррелированные величины» и «некоррелированные величины».
- 4 Дайте определение понятию «дисперсия».
- 5 Дайте определение понятию «среднеквадратичное отклонение».
- 6 Чем отличаются между собой среднеквадратичная величина результата наблюдения от среднеквадратичного отклонения результата измерения?

Список литературы

1 **Сергеев, А. Г.** Метрология, стандартизация и сертификация : учебник и практикум для академ. бакалавриата: в 2 ч. Ч. 1 : Метрология / А. Г. Сергеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2017. – 325 с.

2 **Колчков, В. И.** Метрология, стандартизация и сертификация : учебник / В. И. Колчков. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2017. – 432 с.

3 **Эрастов, В. Е.** Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие / В. Е. Эрастов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ИНФРА-М, 2023. – 196 с.

4 Метрология: учебник / О. Б. Бавыкин, О. Ф. Вечеславова, Д. Д. Грибанов [и др.] ; под общ. ред. С. А. Зайцева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М? 2025. – 522 с.

5 Метрология, стандартизация и сертификация : учеб. пособие / под общ. ред. С. Н. Глаголева. – 3-е изд. – М. : АСВ, 2016. – 248 с.

6 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений : ГОСТ 8.207–76. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 12 с.

Приложение А (рекомендуемое)

Пример выполнения задания по обработке результатов прямых измерений

Произвести оценку результата измерения напряжения по результатам 25 наблюдений с помощью милливольтметра, имеющего предел основной приведенной погрешности $\gamma = 1 \%$. Шкала применяемого прибора равномерная. Нулевая отметка находится на краю шкалы. Конечное значение диапазона измерения $X_N = 50$ мВ. Известные систематические погрешности исключены. Неисключенные систематические погрешности прибора определяются пределом допускаемой абсолютной погрешности. Задачу решить для заранее выбранного уровня значимости $q_1/2 = 5 \%$, $q_2 = 5 \%$. Статистическую обработку результатов наблюдений выполнить для доверительной вероятности $P = 0,95$.

Статистическую обработку результатов наблюдений (таблица А.1) выполняли по [4] для доверительной вероятности $P = 0,95$.

Таблица А.1 – Результаты наблюдений

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A , мВ	20	20,5	19,5	19,5	20,5	20,5	19,5	20	20,5	20,5	20,5	20,5	19,5

Продолжение таблицы А.1

n	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
A , мВ	18	19,5	19,5	19,5	20,5	22	20	19,5	20,5	19,5	19,5	20,5

Вычисление среднего арифметического исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения \tilde{A} :

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

где x_i – i -й результат наблюдения.

$$\tilde{A} = \frac{1}{25} (20 + 20,5 + 19,5 + \dots + 20,5) = \frac{1}{25} \cdot 500 = 20.$$

Вычисление оценки среднего квадратического отклонения (СКО) результата наблюдения производится следующим образом:

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{25-1} [0^2 \cdot 3 + (-0,5)^2 \cdot 10 + (-2)^2 \cdot 1 + 2^2 \cdot 1]} = 0,75.$$

Среднее квадратичное отклонение $\sigma(\tilde{A})$ результата измерения оцениваем по формуле

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{13}{25 \cdot (25-1)}} = 0,15.$$

Проверку гипотезы о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, производим по составному критерию.

Критерий 1.

Вычисляем отношение

$$\tilde{D} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{A}|}{n \cdot S^*} = \frac{14}{25 \cdot 0,72} = 0,77,$$

где S^* – суммарная оценка СКО, ее можно найти по формуле

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n}} = \sqrt{\frac{13}{25}} = 0,72.$$

Первый критерий удовлетворяется, если

$$D_{100 - \frac{q_1}{2}} < \tilde{D} \leq D_{\frac{q_2}{2}},$$

где $D_{100 - \frac{q_1}{2}}$, $D_{\frac{q_2}{2}}$ – квантили распределения, получаемые в соответствии с данными таблицы А.1 n , $q_1/2$ и $(100 - q_1/2)$, причем q_1 – заранее выбранный уровень значимости: $q_1/2 = 5\%$, $100 - q_1/2 = 95\%$.

Так как $0,7337 < \tilde{D} = 0,77 < 0,8637$, то первый критерий удовлетворяется.

Критерий 2.

