

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой»



Д. А. Довгяло

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 6-05-0731-01 «Геодезия»

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
2025

УДК 621.38(075.8)

Одобрено и рекомендовано к изданию методической комиссией
факультета компьютерных наук и электроники (протокол № 4 от 21.11.2024)

Кафедра энергетики и электроники

РЕЦЕНЗЕНТ:

Зам. гл. технолога ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
канд. техн. наук **О. Ю. НАЛИВАЙКО**

Изложены требования к содержанию и составу лабораторных работ «Основы электротехники и электроники», указания по проведению экспериментальных исследований, приведены схемы исследуемых установок, основные расчетные зависимости, таблицы, представлены методики обработки результатов опытов, рекомендации по оформлению отчетов к лабораторным работам, дан список необходимой литературы.

Предназначены для студентов специальности 6-05-0731-01 «Геодезия».

Для создания текстового электронного издания «Основы электроники и электротехники» Д. А. Довгяло использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Дмитрий Александрович ДОВГЯЛО

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 6-05-0731-01 «Геодезия»

Редактор *И. Н. Чапкевич*

Подписано к использованию 14.08.2025.
Объем издания: 2,33 Мб. Заказ 312.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 27.05.2004.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	8
1.1. Основные теоретические положения	8
1.2. Порядок выполнения работы	11
1.3. Вопросы для самопроверки	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЕРМЕТРА.....	12
2.1. Основные теоретические положения	12
2.2. Проведение опыта.....	13
2.3. Обработка результатов опыта	14
2.4. Вопросы для самопроверки	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТМЕТРОВ	15
3.1. Основные теоретические положения	15
3.2. Проведение опыта.....	16
3.3. Обработка результатов опыта	17
3.4. Вопросы для самопроверки	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОСВЕННЫМ МЕТОДОМ	18
4.1. Основные теоретические положения	18
4.2. Проведение опыта.....	20
4.3. Обработка результатов опыта	21
4.4. Вопросы для самопроверки	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КОСВЕННЫМ ПУТЕМ.....	23
5.1. Основные теоретические положения	23
5.2. Проведение опыта.....	24
5.3. Обработка результатов опыта	25
5.4. Вопросы для самопроверки	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ	26
6.1. Краткие теоретические сведения.....	26
6.2. Порядок выполнения работы	29
6.2.1 Исследование шунта	29
6.2.2 Исследование трансформатора тока.....	31
6.2.3 Исследование измерительного трансформатора напряжения	32
6.2.4 Исследование датчика тока на эффекте Холла.....	33
6.2.5 Исследование датчика напряжения на эффекте Холла	34
6.3. Вопросы для самопроверки	35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	36
7.1. Краткие теоретические сведения	36
7.2. Порядок выполнения работы.....	37
7.2.1 Исследование датчика температуры с отрицательным ТКС	37
7.2.2 Исследование датчика температуры с положительным ТКС.....	38
7.2.3 Исследование аналогового датчика температуры.....	39
7.2.4 Исследование цифрового датчика температуры	40
7.2.5 Исследование термопары	41
7.3. Вопросы для самопроверки	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАХОГЕНЕРАТОРА И ЭНКОДЕРА	43
8.1. Краткие теоретические сведения	43
8.2. Порядок выполнения работы.....	43
8.3. Вопросы для самопроверки	44

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ	
ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ	45
9.1. Краткие теоретические сведения	45
9.2. Порядок выполнения работы	49
9.2.1 Исследование резистивного датчика линейного перемещения	49
9.2.2 Исследование оптоэлектрического датчика линейного перемещения	50
9.2.3 Исследование ёмкостного датчика линейного перемещения	50
9.2.4 Исследование индуктивного датчика линейного перемещения	51
9.2.5 Исследование ультразвукового датчика линейного перемещения	52
9.3. Вопросы для самопроверки	53
ЛИТЕРАТУРА	54

ВВЕДЕНИЕ

Основной **целью** преподавания дисциплины является приобретение студентами знаний и навыков в области электротехники, цепей и электрооборудования постоянного и переменного тока, электрических машин, электронных приборов, а также умения практически применить полученные знания для электрификации, автоматизации и обслуживания объектов геодезической отрасли.

Задачи изучения дисциплины определяются требованиями в подготовке инженеров геодезического профиля, вытекающими из их роли в системе непрерывной профессиональной подготовки студентов, положениями образовательного стандарта, включающими:

- понимание значения электротехники и электроники в профессиональной деятельности;
- овладение способами рационального электропотребления;
- понимание закономерностей построения простейших электрических и электронных схем;
- изучение принципов действия электрических и электронных устройств, полупроводниковых и фотоэлектрических приборов;
- освоение основных правил эксплуатации электрооборудования и методов измерения электрических величин;
- знание принципов выбора электрических и электронных устройств и приборов.

Для достижения поставленной цели и решения указанных задач в результате изучения дисциплины «Основы электротехники и электроники» студенты должны:

знать:

- электротехническую терминологию и символику;
- назначение и принцип действия основных узлов оборудования, содержащих электрические машины и аппараты;
- общие принципы измерения основных электрических величин, связанных с профилем инженерной деятельности;
- принципы действия, конструкции, свойства основных полупроводниковых приборов;

уметь:

- производить измерения электрических величин;
- включать электротехнические приборы, управлять ими и контролировать их эффективную и безопасную работу;
- определять основные параметры электронных компонентов, проводить измерения;

владеть:

- методикой чтения электрических схем и определения характеристик типовых электрических устройств;
- электротехнической методикой и символикой;
- методикой оценки качества функционирования электронных устройств.

Материал дисциплины направлен на формирование **специализированной компетенции** СК-1 – Обладать методами анализа электрических схем и оценки функционирования электронных устройств.

Общее количество часов по дисциплине – 108, из которых аудиторных – 68 (в том числе лекции – 34 часа, лабораторные занятия – 34 часа). Самостоятельная работа студентов – 40 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины – 3 зачетные единицы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель работы: изучить лабораторное оборудование, применяемое в лабораторных работах; характеристики и возможности тестеров-мультиметров.

1.1. Основные теоретические положения

Лабораторный стенд “Электрические измерения”

Конструктивно стенд состоит из корпуса, в который установлено электрооборудование, электронные платы и блоки, лицевая панель и столешница интегрированного рабочего стола. В корпусе стенда размещены:

- плата фазометра и генератора низкочастотных колебаний;
- плата нагрузочных резисторов МЛТ-2 номиналов 180 Ом, 240 Ом, 330 Ом, 510 Ом;
- блок нагрузочных резисторов ПЭВР-100 330 Ом;
- трансформаторы ОСМ-01, служащие индуктивными элементами в лабораторных работах – 3 шт.;
- блок конденсаторов МБГО емкостью 2, 4, 10 мкФ;
- блок ламп накаливания 220 В, 60 Вт, служащих нагрузкой при исследовании счетчика электроэнергии;
- автотрансформатор (ЛАТР) 0,1 кВт;
- выпрямитель регулируемого ЛАТРома напряжения 2 А.

На лицевой панели стенда изображены электрические схемы объектов исследования. Все схемы, изображенные на панели, разбиты на группы в соответствии с тематикой проводимых лабораторных работ. На панели установлены коммутационные гнезда, стрелочные щитовые приборы, коммутационная аппаратура, а также органы управления, позволяющие изменять параметры элементов при проведении лабораторных работ. К органам управления относятся:

- переключатель лабораторного ЛАТРа, который позволяет устанавливать напряжение 10, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 120, 140, 180, 220 В;
- потенциометр добавочного сопротивления в цепи выпрямленного тока;
- задающий потенциометр генератора низкой частоты для регулирования частоты синусоиды в пределах 30...300 Гц.

Для проведения лабораторной работы необходимо собрать схему объекта исследования с помощью унифицированных перемычек, которые позволяют представить схему в наглядном виде.

На рисунке 1.1 показаны участки проведения лабораторных работ:

№ 2 «Расширение пределов измерения амперметра»;

№ 3 «Расширение пределов измерения вольтметров»;

№ 4 «Измерение сопротивлений косвенным методом»;

№ 5 «Измерение индуктивности косвенным путем».

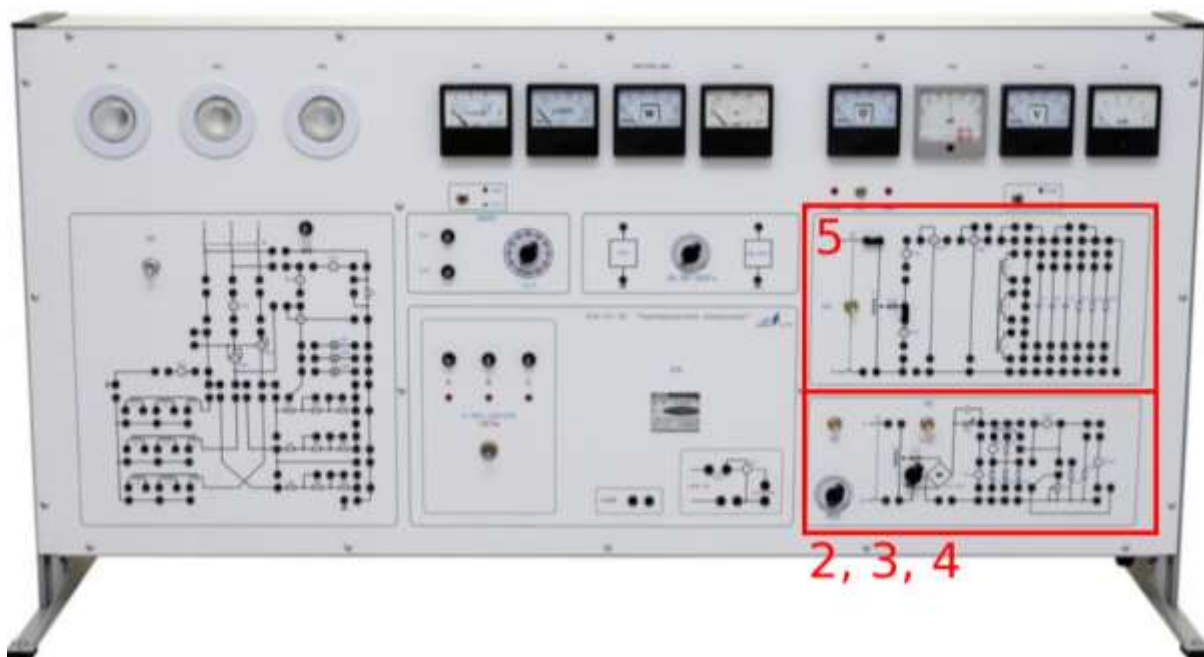


Рисунок 1.1 – Внешний вид стенда “Электрические измерения”
и участки проведения лабораторных работ № 2–5

Лабораторный стенд «Технологические датчики»

Лабораторный стенд предназначен для использования в качестве учебного оборудования при проведении лабораторных работ по изучению технологических датчиков и их характеристик. Лицевая панель стенда разбита на группы в соответствии с тематикой проводимых работ. Стенд позволяет проводить работы по изучению и снятию характеристик датчиков тока и напряжения, датчиков температуры, датчиков линейного перемещения, бесконтактных датчиков-выключателей, датчиков углового положения и датчиков давления. В качестве измерительного оборудования применяются мультиметры.

Принцип работы. Для исследования датчиков тока и напряжения в стенде используется ЛАТР с диапазоном регулирования 0...220 В. Для определения параметров датчиков температуры в качестве нагревательного элемента используется резистор ПЭВ мощностью 50 Вт. Для исследования датчиков линейного перемещения к каждому датчику прилагается измерительная линейка. Для контроля за работой бесконтактных датчиков-выключателей в стенде установлены светодиоды. Регулирование скорости вращения двигателя, приводящего в движение тахогенератор с установленным на нем кодовым диском, производится с помощью ЛАТРа через понижающий трансформатор и выпрямитель. В качестве датчиков углового положения применяются переменные резисторы и галетный переключатель. Для исследования датчика давления в стенде используется воздушный компрессор, манометр и регулятор давления.

На рисунке 1.2 показаны участки проведения лабораторных работ:

- № 6 «Статические характеристики датчиков тока и напряжения»;
- № 7 «Статические и динамические характеристики датчиков температуры»;
- № 8 «Статические характеристики тахогенератора и энкодера»;
- № 9 «Статические характеристики датчиков линейного перемещения».

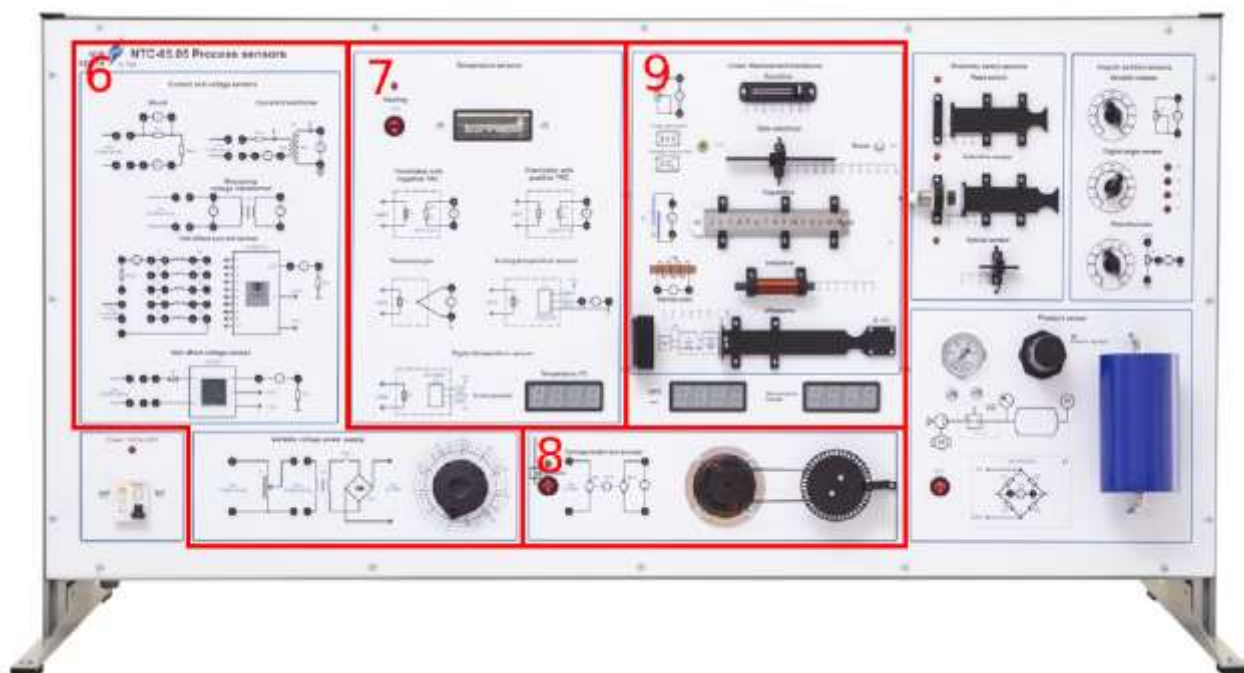


Рисунок 1.2. – Лабораторный стенд “Технологические датчики” и участки проведения лабораторных работ № 6–9

На рисунке 1.3 показаны тестеры-мультиметры, используемые в лабораторных работах.



