МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Электричество

Методические указания
к лабораторным работам для студентов II–III курсов
физико-математического факультета

ВОРОНЕЖ
Воронежский государственный педагогический университет
2012

УДК 535(07)
ББК В22
О-28

Издано по решению
учебно-методического совета ВГПУ.
Протокол № 3 от 10.11.2011 г.

Авторы:

Р.А. Кончаков, В.А. Хоник, В.С. Еремин, М.В. Гольдфарб,
Ю.А. Померанцев, С.В. Шевцов, А.А. Насонов, В.И. Мочалова

Научный редактор

доктор физико-математических наук,
профессор *В.А. Хоник*

Рецензенты

кандидат физико-математических наук, профессор кафедры информатики и методики преподавания математики *В.А. Чулюков* (ВГПУ);
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технологических и естественнонаучных дисциплин *В.Ф. Егоров* (ВГПУ)

О-28 **Общая физика. Электричество**: методические указания к лабораторным работам для студентов I–III курсов физико-математического факультета / Р.А. Кончаков [и др.]. – Воронеж: Воронежский государственный педагогический университет, 2012. – 120 с.

В методических указаниях приводится описание установок и приборов, порядок выполнения лабораторных работ, их теоретическое обоснование, контрольные вопросы.

Показано также, какими компетенциями должен обладать студент в результате выполнения лабораторных работ.

Издание предназначено для студентов II–III курсов физико-математического факультета.

УДК 535(07)
ББК В22

©Кончаков Р.А., Хоник В.А., Гольдфарб М.В., Померанцев Ю.А., Шевцов С.В., Еремин В.С., Насонов А.А., Мочалова В.И., 2012
© Воронежский государственный педагогический университет, редакционно-издательская обработка, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Целями освоения данного лабораторного практикума являются:

- формирование теоретической и практической профессиональной подготовки к преподаванию физики в общеобразовательных учреждениях;
- сведение разрозненных специфических физических знаний в единую систему;
- создание у студентов системные представления о роли физической науки в познании материального мира;
- формирование представления о физической теории как обобщении наблюдений, практического опыта и эксперимента;
- выяснение физического смысла законов и понятий, развитие у студентов навыков физического мышления, умения ставить и решать конкретные задачи.

В процессе освоения данной дисциплины студент формирует и демонстрирует следующие **компетенции:**

Общекультурные:

- ОК-1 в части: владеет культурой мышления; способен к обобщению, анализу и восприятию информации;
- ОК-2 в части: способен анализировать мировоззренческие проблемы;
- ОК-3в части: способен понимать значение культуры как формы человеческого существования;
- ОК-4 в части: способен использовать знания о современной естественнонаучной картине мира в образовательной деятельности.

Общепрофессиональные:

- ОПК-1 в части: обладает мотивацией к осуществлению профессиональной деятельности;
- ПК-8 в части: способен разрабатывать культурно-просветительские программы для различных категорий населения.

Специальные:

- СК-1 в части: знает концептуальные и теоретические основы физики, ее место в общей системе наук и ценностей, историю развития и современное состояние;
- СК-2 в части: демонстрирует представление о современных тенденциях развития физики;
- СК-4 в части: владеет методами теоретического анализа результатов наблюдений и экспериментов, приемами компьютерного моделирования.

Для формирования заявленных компетенций в ходе каждой работы придется решать ряд задач, которые позволяют научиться:

- понимать актуальность изучаемого в данной работе физического явления;

- объяснять физическую суть изучаемого в данной работе явления;
- характеризовать, давать описание объекта исследования (образец, устройство, поток частиц, излучение) и выделять его особенности;
- объяснять физические основы используемой в работе методики измерений, обосновывать последовательность действий при выполнении каждой конкретной работы;
- работать с приборами, выбирать нужный диапазон измерений (определять цену деления шкалы);
- проводить измерения, соблюдая заданные условия, грамотно и аккуратно записывать результаты в заранее составленные таблицы;
- вычислять и учитывать приборную и случайную погрешности прямых и косвенных измерений;
- представлять результаты эксперимента в виде сводных таблиц и графиков; определять параметры исследуемых функциональных зависимостей;
- анализировать полученные результаты, делать обоснованные выводы, составлять отчет по работе.

Все эти умения можно приобрести только в результате продолжительной целенаправленной самостоятельной работы и вдумчивом отношении к делу. Особенность занятий лабораторного практикума состоит в том, что они (в отличие от других учебных занятий) с первых шагов требуют Вашей самостоятельности, которая постепенно должна стать практически полной, при этом так работать нужно не только в лаборатории при сборке установки и проведении измерений, но и дома сначала при подготовке к измерениям, затем при графической, математической и литературной обработке результатов, а также при составлении отчета.

По цели, объему и содержанию лабораторные работы по физике могут резко различаться между собой. Однако все они содержат одинаковые последовательности общих по форме конкретных этапов. Более того, сравнительный анализ процессов выполнения учебной лабораторной работы и проведения научного эксперимента с использованием стандартной методики показывает, что в обоих случаях необходимо преодолевать одни и те же этапы, а именно:

- формулировка актуальности исследования данного физического явления;
- формулировка цели работы;
- постановка задачи, в основе которой лежат теоретические представления о сущности исследуемого физического явления;
- анализ физических основ метода, используемого в работе, выяснение его точности и пределов применимости;

- предварительная подготовка к выполнению работы: выяснение последовательности конкретных задач и их формулировка, выделение величин, получаемых прямыми и косвенными измерениями, составление таблиц для записи результатов измерений и их начальной обработки;
- сборка установки, проведение измерений, четкая запись результатов, регистрация характеристик и параметров используемых приборов, условий проведения опыта; прикидочная оценка значения измеряемой величины или характера исследуемой зависимости для устранения грубых ошибок; установление надежности результатов измерений;
- математическая обработка результатов измерений и оценка погрешности определения искомых величин с достаточной степенью достоверности;
- систематизация и обобщение результатов опыта, составление сводных таблиц, построение графиков;
- формулировка выводов, литературное оформление результатов опыта – написание отчета по работе.