Можно считать, что критерий 2 удовлетворяется, если не более m разностей $|x_i - \tilde{A}|$ превзошли значение $Z_{P/2} \cdot S$. Здесь S – оценка СКО результата наблюдения; $Z_{P/2}$ – верхняя квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающая вероятности $P/2$ (таблица В.2). Значение m выбирают из таблицы в зависимости от числа наблюдений $n = 25$ и принятого уровня значимости $q_2 = 5\%$. В данном случае $m = 2$.

$$Z_{P/2} \cdot S = 2,17 \cdot 0,75 = 1,63.$$

Анализ показывает, что только две разности $|18 - 20|$ и $|22 - 20|$, равные 2, превзошли 1,63. Итак, оба критерия соблюдаются и распределение результатов наблюдений соответствует нормальному закону.

Для исключения грубых погрешностей из результатов наблюдений строим

Приложение Б (справочное)

Исключение грубых погрешностей результатов наблюдений

Таблица Б.1 – Значение коэффициента t для случайной величины Y , имеющей распределение Стьюдента с $n - 1$ степенями свободы

$n - 1$	$P = 0,95$	$P = 0,99$	$n - 1$	$P = 0,95$	$P = 0,99$
3	3,182	5,841	16	2,120	2,921
4	2,776	4,604	18	2,101	2,878
5	2,571	4,032	20	2,086	2,845
6	2,447	3,707	22	2,074	2,819
7	2,365	3,499	24	2,064	2,797
8	2,306	3,355	26	2,056	2,779
9	2,262	3,250	28	2,048	2,763
10	2,228	3,169	30	2,043	2,750
12	2,179	3,055	∞	1,960	2,576
14	2,145	2,977			

Таблица Б.2 – Значение коэффициента β

Объем выборки	Предельное значение β при уровне значимости $\alpha = 1 - P$	
	0,01	0,05
3	1,15	1,15
4	1,42	1,46
5	1,60	1,67
6	1,73	1,82
7	1,83	1,94
8	1,91	2,03
9	1,98	2,11
10	2,03	2,18
12	2,13	2,29
14	2,21	2,37
16	2,28	2,44
18	2,34	2,50
20	2,38	2,56

Приложение В (рекомендуемое)

Проверка нормального закона распределения результатов наблюдений

При числе результатов наблюдений $n < 50$ нормальность их распределения проверяют при помощи составного критерия.

Критерий 1. Вычисляют отношение \tilde{D} :

$$\tilde{D} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{A}|}{n \cdot S^*},$$

где S^* – суммарная оценка среднего квадратического отклонения, вычисляемая по формуле

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n}}.$$

Результаты наблюдений можно считать распределенными нормально, если

$$D_{100-q_1/2} < \tilde{D} \leq D_{q_1/2},$$

где $D_{100-q_1/2}$, $D_{q_1/2}$ – квантили распределения, получаемые из таблицы А.1 по данным n , $q_1/2$ и $100 - q_1/2$, причем q_1 – заранее выбранный уровень значимости критерия.

Таблица В.1 – Статистика D

n	$q_1/2$		$(100 - q_1/2)$	
	1 %	5 %	95 %	99 %
16	0,9137	0,8884	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,7304	0,6950
26	0,8901	0,8686	0,7360	0,7040
31	0,8826	0,8625	0,7404	0,7110
36	0,8769	0,8578	0,7440	0,7167
46	0,8682	0,8508	0,7496	0,7256
51	0,8648	0,8481	0,7518	0,7291

Критерий 2. Можно считать, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, если не более m разностей $|x_i - \tilde{A}|$ превзошли

значение $Z_{P/2} \cdot S$, где $Z_{P/2}$ – верхняя квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающая вероятности $P/2$; S – оценка среднего квадратического отклонения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n-1}}.$$

Значения P определяются из таблицы А.2 по выбранному уровню значимости q_2 и числу результатов наблюдений n .

При уровне значимости, отличном от предусмотренных в таблице А.2, значение P находят путем линейной интерполяции.

В случае, если при проверке нормальности распределения результатов наблюдений группы для критерия 1 выбран уровень значимости q_1 , а для критерия 2 – q_2 , то результирующий уровень значимости составного критерия $q \leq q_1 + q_2$.

В случае, если хотя бы один из критериев не соблюдается, то считают, что распределение результатов наблюдений группы не соответствует нормальному.