Рисунок 1.3. – Мультиметры, используемые для измерений

Тестер – это многофункциональный электроизмерительный прибор. Основное его назначение – измерение характеристик электрических сигналов. Функционально мультиметр объединяет возможности амперметра, вольтметра, омметра и других электроизмерительных приборов.

Для начала работы необходимо определить величину, которая подлежит измерению и перевести переключатель в необходимое положение:

Ω – сопротивление;

ACV ($V\sim$) – переменное напряжение;

DCV ($V-$) – постоянное напряжение;

DCA ($A-$) – постоянный ток.

Далее в зависимости от измеряемого параметра установить щупы в нужное положение:

– черный щуп – к разъему COM.

– красный (в зависимости от ситуации) – в отверстие $V\Omega$ для измерений напряжения и сопротивления; в позицию mA – для измерения тока в пределах нормы. Если ток выше 200 мА, тогда щуп следует переключить в позицию 10 А.

На рисунке 1.4 показана рулетка измерительная – инструмент, выполненный в виде гибкой ленты с нанесенной миллиметровой шкалой и механизмом сматывания.



Рисунок 1.4 – Рулетка измерительная

1.2. Порядок выполнения работы

С помощью тестеров-мультиметров провести измерение основных электротехнических параметров – силы тока (постоянного и переменного), напряжения (постоянного и переменного), сопротивления. Результаты оформить в виде таблиц с указанием единиц измерения.

1.3. Вопросы для самопроверки

1. Какие технологические датчики позволяет исследовать лабораторный макет. Охарактеризуйте диапазоны применения датчиков.

2. Что такое погрешность измерений? Приведите размерность основной и относительной погрешности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЕРМЕТРА

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

2.1. Основные теоретические положения

Для расширения пределов измерения амперметров применяют особые вспомогательные устройства – шунты. Шунт представляет собой четырехзажимный резистор $R_{ш}$, который вместе с измерительным механизмом, подключенным к его потенциальным зажимам Π , при помощи токовых зажимов T включается в цепь измеряемого тока I_x (рисунок 2.1.).

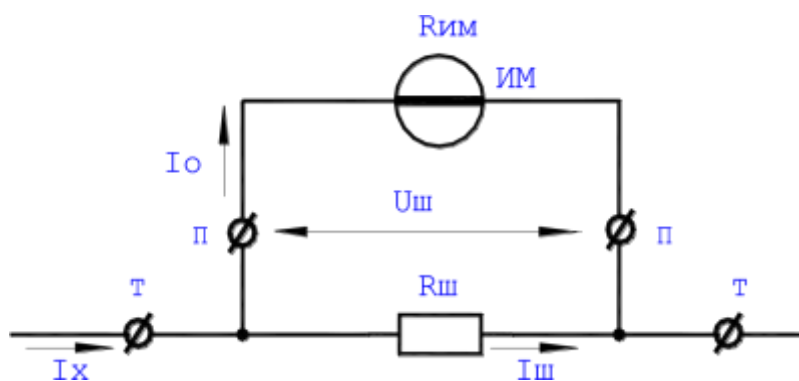


Рисунок 2.1. - Цепь измеряемого тока I_x

Шунт преобразует ток в падение напряжения. Для постоянного тока уравнение преобразования имеет вид:

$$U_{ш} = R_{ш} \cdot I_{ш}, \quad (2.1)$$

где $I_{ш}$ – ток в шунте.

Но шунт можно рассматривать и как делитель напряжения с коэффициентом деления (шунтирования):

$$n = \frac{I_x}{I_0} = \frac{R_{и.м.} + R_{ш}}{R_{ш}}, \quad (2.2)$$

где I_0 – ток в измерительном механизме;

$R_{и.м.}$ – сопротивление измерительного механизма.

Это позволяет расширить пределы измерения измерительного механизма по току, т.е. измерять токи, значительно превосходящие ток, на который рассчитан измерительный механизм. Из этого выражения следует:

$$R_{ш} = \frac{R_{и.м.}}{n - 1}. \quad (2.3)$$

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. Кроме того, применение шунтов на переменном токе приводит к погрешности, обусловленной перераспределением токов I_0 и $I_{ш}$ при разных частотах из-за влияния реактивных сопротивлений измерительного механизма и шунта.

Для измерений токов 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 10 000 А и имеют массивные наконечники из красной меди для включения в цепь тока. Между наконечниками впаяны манганиновые пластины или круглые стержни для улучшения охлаждения шунта. Эти шунты делаются взаимозаменяемыми, т.е. на фиксированные $U_{ш}$ (60, 75, 100, 150, и 300 мВ), и потенциальные зажимы шунта соединяют с измерительным механизмом калиброванными проводами, сопротивления которых оговорены ГОСТ 8042-68. Калиброванные шунты в зависимости от точности их подгонки подразделяют на классы 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5.

2.2. Проведение опыта

Соберите схему согласно рис. 2.2.

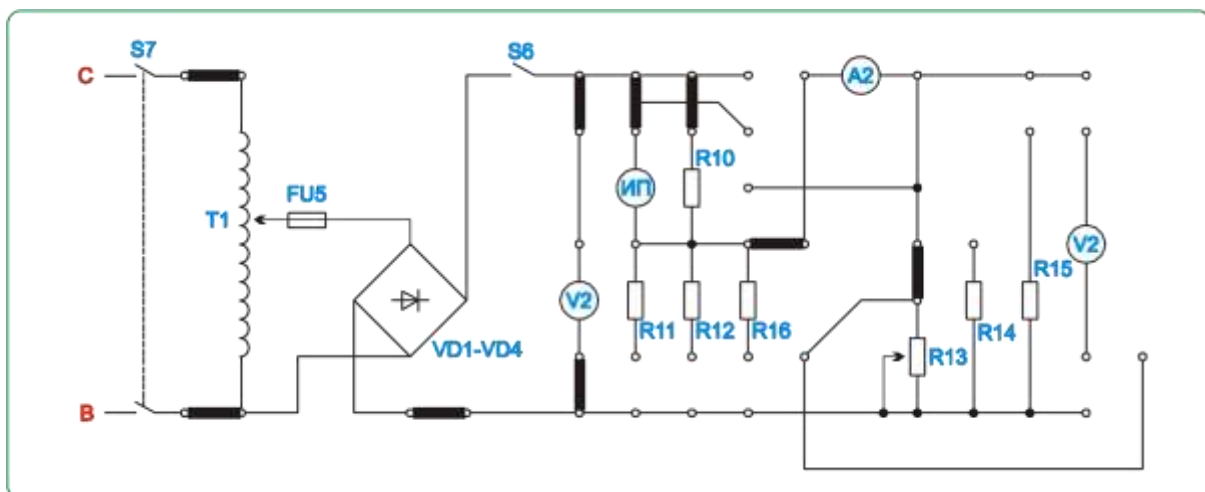


Рисунок 2.2. - Электрическая схема

Перед включением стенда установите переключатель ЛАТРа в начальное положение.

Переменный резистор R_{13} установить на максимальное сопротивление.

В данной работе поверяемым является миллиамперметр ИП с добавочным шунтом R_{10} (при этом величина его полного отклонения равна 25 мА), а контрольным A_2 .

Включите стенд, затем тумблер включения питания ЛАТРа T_1 (S7) и, наконец, тумблер питания цепей постоянного тока (S6).

Изменяйте переключателем ЛАТРа величину напряжения (V_2) до получения измеряемого тока, дальнейшее увеличение тока осуществляется плавно с помощью переменного резистора R_{13} . Сделайте необходимое для расчетов количество замеров.

По окончании работы верните все аппараты в исходное положение и отключите стенд.

2.3. Обработка результатов опыта

Определите величину сопротивления шунта R_{10} измерительного прибора ИП, для чего измерьте омметром сопротивление рамки измерительного механизма.

2.4. Вопросы для самопроверки

1. Какой вид имеет схема включения наружных шунтов?
2. Определите сопротивление шунта для измерительного механизма с током полного отклонения 5 мА и $R_{и.м.} = 3 \text{ Ом}$, 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 ($R_{и.м.} = 10 \text{ Ом}$), если его включить с шунтом, сопротивление которого $R_{ш} = 0,01 \text{ Ом}$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТМЕТРОВ

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

3.1. Основные теоретические положения

Резистор, включенный последовательно с измерительным механизмом (ИМ), вращающий момент которого зависит от тока, и используемый для измерения напряжения, называется **добавочным резистором**. Его основное назначение – преобразовать напряжение в ток. Ток I_0 в цепи ИМ (рисунок 3.1.) определяется уравнением преобразования:

$$I_0 = \frac{U_x}{R_{\text{И.М.}} + R_{\text{Д}}}, \quad (3.1)$$

где U_x – измеряемое напряжение;
 $R_{\text{И.М.}}$ – сопротивление измерительного механизма;
 $R_{\text{Д}}$ – сопротивление добавочного резистора.

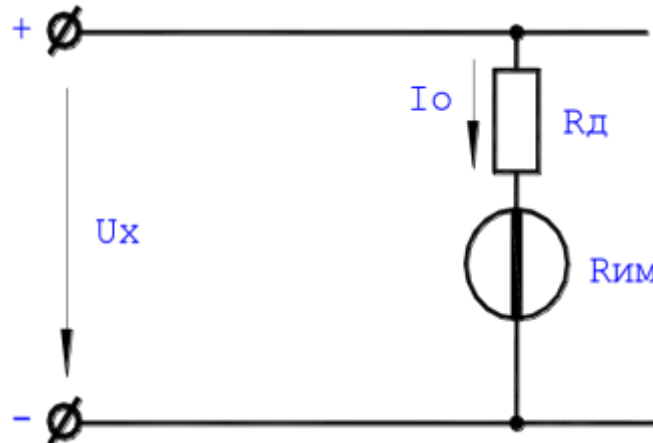


Рисунок 3.1. – Электрическая цепь

Добавочные резисторы служат также для расширения пределов измерения по напряжению уже готовых вольтметров и других приборов, например, ваттметров, фазометров, имеющих параллельные цепи, включаемые под напряжение.

Если вольтметр имеет номинальный предел измерения U_H , сопротивление $R_{\text{И.М.}}$ и нужно расширить предел до $U'_H > U_H$, то справедливо равенство:

$$\frac{U_H}{R_{\text{И.М.}}} = \frac{U'_H}{R_{\text{И.М.}} + R'_{\text{Д}}}. \quad (3.2)$$

Отсюда сопротивление резистора:

$$R'_{\text{д}} = R_{\text{и.м.}} \cdot (n - 1), \quad (3.3)$$

где $n = U'_H / U_H$ – множитель шкалы.

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 классы: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0.

3.2. Проведение опыта

Соберите схему согласно рисунку 3.2.

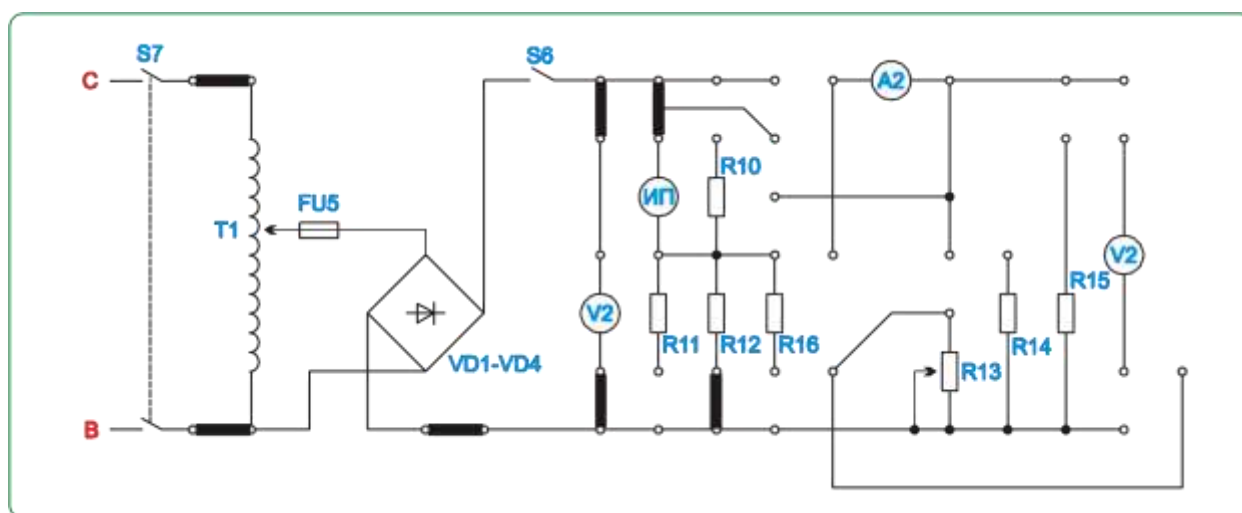


Рисунок 3.2. – Электрическая схема

В данной работе в качестве поверяемого вольтметра используется миллиамперметр ИП с $U_H = 100$ мВ и добавочным резистором $R'_{\text{д}} = R_{12}$ (при этом его максимальное отклонение соответствует 100 В), контрольным является V2; а для случая ИП с добавочным резистором R_{11} максимальное отклонение соответствует 50 В.

Включите стенд, затем тумблер включения питания ЛАТРа T_1 (S7) и, наконец, тумблер питания цепей постоянного тока (S6). Изменяйте переключателем ЛАТРа величину напряжения (V2) до получения измеряемого напряжения на приборе ИП.

Сделайте необходимое для расчетов количество замеров.