Первые пять этапов – это Ваша самостоятельная работа до проведения измерений в лаборатории, а три последних – после их окончания. Остальные этапы работы выполняются под непосредственным руководством преподавателя и лаборанта.

Выполняя работы физического практикума, приучайте себя с самого начала выделять самостоятельно в каждой из работ все перечисленные девять этапов. Возможно, что вначале это не всегда будет получаться, какие-то этапы или моменты в них окажутся неочевидными. Обращайтесь с вопросами к преподавателю. Если сделать такой подход к работам для себя обязательным, то он постепенно станет привычным. Тем более, если преподаватель возьмёт на себя обязанность отдельно оценивать означенные этапы при защите Вами работы. А так как для выполнения лабораторных работ по всем дисциплинам нужны практически одни и те же общие умения и навыки, то выполнение и контроль заявленных этапов работы значительно облегчит Вам также выполнение лабораторных работ, по другим дисциплинам.

Выполнение каждого этапа – это определенное действие. Система действий, связанных с осуществлением всех этапов, есть Ваша деятельность при выполнении учебного эксперимента. Овладев такой деятельностью, Вы сможете ее использовать и совершенствовать в ходе других практикумов и затем в условиях производства.

Учитывая важность этой деятельности и для обеспечения верного и сознательного ее усвоения, мы сочли целесообразным наглядно изобразить ее структуру в виде таблицы (табл. 1). В ней приведены не только действия (этапы деятельности), а также результат каждого действия, т.е. цель, на достижение которой оно направлено, и умение – качество личности, которое Вы постепенно должны вырабатывать, выполняя данное действие.

Таблица 1

п.п.	Действия (этапы выполнения)	Знания, формируемые в ходе выполнения действия	Умения, формируемые в ходе выполнения действия	Навыки, формируемые в ходе выполнения действия
1.	Определение актуальности исследования данного физического явления	Обобщающие знания о месте и роли исследуемого физического явления в конкретном разделе физики, всей физической науки в целом	Формулировать системные представления о физических процессах, явлениях	Системных обобщений, синтеза знаний
2.	Определение цели эксперимента	Формулировка цели работы	Умение формулировать цель	Выделения частного из общего
3.	Постановка задачи, в основе которой лежат теоретические представления о сущности исследуемого физического явления	Обобщающие знания о сущности исследуемого физического явления с поиском способов экспериментальной проверки его сущностных зависимостей	Формулировать сущностные признаки и связи исследуемого физического явления	Вычленять из всей совокупности знаний об исследуемом физическом явлении сущностные причинно-следственные связи
4.	Изучение литературы (описания работы)	Сведения о свойствах конкретного объекта и физических основах метода его исследования	Умение обосновать выбор объекта и метода, приводящих к достижению цели	Определения из литературных данных оптимальных способов проведения эксперимента
5.	Подготовка к проведению измерений	Перечень задач работы. Схема установки. Протокол с таблицами для записи результатов измерений	Умение обосновывать последовательность задач, анализировать схему, продумывать и готовить таблицы для записи результатов	Анализа и синтеза экспериментальной работы
6.	Подготовка установки и проведение опыта	Результаты измерений в виде таблицы	Умение работать , с приборами, снимать показания, надежно их записывать, выдерживать и фиксировать условия опыта	Работы с измерительными приборами
7.	Обработка результатов измерении. Оценка погрешности измерения искомых величин	Значения величин, измеренных прямо и косвенно, с указанием погрешности их измерения	Умение обрабатывать результаты и оценивать погрешность измерения	Работы с множеством экспериментальных данных

п.п.	Действия (этапы выполнения)	Знания, формируемые в ходе выполнения действия	Умения, формируемые в ходе выполнения действия	Навыки, формируемые в ходе выполнения действия
8.	Систематизация и обобщение результатов опыта, составление сводных таблиц, построение графиков, формулировка выводов. Составление отчета по работе	Сводные обобщающие таблицы, графики, выводы. Отчет по работе	Умение систематизировать и обобщать результаты, представлять их графически, составлять отчет по выполненной работе	Проведения анализа, синтеза и обобщения экспериментальных данных. Сопоставление полученных результатов с заявленными целями работы. Формулировки выводов

Результат учебного эксперимента – умение студентов проводить эксперимент, т.е. усвоенные Вами знания об эксперименте как методе исследования, о деятельности по его осуществлению и умения, необходимые для его грамотного проведения.

Выполнение лабораторной работы есть определенная последовательность действий:

- подготовка к эксперименту;
- проведение измерений;
- обработка полученных результатов;
- формулировка выводов и написание отчета.

Для грамотного и быстрого их выполнения у каждого из Вас должна сложиться определенная система знаний и умений (ориентировочная основа действия), которая обеспечит правильное и рациональное исполнение действия. Другими словами, всякому действию должны предшествовать обосновывающие его знания. В данном случае это не только описание конкретной лабораторной работы, но и определенные разделы курса, а также знания по физике и математике, полученные Вами в средней школе, и умение пользоваться методическими указаниями по обработке экспериментальных результатов, назначению и устройству современных измерительных приборов.