Таблица В.2 – Значение P для вычисления $Z_{P/2}$

n	m	q_2		
		1 %	2 %	5 %
10	1	0,98	0,98	0,96
11...14	1	0,99	0,98	0,97
15...20	1	0,99	0,99	0,98
21...22	2	0,98	0,97	0,96
23	2	0,98	0,98	0,96
24...27	2	0,98	0,98	0,97
28...32	2	0,99	0,98	0,97
33...35	2	0,99	0,98	0,98
36...49	2	0,99	0,99	0,98

Приложение Г (рекомендуемое)

Пример выполнения обработки результатов косвенных измерений

Произвести оценку суммарной погрешности косвенного измерения мощности по результатам пяти прямых измерений тока и напряжения. Предел основной относительной погрешности амперметра составляет 1 %, вольтметра – 2 %. Результаты наблюдений представлены в таблице Д.1 и принадлежат нормальному распределению.

Таблица Д.1 – Результат измерений

Номер измерения	1	2	3	4	5
$U, \text{ В}$	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1
$I, \text{ А}$	2,4	2,2	2,3	2,4	2,3

Порядок выполнения.

1 Проверки крайних значений возрастающих вариационных рядов U и I показали, что они не являются аномальными.

2 Вычислим средние арифметические значения U и I : $\bar{U} = 10,12 \text{ В}$; $\bar{I} = 2,32 \text{ А}$.

3 Определим среднюю мощность по результатам измерения U и I : $\bar{P} = \bar{U} \cdot \bar{I} = 22,26 \text{ Вт}$.

4 Оценим квадрат СКО результатов измерения напряжения и тока:

$$S^2(\bar{U}) = \frac{\sum_{i=1}^5 (U_i - \bar{U})^2}{n \cdot (n-1)} = 440 \cdot 10^{-5} \text{ В}^2; \quad S^2(\bar{I}) = \frac{\sum_{i=1}^5 (I_i - \bar{I})^2}{n \cdot (n-1)} = 140 \cdot 10^{-5} \text{ А}^2;$$

5 Вычислим квадраты частных производных мощности по напряжению и току:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right)^2 = \bar{I}^2 = 5,38 \text{ А}^2; \quad \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 = \bar{U}^2 = 102,41 \text{ В}^2.$$

6 Произведем оценку среднего квадратического отклонения результата измерения мощности:

$$\begin{aligned} S(\bar{P}) &= \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right)^2 \cdot S^2(\bar{U}) + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 \cdot S^2(\bar{I})} = \\ &= \sqrt{5,38 \cdot 440 \cdot 10^{-5} + 102,41 \cdot 140 \cdot 10^{-5}} = 0,4e. \end{aligned}$$

7 Вычислим доверительный интервал случайной погрешности, соответствующий $P = 0,95$: $\varepsilon = t_{0,95} \cdot S(\bar{P}) = 2,776 \cdot 0,4 = 1,1$ Вт.

8 Определим доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерения. В качестве границ НСП измерения тока и напряжения принимаем пределы допускаемых погрешностей применяемых средств измерений: для вольтметра – 2 %, для амперметра – 1 %:

$$\Theta_U = \bar{U} \cdot 0,02 = 10,12 \cdot 0,02 = 0,2 \text{ В}; \quad \Theta_I = \bar{I} \cdot 0,01 = 2,32 \cdot 0,01 = 0,02 \text{ А},$$

$$\Theta = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right)^2 \cdot \Theta_U^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 \cdot \Theta_I^2} = 1,1 \cdot \sqrt{5,38 \cdot 0,2^2 + 102,41 \cdot 0,02^2} = 0,557.$$

9 Определим суммарную погрешность результата измерения Δ .

Так как $\frac{\Theta}{S(\bar{P})} = \frac{0,557}{0,4} = 1,39$, т. е. $0,8 < 1,39 < 8$, то границы абсолютной по-

грешности результата измерения Δ (без учета знака) определяют по более сложной формуле

$$\Delta = k \cdot S_{\Sigma} = \frac{\varepsilon + \Theta}{S(\bar{P}) + \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Theta_i^2}{3}}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Theta_i^2}{3} + S^2(\bar{P})} = \frac{\varepsilon + \Theta}{S(\bar{P}) + \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right)^2 \cdot \Theta_U^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 \cdot \Theta_I^2}{3}}} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right)^2 \cdot \Theta_U^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 \cdot \Theta_I^2}{3} + S^2(\bar{P})} = \frac{1,1 + 0,557}{0,4 + \sqrt{\frac{0,256}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{0,256}{3} + 0,16} = 1,186 \text{ Вт.}$$

10 Результат измерения следующий:

$$P = (22,26 \pm 1,19) \text{ Вт}, \quad P = 0,95.$$

Вариант задачи выбирается в соответствии со списком группы студентов.