По окончании работы верните все аппараты в исходное положение и отключите стенд.

3.3. Обработка результатов опыта

Определите величину сопротивления добавочного резистора измерительного прибора ИП, для чего измерьте его внутреннее сопротивление.

3.4. Вопросы для самопроверки

1. Какие вспомогательные элементы применяются для изменения пределов измерения магнитоэлектрических вольтметров?
2. Какого порядка должно быть сопротивление добавочного резистора к измерительному механизму с $R_0 = 1 \text{ Ом}$ и падением напряжения на рамке $U_0 = 10 \text{ мВ}$ для получения вольтметра с $U_H = 10 \text{ В}$?
3. До какого значения напряжения будет расширен предел измерения вольтметра с сопротивлением рамки $R_0 = 1 \text{ Ом}$ и падением напряжения на ней $U_0 = 10 \text{ мВ}$ при включении добавочного резистора $R_d = 100\,000 \text{ Ом}$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОСВЕННЫМ МЕТОДОМ

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

4.1. Основные теоретические положения

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 :

$$R_X = \frac{U_X}{I_X}. \quad (4.1)$$

Существуют различные способы измерения падения напряжения U_X и тока I_X (рисунок 4.1.).

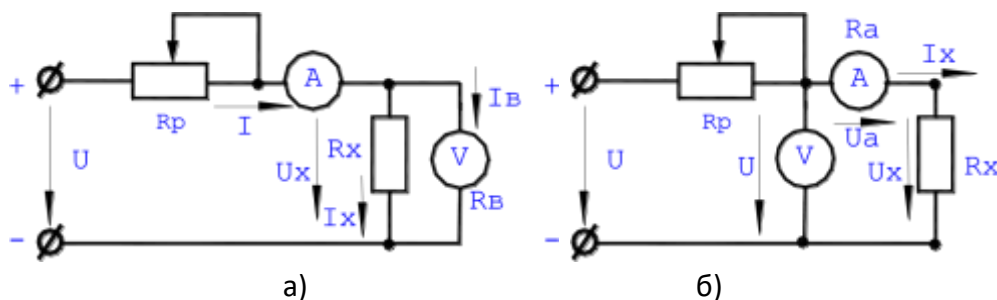


Рисунок 4.1. – Электрические цепи

Измерительные части приведенных схем не обеспечивают одновременное измерение напряжения U_X и тока I_X . Так, 1-я схема (рисунок 4.1, а) позволяет измерить с помощью вольтметра напряжение U_X , а амперметр дает возможность определить ток I , равный сумме I_X и I_B , из которых последний является током обмотки вольтметра. В этом случае определяемое сопротивление:

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_X}{I - I_B} = \frac{U_X}{I - \frac{U_X}{R_B}}, \quad (4.2)$$

где R_B – сопротивление вольтметра.

Во второй схеме (рисунок 4.1, б) 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:

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U - U_a}{I_X} = \frac{U}{I_X} - \frac{U_a}{I_X} = \frac{U}{I_X} - R_a, \quad (4.3)$$

где R_a – сопротивление амперметра.

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

Если определяемое сопротивление R_X мало по сравнению с сопротивлением вольтметра R_B , током I_B можно пренебречь и, применяя первую схему (см. рисунок 4.1, а), находить сопротивление R_X так:

$$R_X = R_X' = \frac{U_X}{I}. \quad (4.4)$$

Относительная погрешность:

$$\gamma' = \frac{R_X' - R_X}{R_X} = -\frac{R_X'}{R_B} = -\frac{R_X}{R_X + R_B}. \quad (4.5)$$

В этих случаях, когда определяемое сопротивление R_X сравнимо с сопротивлением вольтметра R_B и пренебречь током I_B нельзя, следует пользоваться второй схемой (см. рисунок 4.1, б) и при расчете не учитывать падение напряжения U_a на амперметре, определяя сопротивление R_X так:

$$R_X = R_X' = \frac{U}{I_X}. \quad (4.6)$$

Относительная погрешности измерения:

$$\gamma'' = \frac{R_X' - R_X}{R_X} = \frac{R_a}{R_X - R_a} = \frac{R_a}{R_X}. \quad (4.7)$$

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:

$$\frac{R_X}{R_X + R_B} = \frac{R_a}{R_X} \quad (4.8)$$

или

$$R_X^2 - R_a R_X - R_B R_X = 0 \quad (4.9)$$

Откуда

$$R_X \cong \sqrt{R_B R_a}. \quad (4.10)$$

Следовательно, для сопротивлений $R_X < \sqrt{R_B R_a}$ предпочтительна схема рисунка 4.1, а), а для сопротивлений $R_X > \sqrt{R_B R_a}$ – схема рисунка 4.1, б). Первую из них

называют схемой определения «малых» сопротивлений, а другую – 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.

4.2. Проведение опыта

В данной работе необходимо косвенным методом измерить сопротивление R_{14} (малой величины 300 Ом) и сопротивление R_{15} (сравнимое с сопротивлением обмотки вольтметра 10 кОм).

Измерение сопротивлений малой величины.

Соберите схему согласно рисунку 4.2 вначале с включением вольтметра V_2 до амперметра A_2 , а затем схему с включением вольтметра V_2 после амперметра A_2 . Включите стенд, затем тумблер включения питания ЛАТРа T_1 (S_7) и, наконец, тумблер питания цепей постоянного тока (S_6). Изменяйте переключателем ЛАТРа величину напряжения (V_2) до получения измеряемого тока на приборе A_2 .

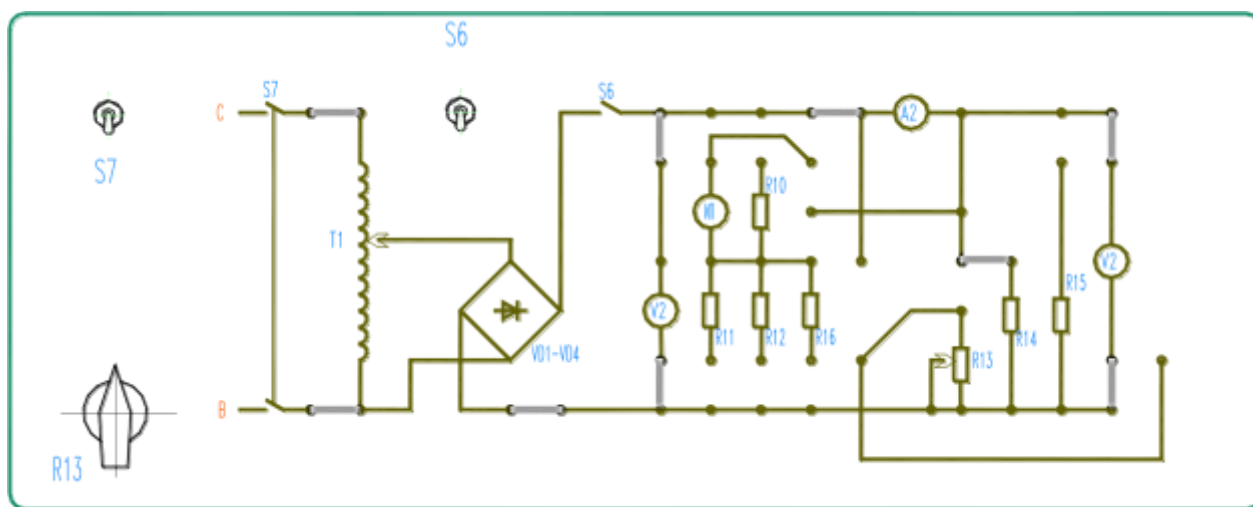


Рисунок 4.2. – Электрическая схема

Изменяйте переключателем ЛАТРа величину напряжения (V_2) до получения измеряемого тока.

Осуществите перекоммутацию цепи таким образом, чтобы амперметр A_2 был включен после вольтметра, и повторите измерения.

Измерение сопротивлений большой величины.

В данном опыте измеряется сопротивление R_{15} , вольтметром служит миллиамперметр ИП с добавочным сопротивлением R_{11} (предел измерения 50 В и внутреннее сопротивление 10 кОм).

Соберите схему согласно рисунку 4.3, а.

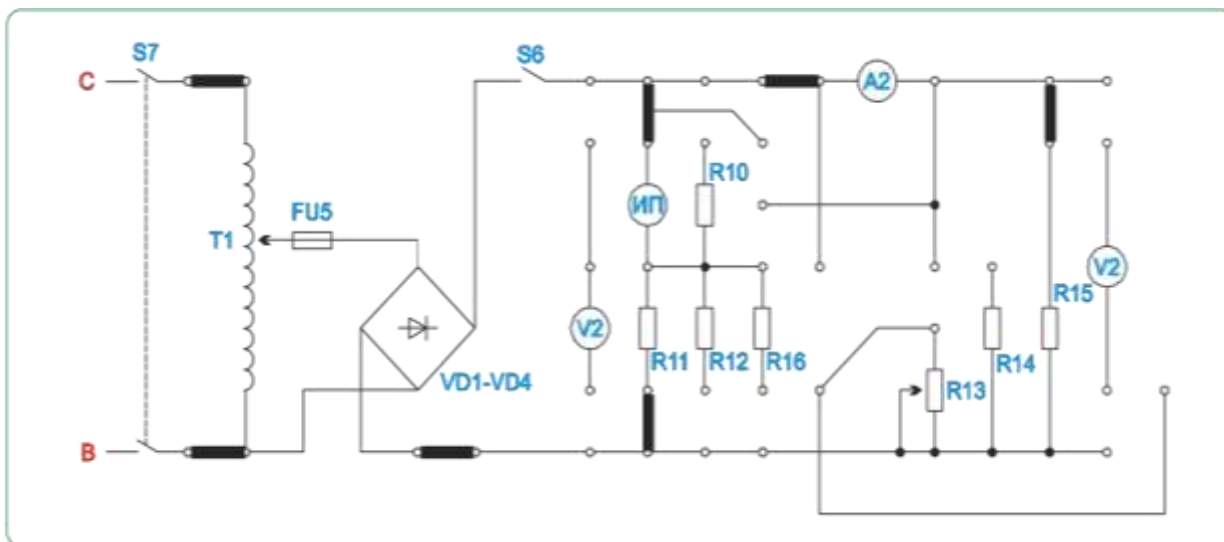


Рисунок 4.3, а – Электрическая схема

Изменяйте переключателем ЛАТРа величину напряжения (в качестве вольтметра прибор ИП на пределе 50В) до получения измеряемого тока. По окончании опыта верните все аппараты в исходное положение и отключите стенд.

Осуществите перекоммутацию таким образом, чтобы амперметр А2 был включен до вольтметра, и повторите измерения (рисунок 4.3, б).

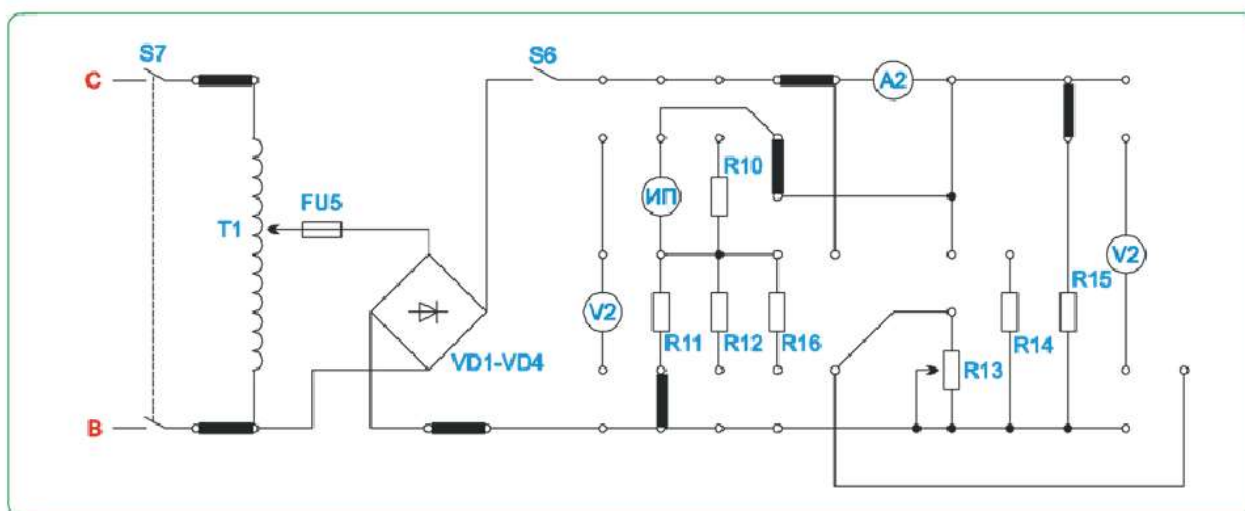


Рисунок 4.3, б – Электрическая схема

По окончании работы верните все аппараты в исходное положение и отключите стенд.

4.3. Обработка результатов опыта

Рассчитать R_x по схеме рисунка 4.2. по формуле:

$$R_x = \frac{U_x}{I}. \quad (4.11)$$

Измерьте сопротивление с помощью омметра. Оцените погрешность измерения, сравнив расчетное значение с измеренным.

Рассчитать R_x по схемам рисунков 4.3, а и б по формуле (4.11).

Измерьте сопротивление с помощью омметра. Оцените погрешность измерения, сравнив расчетное значение с измеренным.

4.4. Вопросы для самопроверки

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»?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КОСВЕННЫМ ПУТЕМ

Цель работы: изучить косвенный метод измерения индуктивности.

5.1. Основные теоретические положения

Любой контур электрической цепи с током пронизывается собственным магнитным потоком. Магнитные потоки, пронизывающие отдельные витки катушки, могут быть различными. Сумма магнитных потоков (Φ), сцепленных с витками, называется **потокосцеплением** (ψ).

$$\psi = W \cdot \Phi, \quad (5.1)$$

где W – число витков.

Потокосцепление ψ и ток I катушки в линейной цепи пропорциональны и связаны соотношением:

$$\psi = L \cdot I, \quad (5.2)$$

где L – коэффициент пропорциональности – индуктивность катушки, которая называется катушкой индуктивности. Единица измерения индуктивности – генри (Гн).

Как и при измерении сопротивления постоянному току, для измерения индуктивности применим метод амперметра и вольтметра. Необходимо 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 3-х приборов – амперметра, вольтметра и ваттметра. Для больших сопротивлений используется схема рисунка 5.1, а), а для малых – рисунка 5.1, б).