Поэтому выполнение каждой лабораторной работы по физике необходимо начинать с изучения ее описания, и приведения знаний в систему, а именно:

- ясно представить себе общую цель данной конкретной лабораторной работы и последовательность задач, решение которых приведет к достижению окончательной цели;
- знать, какое физическое явление изучается в данной работе и какими зависимостями связаны величины его описывающие;
- знать основные особенности объекта исследования (образец, поток частиц, излучение);

- изучить и уметь объяснить физические основы используемых в работе методов измерения искомых величин;
- уметь нарисовать принципиальную схему используемой установки и знать назначение каждого из ее узлов;
- знать последовательность выполнения этапов лабораторной работы;
- иметь общее представление об ожидаемых результатах проводимого эксперимента и суметь выбрать метод, нужный для их математической обработки.

Только такая основательная и систематическая подготовка к каждой работе позволит сознательно выполнять лабораторные работы по физике и целенаправленно вырабатывать у себя необходимые для Вашей будущей деятельности умения и навыки.

Проверять степень своей готовности к выполнению каждой конкретной работы нужно с помощью приводимых ниже обобщенных контрольных вопросов. Они являются общими для всех работ физического практикума. Поэтому полезно (для экономии времени) не только обязательно отвечать на них, готовясь к работе, но и запомнить их как общий принцип подхода к выполнению лабораторных работ вообще.

Обобщенные контрольные вопросы

1. В чём актуальность проведения данной работы?
2. Какова цель работы?
3. Какие сущностные связи характерны для исследуемого физического явления?
4. Каковы возможные экспериментальные пути для проверки сущностных причинно-следственных связей исследуемого физического явления?
5. Что представляет собой объект исследования в данной работе?
6. Какие физические явления положены в основу экспериментального метода определения искомой величины (величин)?
7. Какие допущения сделаны в теории метода?
8. Какая теоретическая зависимость может быть проверена в данном конкретном опыте?
9. Какие конкретные задачи в ходе проведения измерений придется решать для достижения цели?
10. Каково назначение отдельных узлов экспериментальной установки?
11. Какие требования техники безопасности необходимо соблюдать при выполнении данного учебного эксперимента?
12. Какие меры нужно принимать в ходе эксперимента для предупреждения и исключения вредных воздействий на окружающую среду?
13. Какие таблицы нужны в протоколе для записи и начальной обработки результатов измерений?

14. Какие зависимости должны быть построены по полученным данным?

15. Какое уравнение (или система) позволяет найти искомую величину или нужную зависимость на основании опытных данных?

16. Какие постоянные (табличные данные, параметры образца и установки) нужны для определения искомой величины по данным опыта?

17. Как будет определена погрешность прямых измерений?

18. Как придется оценивать погрешность конечного результата?

19. Как можно проверить достоверность полученных экспериментальных результатов?

20. Совпадает ли результат эксперимента с предсказанием теории?

21. Чем вызвано расхождение результатов эксперимента и теории?

22. Можно ли сопоставить результаты эксперимента с литературными данными?

23. Достигнута ли цель работы?

На вопросы 1-9 Вы должны ответить при подготовке к работе и отразить эти ответы в конспекте. На вопросы 10–12 – при непосредственном знакомстве с установкой и в ходе беседы при допуске к работе. На последнюю группу вопросов 13–23 – в ходе опыта, обработки результатов, их систематизации и описании в отчете.

Эта система вопросов очень важна и по другой причине.

Психологами установлено, что процесс приобретения и развития знаний не может протекать и даже начаться без постановки и решения самых разнообразных вопросов. Любой шаг в познании предварен вопросом о том, чем данная информация важна. Именно вопросами выражается первое пробуждение мысли. Овладение умением правильно ставить вопросы не менее важно, чем нахождение способов получения ответов. Поэтому, используя принцип подхода к эксперименту заданный обобщенными вопросами, учитесь ставить и формулировать вопросы, связанные с содержанием конкретной работы.

Требования обобщенного характера к структурным элементам знаний по физике

При самостоятельном изучении всех разделов курса физики Вы имеете дело с такими понятиями, как: явление, величина, метод, закон, теория. Они будут встречаться и при подготовке к лабораторным работам. Для целенаправленного их изучения и изложения полезно знать требования обобщенного характера к этим структурным элементам научных знаний. Они могут исполнять роль планов при построении ответов.

Что нужно знать о каждом конкретном физическом явлении?

- Когда и кем открыто и впервые изучено явление?
- Внешние признаки проявления явления.

- Условия, при которых наблюдается явление.
- Механизм протекания явления (объяснение на основе современных теорий).
- Связь данного явления с другими.
- Количественные характеристики явления:
  а) величины, характеризующие явление;
  б) связь между величинами и формулы, выражающие эту связь.
- Примеры использования явления на практике, способы предупреждения его вредного воздействия.
- Определение явления.

Что нужно знать о каждой конкретной физической величине?

- Для чего введена данная величина?
- Общепринятое буквенное обозначение величины.
- Аналитическое выражение этой величины.
- Скалярная или векторная данная физическая величина?
- Единицы физической величины (в СИ обязательно).
- Методы измерения этой физической величины?
- Определение величины.

Что нужно знать о каждой конкретной модели?

- Название модели.
- Вид модели.
- Оригинал (прототип модели).
- Цель введения модели.
- Способ построения (описание) модели.
- Условия замены оригинала моделью.
- Определение модели.

При построении определений физических явлений, величин и моделей следует пользоваться нижеприведенными схемами.

Например:

скорость – векторная физическая величина, введенная для количественного оценивания быстроты и направления движения тела, и равная отношению перемещения тела к промежутку времени, за которое произошло это перемещение;

материальная точка – мысленная модель тела, введенная решения задач о его движении и взаимодействии с другими телами и построенная так, что пренебрегают формой, размерами и структурой тела, сохраняя лишь свойства инертности и гравитационности.

Что нужно знать о методе исследования каждого конкретного физического явления или измерения физической величины.

- Для изучения какого физического явления или измерения какой физической величины применяется метод?
- Прямым или косвенным является этот метод?

- Физические основы метода.
- Области (границы) применимости метода.
- Точность метода. При каких обязательных условиях она достигается?
- Преимущества и недостатки данного метода по сравнению с другими.

Что нужно знать о каждом конкретном приборе?

- Название и марка (тип) прибора.
- Назначение прибора, т.е. для измерения каких физических величин или получения каких сигналов предназначен прибор.
- Одноцелевым или многоцелевым является данный прибор?
- Принцип действия прибора (желательно).
- Основные узлы (части) прибора и их назначение.
- Пределы значений величин или сигналов, допускаемые при работе с прибором.
- Правила обращения (работы) с прибором.
- Погрешности или предел допускаемой погрешности прибора.
- Условное изображение прибора на схемах.

Что нужно знать о законе?

- Кем и когда открыт закон?
- Связь между какими величинами выражает закон?
- Формулировка закона.
- Аналитическое выражение (формула, выражающая закон).
- Опыты, подтверждающие справедливость закона.
- Примеры учета и использования закона.
- Границы применимости данного закона.
- Что нужно знать о каждой конкретной теории?
- Кем и когда создана теория?
- Основные положения теории.
- Факты, послужившие основанием для разработки теории.
- Математический аппарат теории (основные уравнения).
- Круг явлений, объясняемых данной теорией (пределы применимости теории).
- Явления и свойства материи, предсказанные теорией.

Начальная обработка результатов измерений

Особенность данного этапа обработки в том, что его выполняют сразу после получения экспериментальных данных, т.е. прежде чем разобрана рабочая установка. Это позволяет при необходимости проверить отдельные точки, участки или даже всю зависимость в целом. В ходе такой обработки Вы сможете увидеть, значений каких величин (или постоянных параметров) у Вас еще нет, понять, откуда они могут быть взяты.

Начиная обработку результатов сразу после их получения, т.е. на лабораторном занятии, действуйте в такой последовательности:

- постройте зависимость между величинами по данным опыта, если они непосредственно измерялись;
- сопоставьте вид полученной зависимости с теоретически предполагаемым;
- определите однократно из графика значение нужной величины;
- вычислите конечный результат, используя данные 28 графика.

Иногда оказывается, что величины, зависимость между которыми должна быть построена, непосредственно не измерялись. Тогда начинать обработку придется в иной последовательности, а именно:

- вычислите, используя данные опыта, и запишите в таблицу значения величин, необходимых для построения графика; если экспериментальных данных много, то можно брать пока значения через точку (или даже через две), это сократит объем и ускорит работу;
- постройте зависимость между величинами, используя результаты вычислений;
- сравните вид полученной зависимости с предполагаемым теоретически.

После того, как график построен, обработку продолжайте как и в предыдущем случае.

Требование – успевать на занятии не только получить данные, но и построить снятую зависимость должно стать для Вас обязательным правилом.

Построенную зависимость и протокол с таблицами данных предъявите преподавателю для проверки и окончательной подписи. Хорошо, если тут же Вы подумаете о завершении обработки результатов, т.е. представите, что нужно делать для ее окончания и уточните неясные моменты. Обсуждать вопросы обработки, имея график и результаты, уже значительно проще.

Вы уже, вероятно, обратили внимание на то, что осмысливать результаты легче, если они изображены графически. Помимо наглядности графики необходимы для определения значений отдельных величин. График – очень распространенный способ представления экспериментальных результатов. Поэтому стройте их, выполняя общепринятые правила:

- используйте только миллиметровую бумагу и карандаш;
- откладывайте по оси абсцисс аргумент (переменную, условно принятую в данном эксперименте за независимую), а по оси ординат – функцию;
- выбирайте масштаб таким, чтобы он легко читался, поэтому одна клетка масштабной сетки должна соответствовать удобному числу – 1, 2, 5, 10 единиц откладываемой величины;
- пишите на осях числовые значения только для крупных единиц масштаба, делайте это за пределами графика (левее оси ординат и ниже оси абсцисс);

- стройте ту область значений, которая была исследована в опыте;
- не давайте начало координат (точка 0, 0), если это не имеет особого физического смысла (результат начального измерения);
- наносите на график все полученные при измерениях значения;
- проводите кривую плавно, по усредненным значениям, избегая изломов и перегибов;
- используйте разные обозначения точек при построении на одном графике нескольких кривых одной и той же зависимости, полученных при разных условиях опыта;
- снабжайте каждый график подрисуночной подписью (внизу листа), содержащей словесное название зависимости, которая на нем представлена, и условий ее получения, т.е. раскрывающей назначение и возможности использования графика;
- пишите обязательно на обратной стороне графика свою фамилию и номер группы.