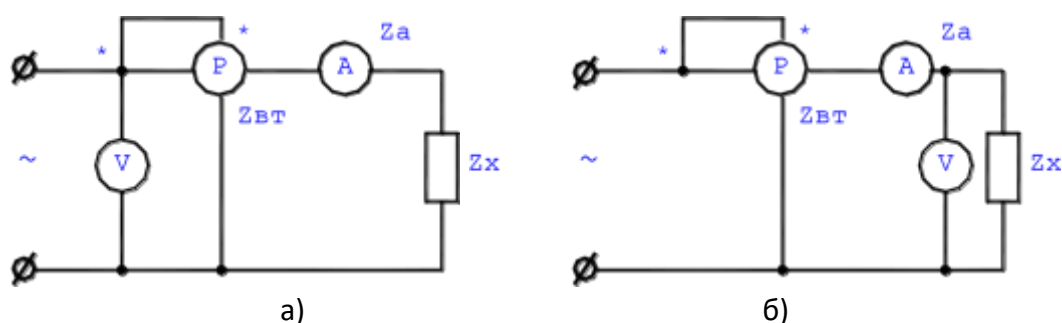


Рисунок 5.1. – Электрические цепи

В первом случае значение полного сопротивления, определенное по показаниям вольтметра и амперметра, $Z'_x = \frac{U}{I}$ будет больше действительного Z_x на величину геометрической суммы сопротивлений амперметра и последовательной обмотки ваттметра. По показаниям приборов в схеме рисунка 5.1, а) можно определить активное сопротивление:

$$R'_x = \frac{P}{I^2} = R_x + R_a + R_{em}, \quad (5.3)$$

где R_a и R_{em} – активные сопротивления, соответственно, амперметра и последовательной обмотки ваттметра. Реактивное сопротивление

$$X'_x = \sqrt{(Z'_x)^2 - (R'_x)^2}. \quad (5.4)$$

Зная активное и реактивное сопротивления приборов, можно найти активное, реактивное и полное сопротивления элемента цепи:

$$R_x = R'_x - R_a - R_{em}; \quad (5.5)$$

$$X_x = X'_x - X_a - X_{em}; \quad (5.6)$$

$$Z_x = \sqrt{(R_x^2 + X_x^2)}; \quad (5.7)$$

$$L_x = \frac{X_x}{2\pi f}. \quad (5.8)$$

Применительно к схеме, приведенной на рисунок 5.1, б, по показаниям приборов вычисляют активную и реактивную проводимости и находят активную, реактивную и полную проводимости измеряемого элемента цепи. Точность измерения рассмотренным методом невелика, причем особенно большие погрешности имеют место при определении составляющих полного сопротивления (или проводимости).

5.2. Проведение опыта

Соберите схему по рисунку 5.2. Включите стенд, затем тумблер включения питания ЛАТРа Т1 (S4). Изменяйте переключателем ЛАТРа величину напряжения (V1) до получения измеряемого тока на приборе А1.

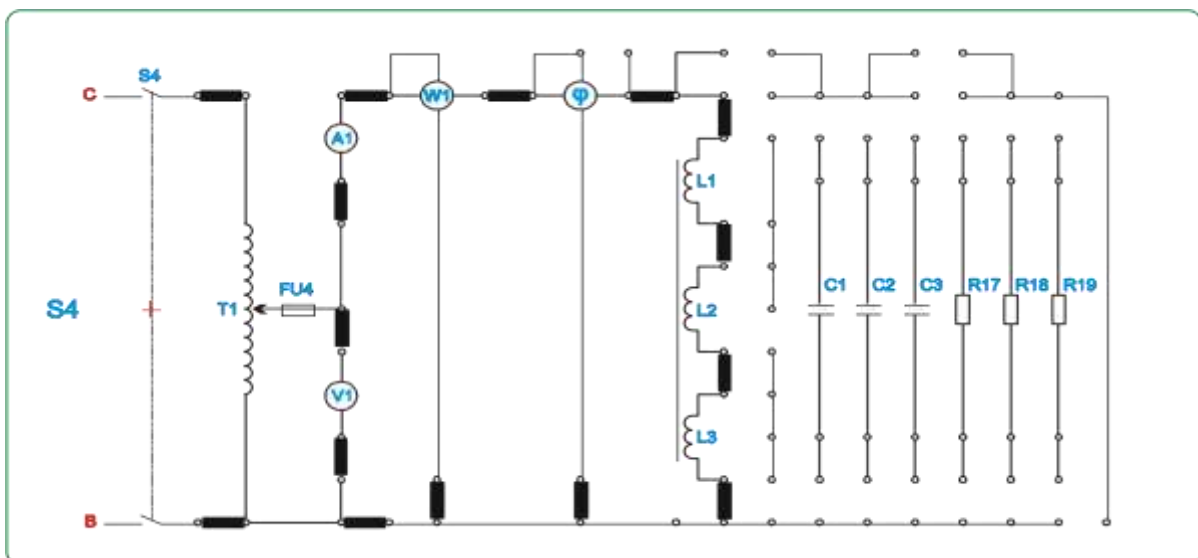


Рисунок 5.2. – Электрическая цепь

Изменяя величину напряжения, установите такую величину тока и мощности, которые можно достаточно точно измерить. Повторить измерения с различными величинами индуктивности.

Результаты опыта занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. – Результаты опыта

Измерение				Расчёт					
N	$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$Z_x, Ом$	$R_x, Ом$	$X_x, Ом$	$L_x, Ом$	Δ	$\delta, \%$

По окончании работы верните все аппараты в исходное положение и отключите стенд.

5.3. Обработка результатов опыта

Определить индуктивность катушки с учетом известных значений R_a, R_{em}, X_{em}, X_a .

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

$$Z_x = \frac{U}{I}; \quad (5.9)$$

$$R_x = \frac{P}{I^2}; \quad (5.10)$$

$$X_x = \sqrt{(Z_x^2 - R_x^2)}; \quad (5.11)$$

$$L = \frac{X_x}{2\pi f}. \quad (5.12)$$

Определить абсолютную Δ и относительную погрешности (δ).

5.4. Вопросы для самопроверки

1. В чем суть косвенного метода измерения?
2. Зависит ли схема включения A, V, P от значения неизвестного сопротивления катушки индуктивности?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучить принцип работы датчиков тока и напряжения, исследовать их статические характеристики.

6.1. Краткие теоретические сведения

Шунт – устройство, которое позволяет электрическому току протекать в обход какого-либо участка схемы, обычно представляет собой низкоомный резистор, катушку или проводник. Шунт является простейшим измерительным преобразователем тока в напряжение.

Измерительный шунт характеризуется номинальным значением входного тока $I_{ном}$ и номинальным значением выходного напряжения $U_{ном}$. Их отношение определяет номинальное сопротивление шунта ($R_{ш}$):

$$R_{ш} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}}. \quad (6.1)$$

Шунты применяются для расширения пределов измерения измерительных механизмов по току, при этом большую часть измеряемого тока пропускают через шунт, а меньшую – через измерительный механизм. Шунты имеют небольшое сопротивление и применяются, главным образом, в цепях постоянного тока с магнитоэлектрическими измерительными механизмами (рисунок 6.1).

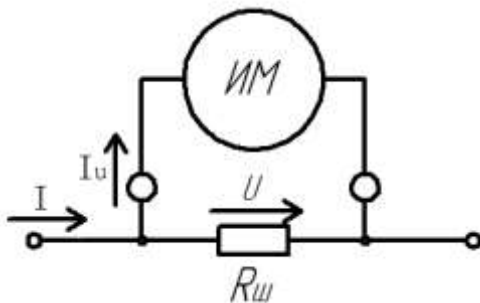


Рисунок 6.1. – Схема соединения измерительного механизма с шунтом

Трансформатор тока – трансформатор, первичная обмотка которого подключена к источнику тока, а вторичная обмотка замыкается на измерительные или защитные приборы, имеющие малые внутренние сопротивления.

Измерительный трансформатор тока – трансформатор, предназначенный для преобразования тока до значения, удобного для измерения. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в цепь с измеряемым переменным током, а во вторичную включаются измерительные приборы (рисунок 6.2). Ток, протекающий по вторичной обмотке трансформатора тока, пропорционален току, протекающему в его первичной обмотке.

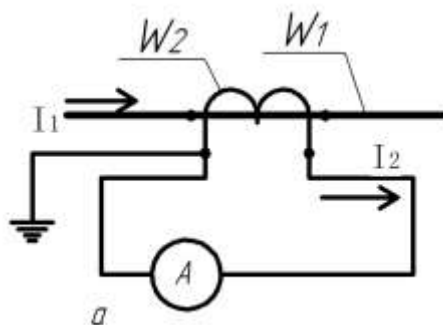


Рисунок 6.2. – Схема включения трансформатора тока

Трансформаторы тока широко используются для измерения электрического тока и в устройствах релейной защиты электроэнергетических систем, в связи с чем на них накладываются высокие требования по точности. Трансформаторы тока обеспечивают безопасность измерений, изолируя измерительные цепи от первичной цепи с высоким напряжением, часто составляющим сотни киловольт.

К трансформаторам тока предъявляются высокие требования по точности. Как правило, трансформатор тока выполняют с двумя и более группами вторичных обмоток: одна используется для подключения устройств защиты, другая, более точная, – для подключения средств учёта и измерения (например, электрических счётчиков).

Измерительные трансформаторы напряжения используют главным образом для подключения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока высокого напряжения. При этом электроизмерительные приборы оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Кроме того, измерительные трансформаторы дают возможность расширять пределы измерения приборов, т.е. измерять большие токи и напряжения с помощью сравнительно несложных приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений. В ряде случаев измерительные трансформаторы служат для подключения к цепям высокого напряжения обмоток реле, обеспечивающих защиту электрических установок от аварийных режимов (рисунок 6.3).

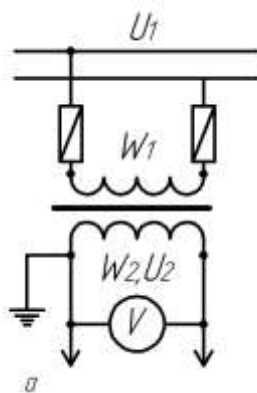


Рисунок 6.3. – Схема включения измерительного трансформатора напряжения

Трансформаторы напряжения служат для включения вольтметров, а также других приборов, реагирующих на значение напряжения (например, катушек напряже-

ния ваттметров, счетчиков, фазометров и различных реле). Трансформатор напряжения выполняют в виде двухобмоточного понижающего трансформатора. Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала вторичную обмотку тщательно изолируют от первичной и заземляют. Условное обозначение трансформатора напряжения такое же, как двухобмоточного трансформатора.

Так как сопротивления обмоток вольтметров и других приборов, подключаемых к трансформатору напряжения, велики, то он практически работает в режиме холостого хода.

Датчики тока на эффекте Холла предназначены для измерения постоянного или переменного токов с гальванической развязкой силовой цепи и цепей контроля. Конструкция датчиков тока включает в себя магнитопровод с зазором и компенсационной обмоткой, датчик Холла, электронную плату обработки сигналов. Магниточувствительный датчик Холла закреплен в зазоре магнитопровода и соединен с входом электронного усилителя.

При протекании измеряемого тока по шине, охватываемой магнитопроводом, в последнем наводится магнитная индукция. Датчик Холла, реагирующий на возникшее магнитное поле, вырабатывает напряжение, пропорциональное величине наведенной магнитной индукции. Выходной сигнал с датчика усиливается электронным усилителем и подается в компенсационную обмотку. В результате, по обмотке течет компенсационный ток, пропорциональный измеряемому току по величине и соответствующий ему по форме (рисунок 6.4).

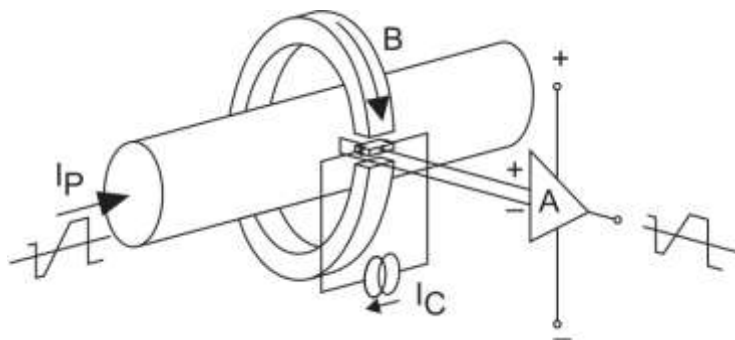


Рисунок 6.4. – Принцип действия датчика тока на эффекте Холла

Линейные датчики Холла могут быть использованы в составе измерителей силы тока в пределах от 250 мА до тысяч ампер. Важнейшим достоинством таких датчиков является полное отсутствие электрической связи с измеряемой цепью. Линейные датчики позволяют измерять постоянные и переменные токи, в том числе токи довольно высокой частоты. Если линейный датчик Холла расположен вблизи проводника с током, то выходное напряжение датчика пропорционально индукции магнитного поля, окружающего проводник. Величина индукции, в свою очередь, пропорциональна току.

Датчики напряжения, основанные на эффекте Холла, работают на тех же принципах, что и датчики тока. Практически они собраны на основе датчиков тока, а главное отличие состоит в первичной цепи, катушка которой изготовлена с большим коли-

чеством витков. Это позволяет создать необходимое количество ампер-витков для создания первичной индукции, и таким образом при минимальном значении первичного тока, обеспечивается небольшое потребление из входной цепи, т.е. цепи преобразуемого напряжения. Поэтому для измерения напряжения достаточно обеспечить первичный ток, эквивалентный этому напряжению, который и будет преобразовывать датчик. Это достигается с помощью резистора, последовательно соединенного с первичной обмоткой. Резистор может быть внешним или встроенным в корпус датчик.

В датчиках напряжения с внешним резистором используется тот же принцип работы, что и в датчике тока, описанном ранее, для определения значений напряжения и нагрузочного резистора подходят аналогичные правила. Дополнительно должно быть рассчитано значение внешнего резистора R .

В датчиках напряжения со встроенным резистором в качестве входного резистора R установлен резистор с расчетной мощностью рассеивания при номинальном напряжении и собственной погрешностью, идентичной погрешности датчиков. Встроенный входной резистор, выбранный в соответствии с номинальным входным напряжением – преимущество этих датчиков. Однако их измерительный диапазон ограничен полуторным увеличением номинального значения.