Окончательная обработка результатов измерений

Общеизвестно, что принципиально невозможно измерить абсолютно точно значение какой-либо физической величины. Поэтому всегда необходимо учитывать полную погрешность опыта и указывать ее в окончательном результате. Полная погрешность опыта складывается из:

- погрешности, связанной с неидеальностью объекта исследования;
- погрешности метода;
- приборных погрешностей;
- ошибок, связанных с проведением данного конкретного опыта – промахи, систематические и случайные ошибки.

Все виды перечисленных погрешностей, кроме случайных, могут быть оценены и практически учтены или устранены еще до начала систематических измерений.

При выполнении работ физического практикума Вы не учитываете ошибок, обусловленных неидеальностью объекта исследования и самим методом. Допускается, что объект идеален, а метод позволяет верно наблюдать и достаточно точно оценивать изменение величины. Конечно, это далеко не всегда так, поэтому в описании работы бывают специально оговорены условия, ограничивающие применение метода. Нужно учиться подходу к учету таких ошибок. Это Вам пригодится в дальнейшей экспериментальной работе.

Оценку погрешности измерения величины для конкретной работы начинайте с расчета и указания в протоколе приборной погрешности. Об этом уже говорилось в разделе «Как проводить измерения». Помните, что погрешность прибора нужно определить обязательно в конце данной рабо-

ты, пока все приборы перед Вами. Выработайте привычку кончать работу и разбирать установку только после того, как записаны погрешности приборов и выполнена предварительная обработка результатов измерений.

По результатам опыта Вы оцениваете случайные ошибки. Это можно сделать только после проведения достаточно большого числа измерений. Общепринятый метод вычисления случайной погрешности основан на предположении о том, что распределение случайных ошибок в процессе данного опыта соответствует нормальному закону распределения случайной величины.

Таким образом, проведя эксперимент, необходимо вычислять не только значение физической величины, но и погрешность ее измерения, используя особые приемы и методы, разработанные математиками, т.е. выполнять математическую обработку результатов измерений. Это следует делать пользуясь пособиями, которые Вам рекомендованы.

Вычисление суммарной погрешности измерения величины в каждой работе имеет свои особенности. Однако схемы расчета оказываются общими для всех работ. Они должны быть усвоены, так как Вам предстоит применять их не только при выполнении физического практикума, но и в дальнейшем в работах специальных лабораторий.

Выполнение вышеприведённых рекомендаций и требований к выполнению физического практикума должно приводить к формированию заявленных в начале специальных профессиональных компетенций бакалавра физико-математического образования по специальности «физика». Более подробно с рекомендациями по выполнению физического практикума можно ознакомиться в методическом пособии Кесаманлы Ф.П., Коликова В.М. Физика. **Как правильно организовать самостоятельную работу при выполнении учебных экспериментов**. Методическое пособие для студентов. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007., 56 с., а также в методическом пособии В.А. Хоник Оценка **погрешностей измерений. Методические указания.** Воронеж, ВГПУ, 2007, 24 стр.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.
ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШУНТА

Цель работы: ознакомление с системами электроизмерительных приборов.

В работе используются: миллиамперметр, амперметр, реостат на 30 Ом, источник тока (от щитка 12 В), проволока, масштабная линейка.

Теоретическая часть

Токи в электрических цепях измеряются при помощи амперметров различных систем (магнитоэлектрической, электромагнитной и т.д.). Для измерения больших токов пригодны амперметры любой системы. Для измерения слабых токов применяются гальванометры магнитоэлектрической системы – они имеют большую чувствительность до 10^{-12} А/дел. При измерении амперметр вносится в цепь, следовательно он изменяет сопротивление цепи, следовательно он изменяет и ток. Отсюда следует. Чтобы амперметр слабо изменял ток в цепи, надо, чтобы он имел малое сопротивление. Это сопротивление должно быть значительно меньше сопротивления цепи, в которую он включается. Но амперметры по своему изготовлению не могут измерять большие токи, пределы измерения надо изменять с помощью шунтов, чтобы большая часть измеряемого тока шла через шунт, а меньшая часть тока через прибор, тогда он не выйдет из строя. Шунты используют для расширения предела измерения амперметров. Часто амперметры делают многопредельными с встроенными внутри шунтами, которые мы можем включать по нашему усмотрению с помощью рукоятки, расположенной на лицевой панели прибора.

Расчет шунта

Пусть нам надо увеличит предел измерения миллиамперметра в n раз и надо измерить ток в цепи I (см. рис.1), а предельный ток амперметра I_A. Подключаем к миллиамперметру шунт параллельно. Сопротивление шунта $R_ш$, через шунт пойдет ток $I_ш$. Миллиамперметр и шунт находятся под одним и тем же напряжением U_{MN}.

$$U_{MN} = I_A \cdot R_A = I_ш \cdot R_ш \qquad (1)$$

R_A – сопротивление миллиамперметра. Ток через шунт мы можем найти, решая совместно уравнения (1) и (2)

$$I_ш = I - I_A \qquad (2)$$

$$I = I_A\left(1 - \frac{R_A}{R_ш}\right) \qquad (3)$$

Но ток через миллиамперметр в n раз меньше тока в цепи, так как мы увеличиваем предел измерения миллиамперметра в n раз.

$$I_A = I/n; \qquad I = n \cdot I_A \tag{4}$$

Из (3) и (4) находим:

$$n \cdot I_A = I_A\left(1 - \frac{R_A}{R_Ш}\right) => R_Ш = \frac{R_A}{n-1} \tag{5}$$

Таким образом, чтобы вычислить сопротивление шунта, надо знать сопротивление миллиамперметра, и число n (во сколько раз мы увеличиваем предел измерения миллиамперметра).

Выполнение работы

1. Преподаватель или лаборант указывает к какому прибору изготовить шунт и называет число n (во сколько раз увеличить предел измерения миллиамперметра). Сопротивление миллиамперметра найти на лицевой панели.

2. Зная R_A и n, найти сопротивление шунта по формуле (5).

3. Зная сопротивление шунта, найти длину проволоки, предназначенной для изготовления шунта по формуле сопротивления:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s}; \qquad l = R_Ш \frac{s}{\rho}; \quad S = \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

S – сечение проволоки, d=0,15 мм, $\rho = 1{,}76 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

4. Рассчитав длину, отрезать такой длины проволоку с запасом 2-3 см, зачистить края проволоки наждачной бумагой.

5. Подключить изготовленный шунт к прибору для которого был изготовлен шунт. Собрать цепь с последовательным включением миллиамперметра с шунтом, эталонного амперметра, сопротивления, источника тока (рис. 2).

6. Включить цепь, произвести отсчеты по эталонному амперметру и миллиамперметру с шунтом и параллельно записать их. Построить график.

7. Записать технические характеристики миллиамперметра с шунтом:

А) система прибора, Б) предел измерения без шунта и с шунтом, В) класс точности прибора, Г) абсолютную погрешность, Д) цену деления прибора с шунтом и без шунта.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия приборов магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем.

2. Что такое чувствительность прибора и цена деления прибора?

3. Условные обозначения прибора на лицевой панели (шкале).

4. Установка прибора на нуль.

5. Класс точности прибора. Вычисление абсолютной и относительной погрешностей прибора по классу точности.

6. Как изменяется чувствительность прибора, если к нему подключается шунт?

7. Многопредельные приборы, вычисление цены деления.

8. Вольтметры. Добавочное сопротивление.

9. Можно ли амперметр применять для измерения напряжения?

Литература

1. Фриш Р.В., Тиморева А.В., курс общей физики / Р.В. Фриш, А.В. Тиморева. – т. 2, §§50–53.

2. Телеснин Р.В., Яковлев В.Ф., Курс физики, Электричество / Р.В. Телеснин, В.Ф. Яковлев §§ 45-51.

3. Руководство к лабораторным занятиям по физике по ред. Гольдина или под ред. Ивероновой.

4. Пособие «Вводное занятие» см. лаборатория 202.

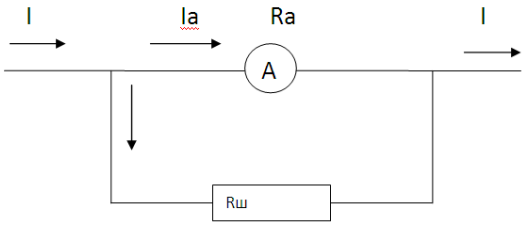


Рис. 1. Подсоединение шунта к амперметру

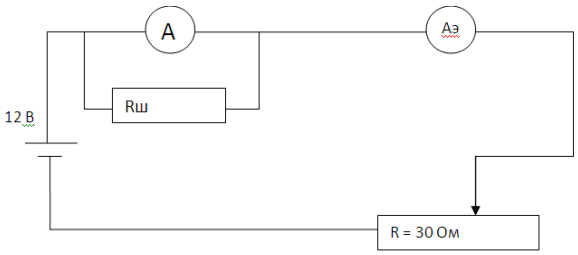


Рис.2. Цепь с последовательным включением миллиамперметра с шунтом, эталонного амперметра, сопротивления, источника тока

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. РЕЗИСТОР, КОНДЕНСАТОР И ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: исследование зависимости силы тока в RCL-контуре от частоты вынужденных колебаний, определение резонансной частоты.

Теоретическая часть

Процессы, возникающие в электрических цепях под действием внешнего периодического источника тока, называются *вынужденными колебаниями*.

Вынужденные колебания, в отличие от собственных колебаний в электрических цепях, являются *незатухающими.* Периодический внешний источник обеспечивает приток энергии к системе и не дает колебаниям затухать, несмотря на наличие неизбежных потерь.

Особый интерес представляет случай, когда внешний источник, напряжение которого изменяется по гармоническому закону с частотой ω, включен в электрическую цепь, способную совершать собственные свободные колебания на некоторой частоте ω_0.

Если частота ω_0 свободных колебаний определяется параметрами электрической цепи, то *установившиеся вынужденные колебания всегда происходят на частоте ω внешнего источника.*

Для установления стационарных вынужденных колебаний необходимо некоторое время Δt после включения в цепь внешнего источника. Это время по порядку величины равно времени τ затухания свободных колебаний в цепи.

Электрические цепи, в которых происходят установившиеся вынужденные колебания под действием периодического источника тока, называются *цепями переменного тока*.

Рассмотрим последовательный колебательный контур, то есть RLC-цепь, в которую включен источник тока, напряжение которого изменяется по периодическому закону (рис. 1):

$$\varepsilon(t) = E_0 \cos(\omega t), \qquad (1)$$

где E_0 – амплитуда, ω – круговая частота.