6.2. Порядок выполнения работы

6.2.1 Исследование шунта

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Собрать с помощью перемычек схему источника регулируемого напряжения, как на рисунке 6.5.

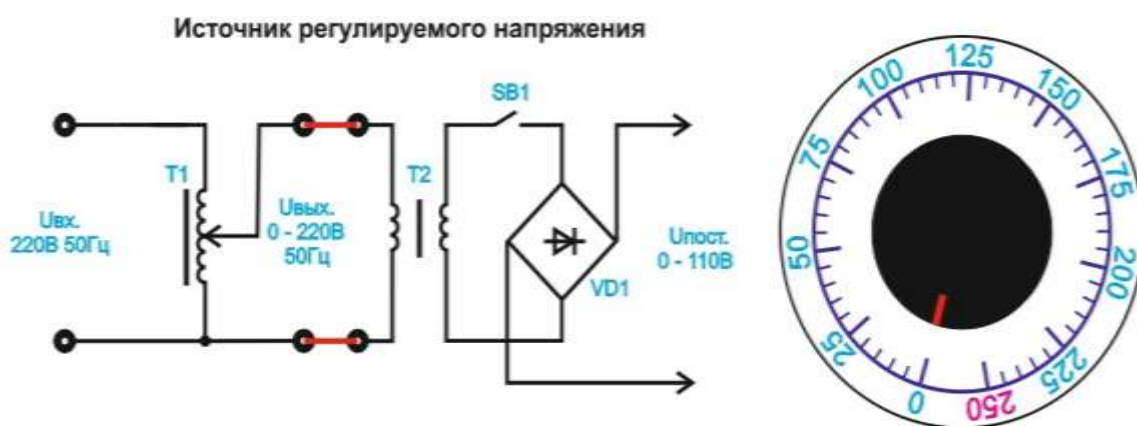


Рисунок 6.5. – Схема включения источника регулируемого напряжения

Собрать с помощью перемычек схему для исследования шунта (рисунок 6.6). Подключить мультиметры. На одном выставить предел измерений 200 мВ переменного напряжения, на другом – предел измерения 10 А переменного тока.

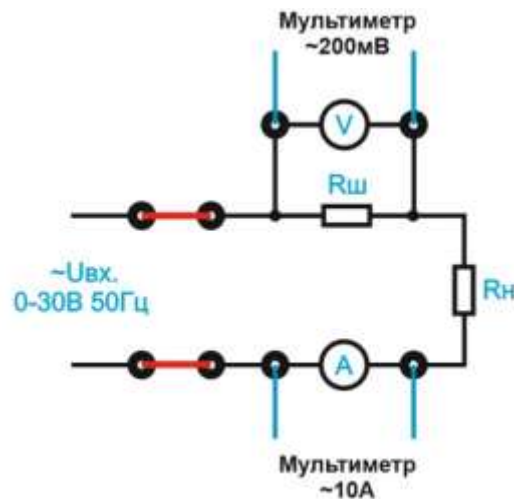


Рисунок 6.6. – Схема исследования шунта

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение.

Плавно повышать входное напряжение переводом ручки источника регулируемого напряжения по часовой стрелке от 0 до 30 В, при этом регистрировать значения напряжения $U_{ш}$ и тока $I_{н}$ по мультиметрам.

Для справки: в качестве источника регулируемого напряжения в стенде используется ЛАТР Т1 с диапазоном регулирования от 0 до 220 В. На выход ЛАТРа подключен трансформатор Т2 с тремя вторичными обмотками – первая на 110 В для питания электродвигателя М1, вторая на 30 В для питания схем исследования шунта и трансформатора тока, третья на 12 В для питания схемы исследования датчика тока на эффекте Холла. Регулировкой напряжения на ЛАТРе, можно изменять входное напряжение и выходное напряжение на трансформаторе Т2. В данной лабораторной работе диапазон регулирования напряжения для исследования шунта составляет от 0 до 30 В.

Полученные данные занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1. – Экспериментальные данные

$U_{вх}, В$	$U_{ш}, мВ$	$I_{н}, А$	$I_{ш}, А$
0			
5			
10			
15			
20			
25			
30			

С помощью закона Ома найти значения тока, протекающего через шунт (2). Сопротивление шунта 100 мОм.

$$I_{ш} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}}. \quad (6.2)$$

Сравнить расчетные значения тока шунта с полученными во время эксперимента. Сделать соответствующие выводы. Построить статическую характеристику $U_{ш} = f(U_{вх})$

По окончании работы перевести регулятор ЛАТРа в крайнее левое положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить все перемычки и мультиметры.

6.2.2 Исследование трансформатора тока

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220В, 50Гц.

Собрать с помощью перемычек схему источника регулируемого напряжения (см. рисунок 6.5). Собрать с помощью перемычек схему для исследования трансформатора тока (рисунок 6.7.). Подключить мультиметры. На одном выставить предел измерений 200 мА переменного тока, на другом – предел измерения 10 А переменного тока.

ВНИМАНИЕ! Не включать схему без мультиметра на вторичной обмотке W2, во избежание выхода из строя трансформатора тока.

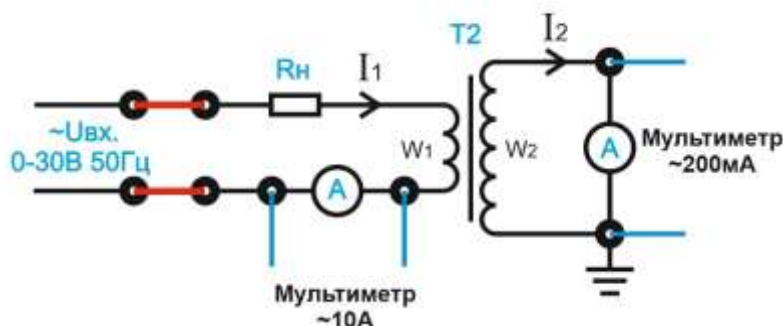


Рисунок 6.7. – Схема исследования трансформатора тока

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение.

Плавно повышать входное напряжение переводом ручки источника регулируемого напряжения по часовой стрелке от 0 до 30 В, при этом регистрировать значения тока I_1 и тока I_2 по мультиметрам. Сопротивление нагрузки $R_H = 100 \text{ Ом}$.

Полученные данные занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2. – Экспериментальные данные

$U_{вх}, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		

Построить статическую характеристику $I_2 = f(I_1)$.

По окончании работы перевести регулятор ЛАТРа в крайнее левое положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить все перемычки и мультиметры.

6.2.3 Исследование измерительного трансформатора напряжения

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Собрать с помощью перемычек схему источника регулируемого напряжения (см. рисунок 6.5). Собрать с помощью перемычек схему для исследования трансформатора напряжения (рисунок 6.8.). Подключить мультиметры. На одном выставить предел измерений 700 В переменного напряжения, на другом – предел измерения 200 В переменного напряжения.

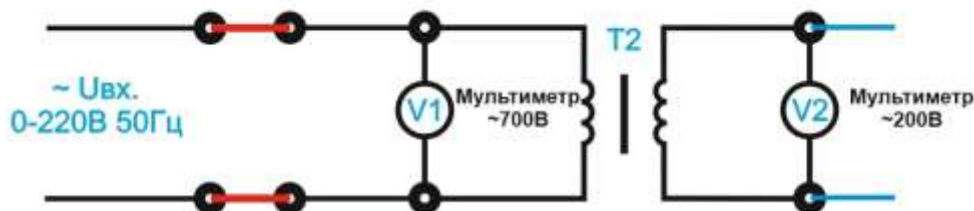


Рисунок 6.8. – Схема исследования измерительного трансформатора напряжения

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение.

Плавно повышать входное напряжение переводом ручки источника регулируемого напряжения по часовой стрелке от 0 до 220 В, при этом регистрировать значения напряжения U_1 и U_2 по мультиметрам.

Полученные данные занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3. – Экспериментальные данные

U_1 , В	U_2 , В
0	
20	
40	
60	
80	
100	
120	
140	
160	
180	
200	
220	

Построить статическую характеристику $U_2=f(U_1)$

По окончании работы перевести регулятор ЛАТРа в крайнее левое положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить все перемычки и мультиметры.

6.2.4 Исследование датчика тока на эффекте Холла

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Собрать с помощью перемычек схему источника регулируемого напряжения (см. рисунок 6.5). Собрать с помощью перемычек схемы для исследования датчика тока на эффекте Холла (рисунки 6.9, 6.10).

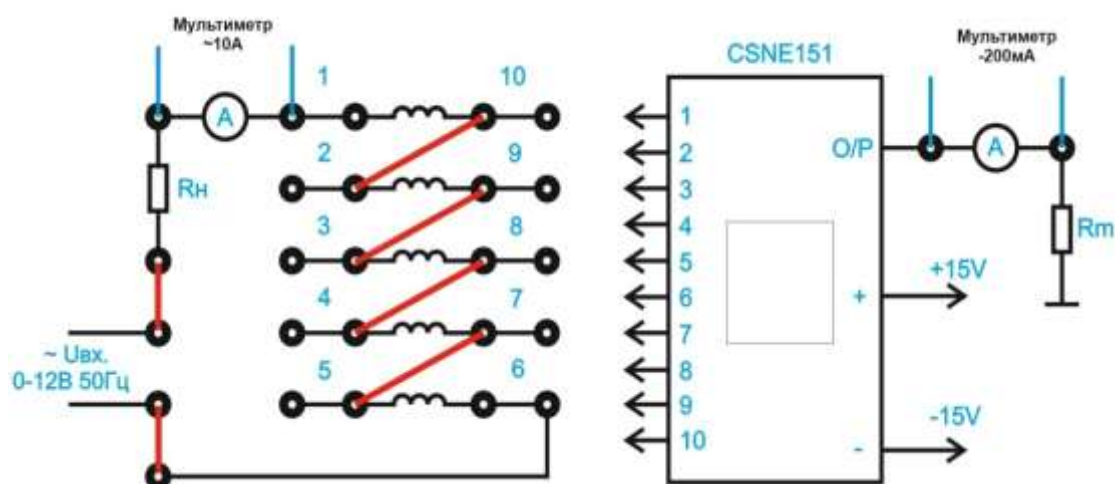


Рисунок 6.9. – Схема исследования датчика тока на эффекте Холла при $I_{ex} = 5 \text{ A}$

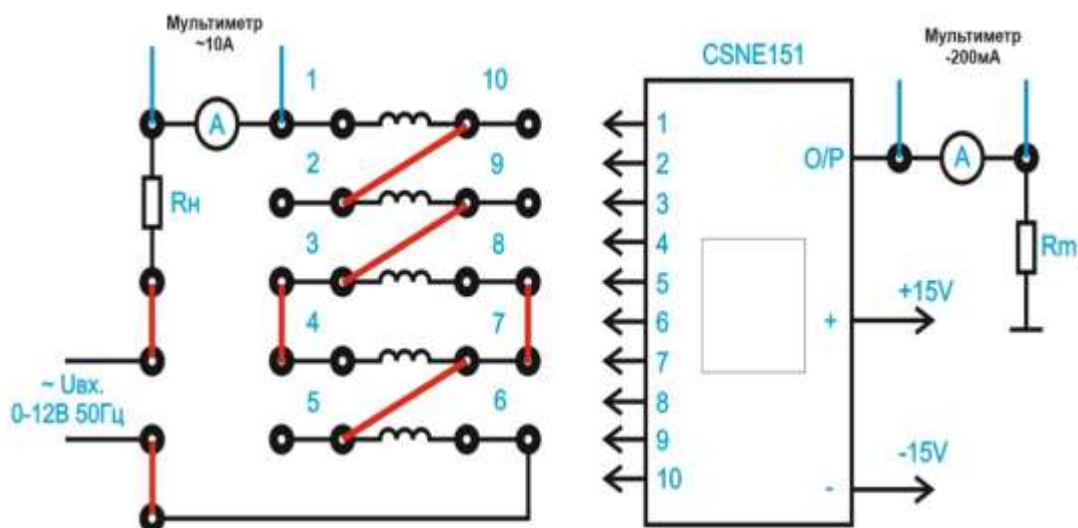


Рисунок 6.10. – Схема исследования датчика тока на эффекте Холла при $I_{ex} = 7 \text{ A}$

Подключить мультиметры. На одном выставить предел измерений 10 А переменного тока, на другом – предел измерения 200 мА переменного тока. Для подклю-

чения мультиметров к гнездам использовать переходники, входящие в комплект стенда. R_H – нагрузочный резистор, $R_H = 2 \text{ Ом}$. R_m – измерительный резистор, $R_m = 300 \text{ Ом}$.

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение.

Плавно повышать входное напряжение переводом ручки источника регулируемого напряжения по часовой стрелке от 0 до 12 В, при этом регистрировать значения входного тока I_1 и выходного тока I_2 по мультиметрам.

ВНИМАНИЕ! Не включать схемы на продолжительное время (больше 2 минут) при максимальном входном напряжении 12 В, во избежание перегрева трансформатора.

Полученные данные занести в таблицу 6.4.

Таблица 6.4. – Экспериментальные данные

$U_{вх}, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{мА}$
0		
2		
4		
6		
8		
10		
12		

Построить статическую характеристику $I_2 = f(I_1)$

По окончании работы перевести регулятор ЛАТРа в крайнее левое положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить все перемычки и мультиметры.

6.2.5 Исследование датчика напряжения на эффекте Холла

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Собрать с помощью перемычек схему источника регулируемого напряжения (см. рисунок 6.5). Собрать с помощью перемычек схему для исследования датчика напряжения на эффекте Холла (рисунок 6.11.).

Подключить мультиметры. На одном выставить предел измерений 700 В переменного напряжения, на другом – предел измерения 200 мА переменного тока. R_H – нагрузочный резистор, $R_H = 27 \text{ кОм}$. R_m – измерительный резистор, $R_m = 300 \text{ Ом}$.