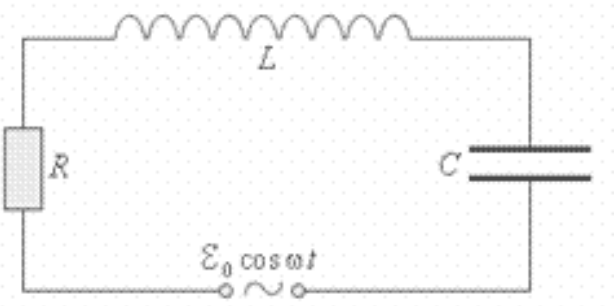


Рис. 1. Вынужденные колебания в контуре

Предполагается, что для электрической цепи, изображенной на рис. 1, выполнено условие квазистационарности. Поэтому закон Ома можно записать для мгновенных значений токов и напряжений:

$$RJ + \frac{q}{C} + L\frac{dJ}{dt} = E_0 \cos(\omega t) \qquad (2)$$

Величина $L\dfrac{dJ}{dt}$ – это перенесенная с изменением знака из правой части уравнения в левую ЭДС самоиндукции катушки. Эту величину принято называть *напряжением на катушке индуктивности*.

Уравнение вынужденных колебаний можно записать в виде

$$u_R + u_C + u_L = \varepsilon(t), \qquad (3)$$

где $u_R(t)$, $u_C(t)$ и $u_L(t)$ – мгновенные значения напряжений на резисторе, конденсаторе и катушке соответственно. Амплитуды этих напряжений будем обозначать буквами U_R, U_C и U_L. При установившихся вынужденных колебаниях все напряжения изменяются с частотой ω внешнего источника переменного тока. Для наглядного решения уравнения вынужденных колебаний можно использовать *метод векторных диаграмм*.

На векторной диаграмме колебания определенной *заданной частоты* ω изображаются с помощью векторов (рис. 2).

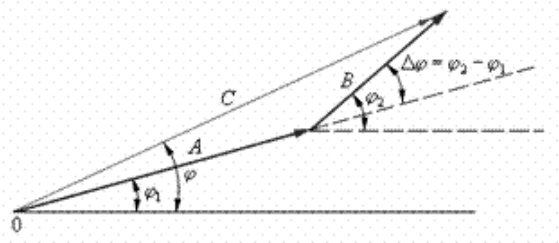


Рис. 2. Изображение гармонических колебаний и их суммы с помощью векторов на векторной диаграмме

Длины векторов на диаграмме равны амплитудам колебаний A и B, а наклон к горизонтальной оси определяется фазами колебаний φ_1 и φ_2. Взаимная ориентация векторов определяется относительным фазовым сдвигом $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$. Вектор, изображающий суммарное колебание, строится на векторной диаграмме по правилу сложения векторов: $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$

Для того, чтобы построить векторную диаграмму напряжений и токов при вынужденных колебаниях в электрической цепи, нужно знать соотношения между амплитудами токов и напряжений и фазовый сдвиг между ними для всех участков цепи.

Рассмотрим по отдельности случаи подключения внешнего источника переменного тока к резистру с сопротивлением R, конденсатору емкости C и катушки индуктивности L. Во всех трех случаях напряжения на резисторе, конденсаторе и катушке равны напряжению источника переменного тока.

1. Резистор в цепи переменного тока.

$$J_R R = u_R = U_R \cos(\omega t); \quad J = \frac{U_R}{R}\cos(\omega t) = J_R \cos(\omega t) \qquad (4)$$

Здесь через I_R обозначена амплитуда тока, протекающего через резистор. Связь между амплитудами тока и напряжения на резисторе выражается соотношением

$$RI_R = U_R \tag{5}$$

Фазовый сдвиг между током и напряжением на резисторе равен нулю.

2. Конденсатор в цепи переменного тока.

$$u_C = \frac{q}{C} = U_C \cos(\omega t) \tag{6}$$

$$J_C = \frac{dq}{dt} = C\frac{du_C}{dt} = CU_C\left(-\omega \sin(\omega t)\right) = \omega C U_C \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_C \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{7}$$

Соотношение между амплитудами тока I_C и напряжения U_C:

$$\frac{1}{\omega C} I_C = U_C \tag{8}$$

Ток опережает по фазе напряжение на угол $\frac{\pi}{2}$.

3. Катушка в цепи переменного тока.

$$u_L = L\frac{dJ_L}{dt} = U_L \cos(\omega t) \tag{9}$$

$$J_L = \int \frac{U_L}{L}\cos(\omega t)\,dt = \frac{U_L}{\omega L}\sin(\omega t) = \frac{U_L}{\omega L}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_L \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{10}$$

Соотношение между амплитудами тока I_L и напряжения U_L:

$$\omega L I_L = U_L \tag{11}$$

Ток отстает по фазе от напряжения на угол $\frac{\pi}{2}$.

4. Последовательный RLC-контур. Можно построить векторную диаграмму для последовательного RLC-контура, в котором происходят вынужденные колебания на частоте ω. Поскольку ток, протекающий через последовательно соединенные участки цепи, один и тот же, векторную диаграмму удобно строить относительно вектора, изображающего колебания тока в цепи. Амплитуду тока обозначим через I_0. Фаза тока принимается равной нулю. Это вполне допустимо, так как физический интерес представляют не абсолютные значения фаз, а относительные фазовые сдвиги. Векторная диаграмма для последовательного RLC-контура изображена на рис. 2.