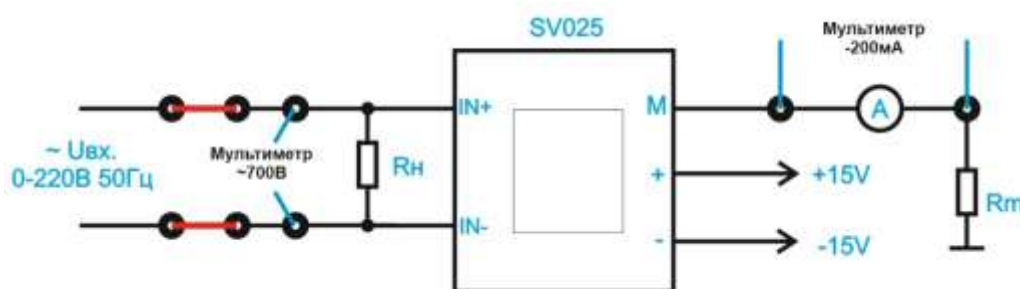


Рисунок 6.11. – Схема исследования датчика напряжения на эффекте Холла

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение.

Плавно повышать входное напряжение переводом ручки источника регулируемого напряжения по часовой стрелке от 0 до 220 В, при этом регистрировать значения входного напряжения U и выходного тока I по мультиметрам.

Полученные данные занести в таблицу 6.5.

Таблица 6.5. – Экспериментальные данные

U , В	I , мА
0	
20	
40	
60	
80	
100	
120	
140	
160	
180	
200	
220	

Построить статическую характеристику $I = f(U)$

По окончании работы перевести регулятор ЛАТРа в крайнее левое положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить все перемычки и мультиметры.

6.3. Вопросы для самопроверки

1. Поясните методы расширения пределов измерительных приборов с помощью резисторов.
2. Достоинства бесконтактных методов измерения силы тока.
3. Требования, предъявляемые к измерительным трансформаторам тока и напряжения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить устройство, принцип работы и характеристики датчиков температуры.

7.1. Краткие теоретические сведения

Термопара (термоэлектрический преобразователь) – устройство, применяемое для измерения температуры в промышленности, научных исследованиях, медицине, в системах автоматики. Международный стандарт на термопары дает следующее определение термопары: «***термопара** – пара проводников из различных материалов, соединенных на одном конце и формирующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерения температуры*».

Для измерения разности температур зон, ни в одной из которых не находится вторичный преобразователь (измеритель термо-ЭДС), удобно использовать дифференциальную термопару: две одинаковых термопары, соединенных навстречу друг другу. Каждая из них измеряет перепад температур между своим рабочим спаем и условным спаем, образованным концами термопар, подключёнными к клеммам вторичного преобразователя, но вторичный преобразователь измеряет разность их сигналов, таким образом, две термопары вместе измеряют перепад температур между своими рабочими спаями.

Терморезистор – полупроводниковый резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводникового или металлического материала от температуры.

Для терморезистора характерны большой температурный коэффициент сопротивления (ТКС) (в десятки раз превышающий этот коэффициент у металлов), простота устройства, способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках, относительно невысокая долговременная стабильность характеристик. Основными параметрами терморезистора являются: номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, интервал рабочих температур, максимально допустимая мощность рассеяния.

Различают терморезисторы с отрицательным (термисторы) и положительным (позисторы) ТКС. Их ещё называют NTC-термисторы (Negative temperature coefficient) и PTC-термисторы (Positive temperature coefficient). У позисторов с ростом температуры растёт и сопротивление, а у термисторов, наоборот, при увеличении температуры сопротивление падает.

Цифровые датчики температуры предназначены для измерения и мониторинга температуры собственного корпуса и температуры удаленного объекта. Во втором случае измерение производится при помощи внешних термодатчиков (кремниевых диодов). Цифровые датчики объединяют на кристалле кремниевый термодатчик, АЦП (до 14 бит), регистры верхнего и нижнего значения собственной температуры

и температуры удаленных датчиков, регистры конфигурации и гистерезиса, аналоговые компараторы, логику управления и реализации протоколов последовательной передачи данных и стабилизатор питания. Цифровые датчики температуры, обладают невысокой стоимостью, компактным исполнением и низким током потребления. Они позволяют просто и эффективно решить задачу отслеживания температуры важных компонентов устройства (силовые полупроводниковые модули и транзисторы, процессоры, обмотки двигателей и т.д.) и при возникновении перегрева сформировать сигнал тревоги или прерывания.

Аналоговые полупроводниковые датчики температуры предназначены для линейного преобразования значения окружающей температуры или температуры какого-либо объекта в постоянное напряжение. Линейка этих приборов характеризуется большим разнообразием конструктивных исполнений (от миниатюрного MicroSMD корпуса до стандартного ТО-220), широким диапазоном рабочих температур (есть модели $-55 \dots +150 \text{ }^{\circ}\text{C}$), высокой точностью (до $1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в рабочем диапазоне), заводской калибровкой, малым током потребления и низкой стоимостью.

7.2. Порядок выполнения работы

ВНИМАНИЕ! Перед каждым новым опытом убедиться, что нагревательный элемент остыл до 20-25 градусов.

7.2.1 Исследование датчика температуры с отрицательным ТКС

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Подключить первый мультиметр к гнездам термопары и выставить на нем режим измерения температуры. Другой мультиметр подключить к гнездам датчика температуры с отрицательным ТКС и выставить предел измерений 20 кОм (рисунок 7.1).

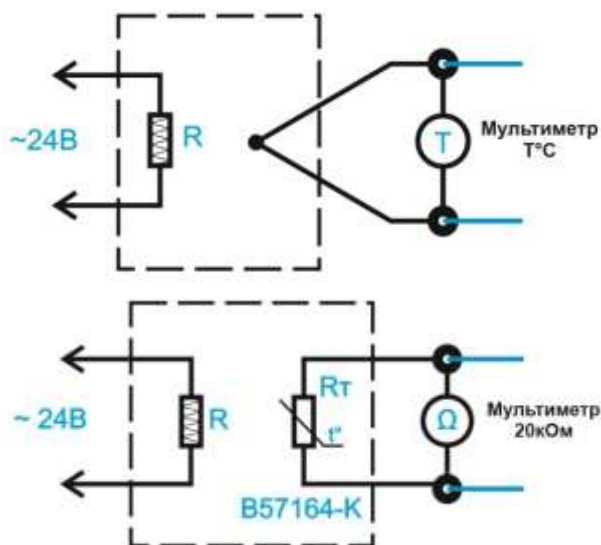


Рисунок 7.1. – Схема исследования датчика температуры с отрицательным ТКС

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение. Перевести тумблер «НАГРЕВ» в верхнее положение.

Регистрировать значения температуры и сопротивления датчика. Полученные данные занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1. – Экспериментальные данные

$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{кОм}$
20	
30	
40	
50	
60	
70	

Построить статическую характеристику $R = f(T)$

По окончании работы перевести тумблер «НАГРЕВ» в нижнее положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить мультиметры.

7.2.2 Исследование датчика температуры с положительным ТКС

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Подключить первый мультиметр к гнездам термопары и выставить на нем режим измерения температуры. Другой мультиметр подключить к гнездам датчика температуры с отрицательным ТКС и выставить предел измерений 1 кОм (рисунок 7.2).

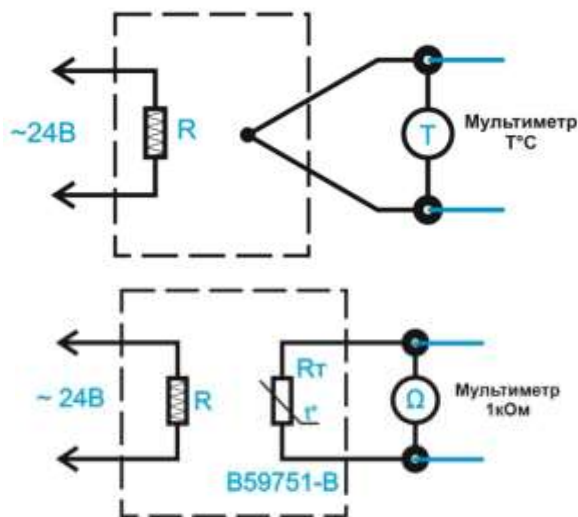


Рисунок 7.2. – Схема исследования датчика температуры с положительным ТКС

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение. Перевести тумблер «НАГРЕВ» в верхнее положение.

Регистрировать значения температуры и сопротивления датчика. Полученные данные занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2. – Экспериментальные данные

$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{кОм}$
20	
30	
40	
50	
60	
70	

Построить статическую характеристику $R = f(T)$.

По окончании работы перевести тумблер «НАГРЕВ» в нижнее положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить мультиметры.

7.2.3 Исследование аналогового датчика температуры

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Подключить первый мультиметр к гнездам термопары и выставить на нем режим измерения температуры. Другой мультиметр подключить к гнездам аналогового датчика температуры и выставить предел измерений 20 В постоянного напряжения (рисунок 7.3).

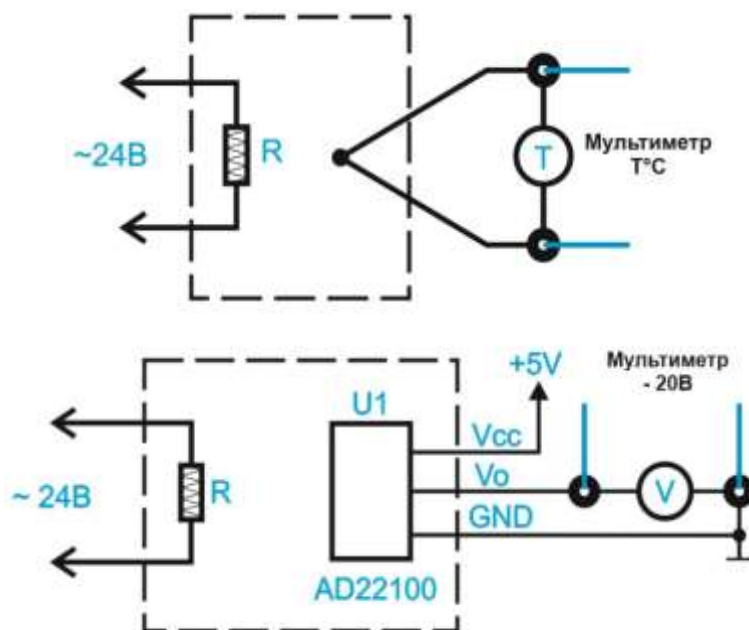


Рисунок 7.3. – Схема исследования аналогового датчика температуры

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение. Перевести тумблер «НАГРЕВ» в верхнее положение.

Регистрировать значения температуры и напряжения датчика температуры. Полученные данные занести в таблицу 7.3.

Таблица 7.3. – Экспериментальные данные

$T, ^\circ\text{C}$	$U, \text{В}$
20	
30	
40	
50	
60	
70	

Построить статическую характеристику $U = f(T)$.

По окончании работы перевести тумблер «НАГРЕВ» в нижнее положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить мультиметры.

7.2.4 Исследование цифрового датчика температуры

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Подключить первый мультиметр к гнездам термопары и выставить на нем режим измерения температуры (рисунок 7.4).

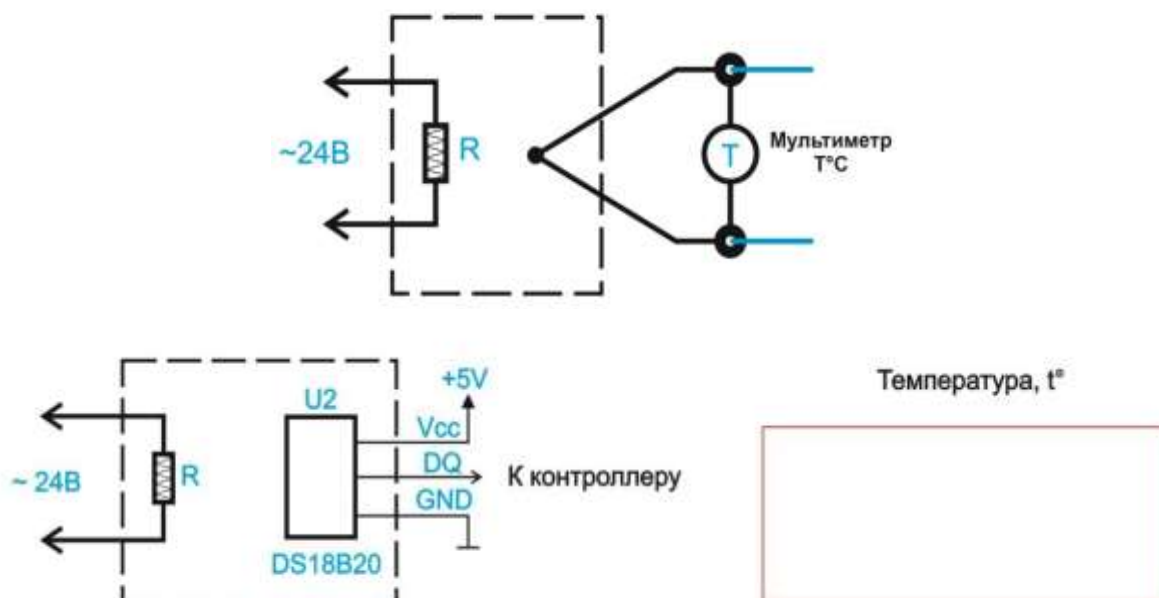


Рисунок 7.4. – Схема исследования цифрового датчика температуры

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение. Перевести тумблер «НАГРЕВ» в верхнее положение.

Регистрировать значения температуры термопары и цифрового датчика температуры, а также время разогрева цифрового датчика температуры. Полученные данные занести в таблицу 7.4.

Таблица 7.4. – Экспериментальные данные

$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	t, c
20		
30		
40		
50		
60		
70		

Построить динамическую характеристику $t = f(T)$.

По окончании работы перевести тумблер «НАГРЕВ» в нижнее положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить мультиметры.

7.2.5 Исследование термопары

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Подключить мультиметр к гнездам термопары и выставить на нем режим измерения 200 мВ. Для контроля над температурой использовать любой другой датчик, исследуемый ранее (рисунок 7.5).

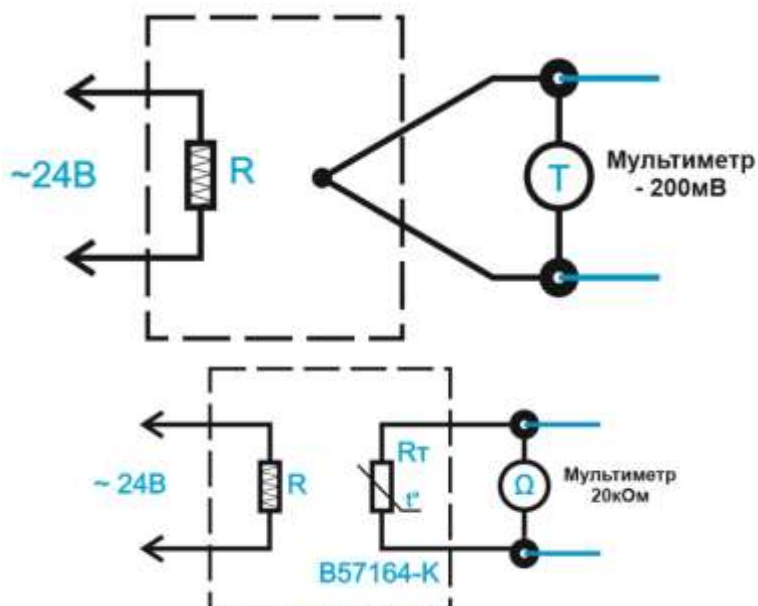


Рисунок 7.5. – Схема исследования цифрового датчика температуры

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение. Перевести тумблер «НАГРЕВ» в верхнее положение.

Регистрировать значения напряжения на выходе термопары. Полученные данные занести в таблицу 7.5.

Таблица 7.5. – Экспериментальные данные

$T, ^\circ\text{C}$	$U_T, \text{мВ}$
20	
30	
40	
50	
60	
70	

Построить статическую характеристику $U_T = f(T)$

По окончании работы перевести тумблер «НАГРЕВ» в нижнее положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить мультиметры.

7.3. Вопросы для самопроверки

1. В чем отличие позистора от термистора?
2. Приведите размерность ТКС.
3. Состав цифрового датчика температуры.
4. Методы линеаризации характеристик терморезисторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАХОГЕНЕРАТОРА И ЭНКОДЕРА

Цель работы: изучить принцип работы и исследовать характеристики тахогенератора и энкодера.

8.1. Краткие теоретические сведения

Тахогенераторы – электрические машины малой мощности, работающие в режиме генератора, выходное напряжение которых U_f является практически линейной функцией частоты вращения вала n . Такие машины используются в автоматических системах управления и регулирования для измерения частоты вращения, дифференцирования, обратной связи по скорости и других операций. В качестве тахогенераторов применяются генераторы постоянного и переменного токов, в том числе синхронные и асинхронные генераторы. Обычно мощность таких машин менее 50 кВт.

Энкодеры – преобразователи угловых перемещений – устройства, предназначенные для преобразования угла поворота вращающегося объекта (вала) в электрические сигналы, позволяющие определить угол его поворота. Энкодеры подразделяются на инкрементальные и абсолютные, которые могут достигать очень высокого разрешения. Инкрементальный энкодер выдает за один оборот определенное количество импульсов. Абсолютные энкодеры позволяют в любой момент времени знать текущий угол поворота оси, в том числе и после пропадания и восстановления питания. Многооборотные абсолютные энкодеры, кроме того, также подсчитывают и запоминают количество полных оборотов оси.

Энкодеры могут быть оптическими, резисторными, магнитными и работать через шинные интерфейсы или промышленную сеть. Энкодеры широко применяются для контроля промышленных процессов, в измерительных устройствах, промышленных роботах, в разделительных плоттерах, устройствах для обработки дерева, стекла, цемента, мрамора, в кожевенной и текстильной промышленности, в оборудовании для переработки отходов, мостовых крана, упаковочном оборудовании, при позиционировании и контроле скорости и координат в самых различных областях, включая металлообрабатывающие станки, подъёмное и упаковочное оборудование и др.

8.2. Порядок выполнения работы

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Собрать схему источника регулируемого напряжения (см. рисунок 6.5). Подключить мультиметр к гнездам тахогенератора (рисунок 8.1). Выставить предел измерения 20 В постоянного напряжения.

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение. Перевести переключатель SB1 в верхнее положение. Плавно повышать напряжение ЛАТРа от 0 до 220 В, тем самым увеличивать частоту вращения гонного двигателя М1.

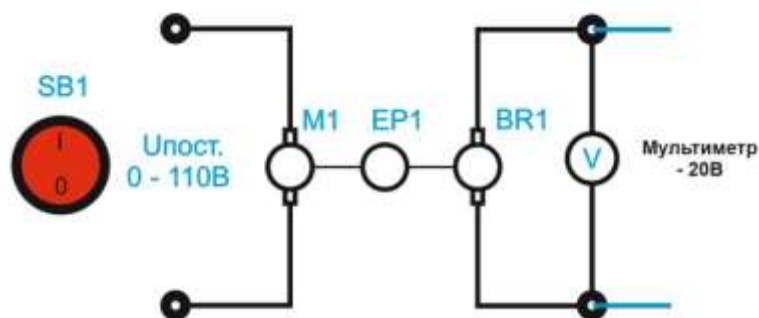


Рисунок 8.1. – Схема исследования тахогенератора и энкодера

Регистрировать значение частоты вращения на приборе EP1 и значение выходного напряжения на тахогенераторе. Полученные данные занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1. – Экспериментальные данные

n , об/мин	U_r , В	n_r , об/мин
200		
400		
600		
800		
1000		
1200		
1400		
1600		
1800		
2000		
2200		
2400		
2600		
2800		
3000		
3200		

Построить характеристику $U_r = f(n)$.

Найти скорость вращения тахогенератора, из расчета 1 В = 928 об/мин. Сравнить показания скорости вращения тахогенератора и энкодера.

По окончании работы перевести тумблер SB1 в нижнее положение, перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в нижнее положение, отсоединить мультиметры.

8.3. Вопросы для самопроверки

1. Назначение тахогенератора и энкодера.
2. Приведите классификацию энкодеров и примеры их применения.
3. Определите размерность выходных величин тахогенератора и энкодера.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Цель работы: изучить принцип работы и исследовать характеристики датчиков линейного перемещения

9.1. Краткие теоретические сведения

Потенциометрические датчики перемещения. Датчик данного типа в своей основе имеет электрический контур, содержащий потенциометр (рисунок 9.1). Линейное перемещение объекта приводит к изменению сопротивления потенциометра (переменного резистора). Если через потенциометр пропускать постоянный ток, то падение напряжения на нём будет пропорционально величине сопротивления и, следовательно, величине линейного перемещения интересующего объекта.

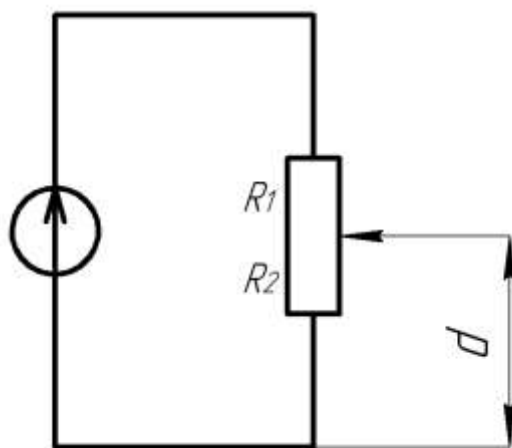


Рисунок 9.1. – Потенциометрический датчик перемещения

Наряду с механическими датчиками перемещения, потенциометрические датчики получили наиболее широкое распространение в силу своей простоты и низкой стоимости, однако для универсальных, прецизионных и бесконтактных измерений в последнее время всё чаще используются датчики на основе оптических эффектов.

Оптические датчики перемещения. Существует множество вариаций схем датчиков перемещения, основанных на различных оптических эффектах. Пожалуй, наиболее популярной является схема оптической триангуляции – датчик положения является, по сути, дальномером, который определяет расстояние до интересующего объекта, фиксируя рассеянное поверхностью объекта излучение и определяя угол отражения, что даёт возможность определить длину d – расстояние до объекта (рисунок 9.2.). Важным достоинством большинства оптических датчиков является возможность производить бесконтактные измерения, кроме того, такие датчики обычно довольно точны и имеют высокое быстродействие.

В другой реализации оптического датчика, предназначенной для регистрации и определения параметров малых перемещений и вибраций, используется двойная

решётчатая конструкция, а также источник света и фотодетектор (рисунок 9.3). Одна решётка неподвижна, вторая подвижна и может быть механически закреплена на интересующем объекте или каким-либо способом передавать датчику его движение. Малое смещение подвижной решётки приводит к изменению интенсивности света, регистрируемой фотодетектором, причём с уменьшением периода решётки точность датчика возрастает, однако сужается его динамический диапазон.

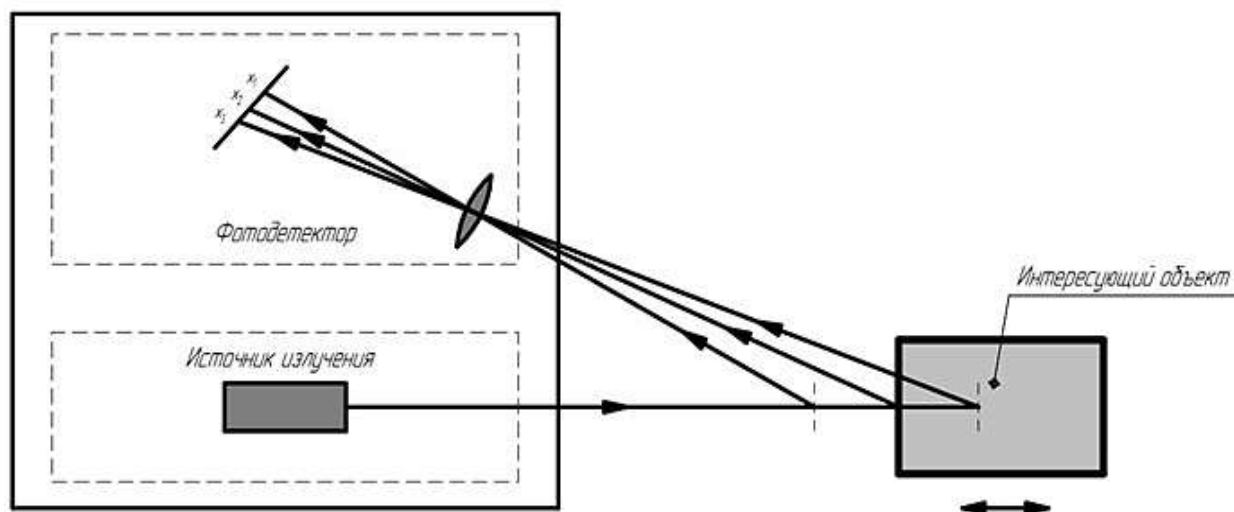


Рисунок 9.2. – Оптический датчик перемещения на основе схемы оптической триангуляции

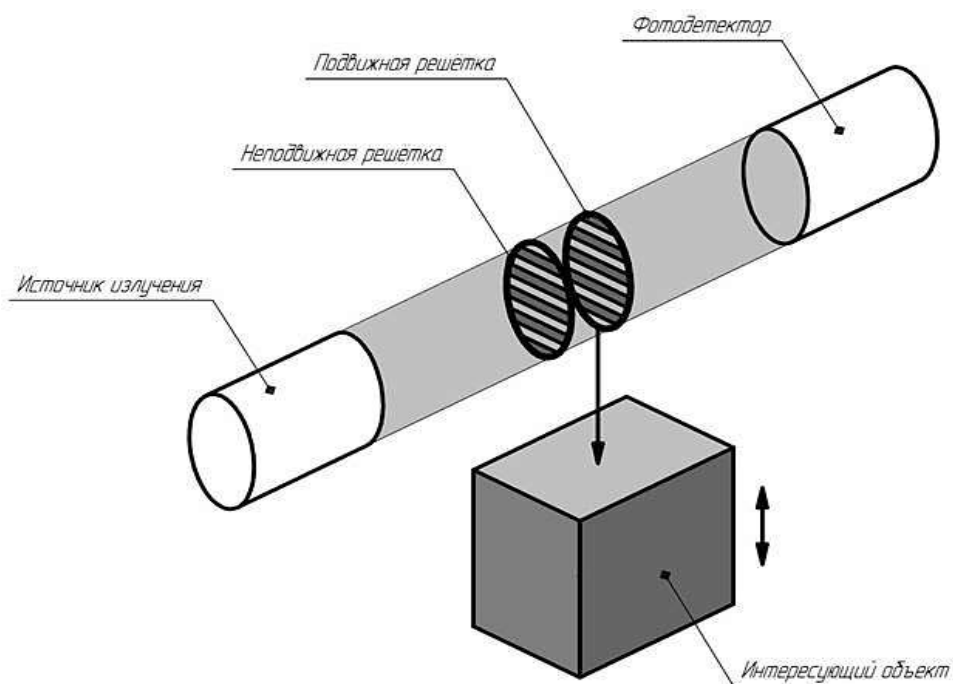


Рисунок 9.3. – Оптический датчик перемещения на основе дифракционных решеток

Дополнительными возможностями применения обладают оптические датчики, учитывающие поляризацию света. В таких датчиках может быть реализован алгоритм селекции объектов по отражательным свойствам поверхности, т.е. датчик может «обращать внимание» только на объекты с хорошей отражающей способностью,

прочие объекты игнорируются. Разумеется, чувствительность к поляризации негативно сказывается на стоимости подобных устройств.

Ёмкостные датчики перемещения. В основе работы датчиков данного типа лежит взаимосвязь ёмкости конденсатора с его геометрической конфигурацией. В простейшем случае речь идёт об изменении расстояния между пластинами вследствие внешнего физического воздействия (рисунок 9.4.). Поскольку ёмкость конденсатора изменяется обратно пропорционально величине зазора между пластинами, определение ёмкости, при прочих известных параметрах, позволяет судить о расстоянии между пластинами. Изменение ёмкости можно зафиксировать различными способами (например, измеряя его импеданс), однако в любом случае конденсатор необходимо включить в электрическую цепь.

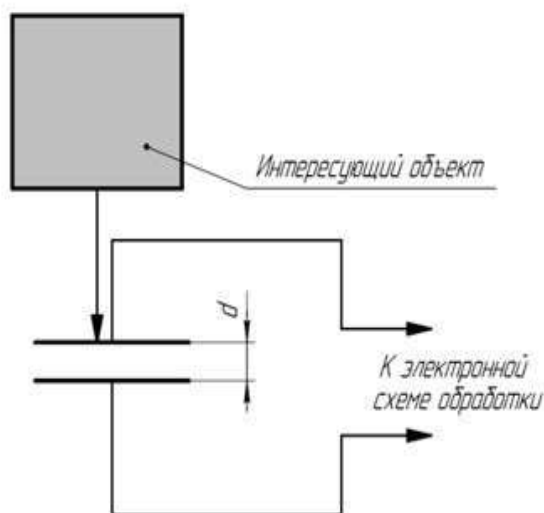


Рисунок 9.4. – Ёмкостной датчик линейного перемещения с изменяющейся величиной зазора

Другой схемой, где выходным параметром служит электрическая ёмкость, является схема, содержащая конденсатор с подвижным диэлектриком (рисунок 9.5.). Перемещение диэлектрической пластины между обкладками конденсатора также приводит к изменению его ёмкости. Пластина может быть механически связана с интересующим объектом, и в этом случае изменение ёмкости свидетельствует о перемещении объекта. Кроме того, если объект обладает свойствами диэлектрика и имеет подходящие габариты, то он может быть использован непосредственно в качестве диэлектрической среды в конденсаторе.

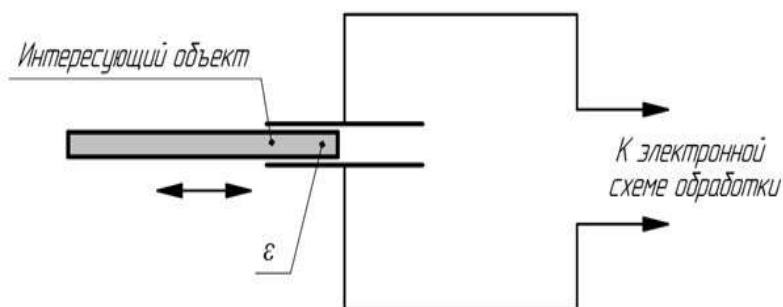


Рисунок 9.5. – Ёмкостной датчик линейного перемещения с подвижным диэлектриком

Индуктивные датчики перемещения. В одной из конфигураций датчика данного типа чувствительным элементом является трансформатор с подвижным сердечником. Перемещение внешнего объекта приводит к перемещению сердечника, что вызывает изменение потокоцепления между первичной и вторичной обмотками трансформатора (рисунок 9.6.). Поскольку амплитуда сигнала во вторичной обмотке зависит от потокоцепления, по величине амплитуды вторичной обмотки можно судить о положении сердечника, а значит и о положении внешнего объекта.

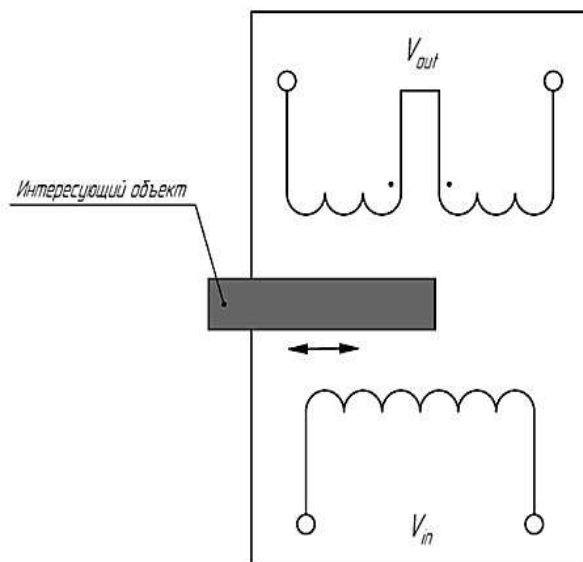


Рисунок 9.6. – Индуктивный датчик перемещения на трансформаторе

Другая конфигурация имеет более простую схему, однако она пригодна лишь для небольшого количества приложений, где требуется определять незначительные перемещения или вибрации объектов, состоящих из ферромагнитного материала. Здесь интересующий ферромагнитный объект играет роль магнитопровода, положение которого влияет на индуктивность измерительной катушки (рисунок 9.7).

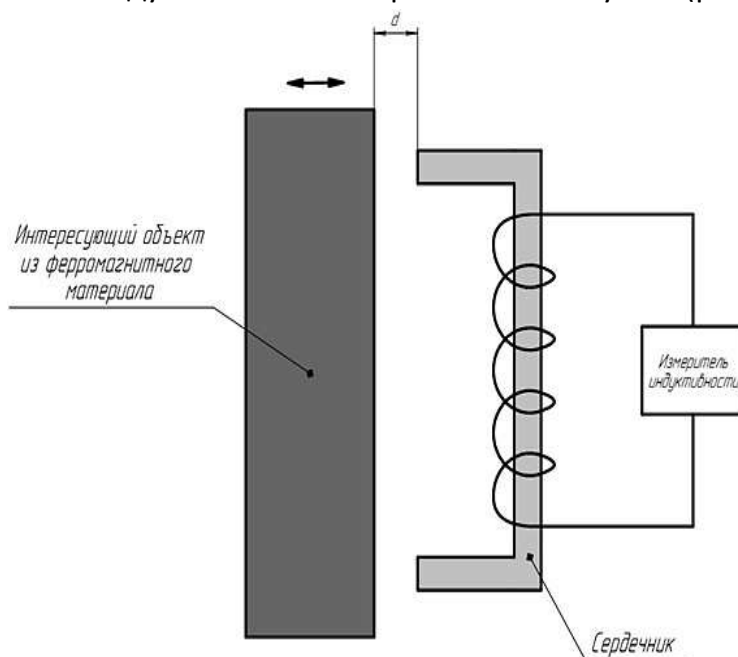


Рисунок 9.7. – Индуктивный датчик перемещения для объектов из ферромагнитных материалов

Ультразвуковые датчики перемещения. В ультразвуковых датчиках реализован принцип радара – фиксируются отражённые от объекта ультразвуковые волны, поэтому структурная схема обычно представлена источником ультразвуковых волн и регистратором (рисунок 9.8), которые обычно заключены в компактный корпус. Определение временной задержки между моментами отправки и приёма ультразвукового импульса позволяет измерять расстояние до объекта с точностью, достигающей до десятых долей миллиметра. Наряду с оптическими, ультразвуковые датчики на сегодняшний день являются, пожалуй, наиболее универсальным и технологичным бесконтактным средством измерения. Использование этого принципа измерений, опять же, можно найти в детекторах обнаружения дефектов, только на этот раз уже в ультразвуковых дефектоскопах.

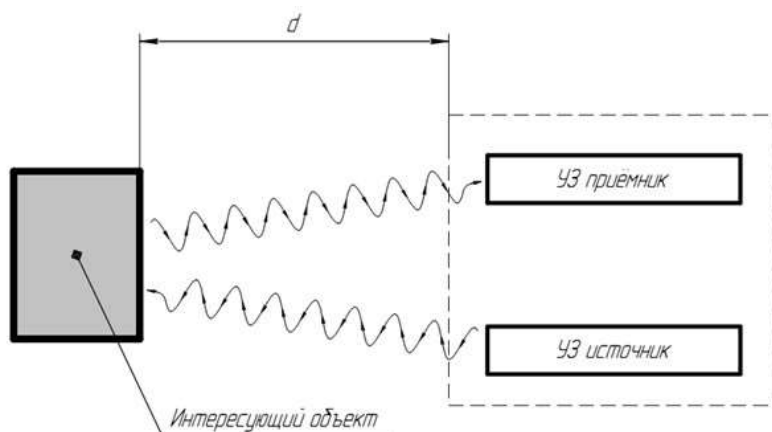


Рисунок 9.8. – Ультразвуковой датчик перемещения

9.2. Порядок выполнения работы

9.2.1 Исследование резистивного датчика линейного перемещения

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Подключить мультиметр к гнездам резистивного датчика (рисунок 9.9). Выставить предел измерения 200 кОм.



Рисунок 9.9. – Схема подключения мультиметра для исследования резистивного датчика линейного перемещения

Перемещая ползунок резистора вправо, регистрировать значения сопротивления R и перемещения X . Полученные данные занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1. – Экспериментальные данные

X , м	R , Ом

Построить статическую характеристику $R = f(X)$.

По окончании работы переместить ползунок резистора в начальное положение, отсоединить мультиметр, отключить питание стенда переводом автоматического выключателя «СЕТЬ» в нижнее положение.

9.2.2 Исследование оптоэлектрического датчика линейного перемещения

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Вставить кодовую линейку в отверстие. Параметры кодовой линейки: длина кодовой линейки $L = 123$ мм; количество отверстий $N = 20$.

1. Выставить кодовую линейку на нулевое значение. При необходимости сбросить показания счетчика нажатием кнопки SB4.

2. Перевести тумблер SB3 в верхнее положение «Диодная оптопара».

3. Передвигать кодовую линейку вправо, регистрировать количество «шагов» N и перемещение X . Полученные данные занести в таблицу 9.2.

Перевести тумблер SB3 в нижнее положение «Транзисторная оптопара». Повторить пункты 1–3.

Таблица 9.2. – Экспериментальные данные

Диодная оптопара		Транзисторная оптопара	
X , м	N , шаг	X , м	N , шаг

Построить статическую характеристику $N = f(X)$ для каждого типа оптопар.

По окончании работы извлечь кодовую линейку, отключить питание стенда переводом автоматического выключателя «СЕТЬ» в нижнее положение.

9.2.3 Исследование ёмкостного датчика линейного перемещения

Подключить мультиметр к гнездам ёмкостного датчика линейного перемещения (рисунок 9.10.). Для этого переставить измерительные щупы на мультиметре в гнездо C_x и COM, выставить предел измерения 20 nF, нажать кнопку C_x/L_x .

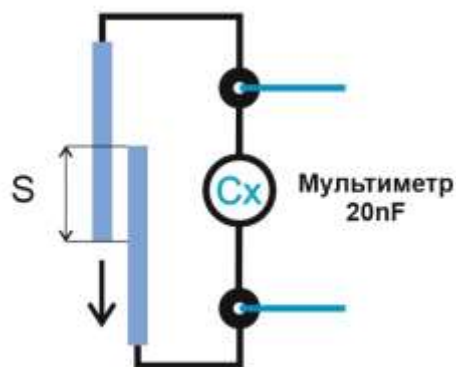


Рисунок 9.10. – Схема подключения мультиметра для исследования ёмкостного датчика линейного перемещения

Передвигать пластину датчика ручкой вправо, регистрируя значения емкости и перемещения. Полученные данные занести в таблицу 9.3.

Таблица 9.3. – Экспериментальные данные

X , м	C_x , nF

Построить статическую характеристику $C_x = f(X)$.

По окончании работы, вернуть пластину датчика в исходное положение.

9.2.4 Исследование индуктивного датчика линейного перемещения

Подключить мультиметр к гнездам индуктивного датчика линейного перемещения (рисунок 9.11). Для этого переставить измерительные щупы на мультиметре в гнездо L_x и COM, выставить предел измерения 20 мН, нажать кнопку C_x/L_x .

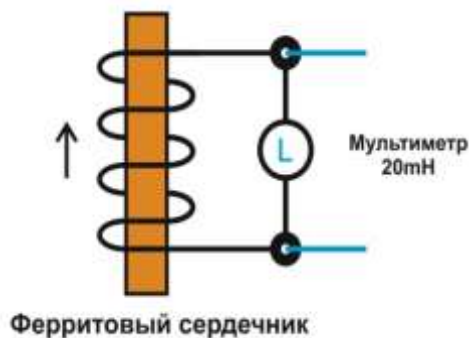


Рисунок 9.11. - Схема подключения мультиметра для исследования индуктивного датчика линейного перемещения

Передвигать ферритовый сердечник (входит в комплект стенда) влево, регистрируя значения индуктивности катушки и перемещения сердечника. Полученные данные занести в таблицу 9.4.

Таблица 9.4. – Экспериментальные данные

$X, \text{ м}$	$L_x, \text{ мН}$

Построить статическую характеристику $L_x = f(X)$.

По окончании работы извлечь ферритовый сердечник из катушки, отсоединить и отключить мультиметр.

9.2.5 Исследование ультразвукового датчика линейного перемещения

Подключить стенд к однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Подключить ультразвуковой датчик в разъем XS1 (рисунок 9.12).



Рисунок 9.12. – Схема подключения ультразвукового датчика линейного перемещения

Перевести автоматический выключатель «СЕТЬ» в верхнее положение.

Направить датчик на объект или поверхность (например, стена или пол) на расстояние не более 1,8 м. Индикатор X показывает расстояние в метрах до объекта, вспомогательные светодиоды указывают насколько близко или далеко находится объект. С помощью рулетки или линейки снять и сравнить показания датчика и рулетки(линейки). Полученные данные занести в таблицу 9.5.

Таблица 9.5. – Экспериментальные данные

Ультразвуковой датчик	Рулетка (линейка)
$X, \text{ м}$	$X, \text{ м}$

По окончании работы отключить ультразвуковой датчик, отключить питание стенда переводом автоматического выключателя «СЕТЬ» в нижнее положение.

9.3. Вопросы для самопроверки

1. Сравните точность измерений линейного перемещения, полученного различными по принципу действия датчиками.
2. Какие датчики линейного перемещения являются бесконтактными, а какие – контактными?»?
3. Оцените погрешность измерений различных датчиков, приняв за образцовые показания измерительной рулетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миленина, С.А. Электротехника, электроника и схемотехника: учебник и практикум для академического бакалавриата / С. А. Миленина; под ред. Н.К. Миленина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2019. – 405 с.
2. Авдейко, В.П. Электротехника, основы электроники и электропривод: учеб.-метод. комплекс для студентов техн. специальностей неэлектротехн. профиля. В 2 ч. – Ч. 1. Электротехника / В.П. Авдейко, А.С. Вершинин, А.Л. Адамович. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – 312 с.
3. Авдейко, В.П. Электротехника, основы электроники и электропривод: учеб.-метод. комплекс для студентов тех. специальностей неэлектротехн. профиля. В 2 ч. – Ч. 2. Основы электроники и электропривод/ В.П. Авдейко, А.С. Вершинин, А.Л. Адамович. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – 284 с.
4. Лабораторный стенд НТЦ-05.05 "Технологические датчики" Методические указания. ЧПУП «НТП «Центр». – 2015. – 36 с.
5. Руководство по выполнению лабораторных работ на стенде НТЦ-05.08 «Электрические измерения» ЧПУП «НТП «Центр». – 50 с.