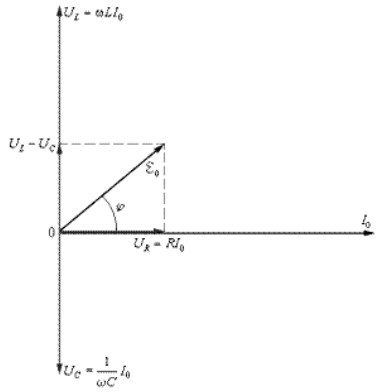


Рис. 3. Векторная диаграмма для последовательной RLC-цепи

Векторная диаграмма на рис. 3. построена для случая, когда $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ или $\omega^2 > \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$. В этом случае напряжение внешнего источника опережает по фазе ток, текущий в цепи, на некоторый угол φ.

Из рисунка видно, что

$$E_0^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 \tag{12}$$

откуда следует

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \tag{13}$$

$$tg\varphi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \tag{14}$$

Из выражения для I_0 видно, что амплитуда тока принимает максимальное значение при условии

$$\omega L - 1/\omega C = 0 \tag{15}$$

или

$$\omega^2 = \omega_{рез}^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \tag{16}$$

Явление возрастания амплитуды колебаний тока при совпадении частоты ω внешнего источника с собственной частотой ω_0 электрической цепи называется *электрическим резонансом***.** При резонансе

$$(I_0)_{рез} = \frac{E_0}{R} \tag{17}$$

Сдвиг фаз φ между приложенным напряжением и током в цепи при резонансе обращается в нуль. Резонанс в последовательной RLC-цепи называется *резонансом напряжений***.** Аналогичным образом с помощью векторной диаграммы можно исследовать явление резонанса при параллельном соединении элементов *R*, *L* и *C* (так называемый *резонанс токов*).

При последовательном резонансе ($\omega = \omega_0$) амплитуды U_C и U_L напряжений на конденсаторе и катушке резко возрастают:

$$(U_0)_{рез} = (U_C)_{рез} = \omega_0 L (I_0)_{рез} = \frac{E_0}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{18}$$

Существует понятие добротности RLC-контура:

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{19}$$

Таким образом, при резонансе амплитуды напряжений на конденсаторе и катушке в *Q* раз превышают амплитуду напряжения внешнего источника.

Рис. 4 иллюстрирует явление резонанса в последовательном электрическом контуре. На рисунке графически изображена зависимость отношения амплитуды U_C напряжения на конденсаторе к амплитуде $\mathcal{E}_0$ напряжения источника от его частоты ω для различных значений добротности *Q*. Кривые на рис. 4 называются *резонансными кривыми*.

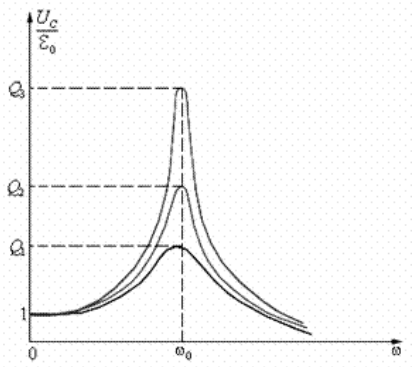


Рис. 4. Резонансные кривые для контуров с различными значениями добротности Q

Можно показать, что максимум резонансных кривых для контуров с низкой добротностью несколько сдвинуты в область низких частот. «Острота» резонансной кривой сильно зависит от энергетических потерь в контуре. При увеличении активного сопротивления контура резонансная кривая становится менее «острой».

Выполнение работы

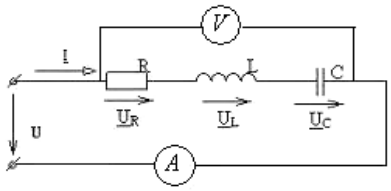


Рис. 5. Принципиальная упрощенная схема установки для изучения тока в RLC-цепи

Оборудование: U – генератор синусоидального напряжения переменной частоты, R – резистор, L – катушка индуктивности, C – конденсатор переменной емкости, A – миллиамперметр, V – вольтметр.

Порядок выполнения.

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой учебной установки рис. 5, проверить целостность сетевого провода.

2. Соберите измерительную схему, показанную на рис. 5, используя резистор и индуктивность с номиналами, указанными преподавателем.

3. Включить генератор переменного напряжения.

4. Изменяя частоту генератора от 200 Гц до 500 Гц через 20 Гц, с помощью амперметра измерьте силу тока в цепи и занесите измеренные значения в таблицу.

5. Повторите эксперимент для других значений ёмкости конденсатора. Данные занесите в таблицу.

6. Постройте на одной координатной плоскости графики зависимости силы тока в цепи от частоты генератора для различных значений емкости конденсатора. По графикам определите резонансную частоту для каждого из значений емкости.

7. Рассчитайте по номинальным параметрам контура частоту резонанса и сравните полученное значение с экспериментальным:

$$\omega^2 = \omega_{рез}^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

8. Для каждого значения емкости конденсатора представьте следующие результаты:

а) экспериментальное значение: $(\omega_0)_{эксп} = \ldots$

б) расчетное значение резонансной частоты: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \ldots$

в) относительная ошибка данного метода определения резонансной частоты: $\varepsilon = \frac{\left|\omega_0 - (\omega_0)_{эксп}\right|}{\omega_0} \cdot 100\%$.

9. Проанализируйте цель эксперимента и ответьте на вопросы:

а) какова зависимость силы тока в колебательном контуре от частоты колебаний напряжения внешнего источника?

б) чему равно значение резонансной частоты для данного колебательного контура?

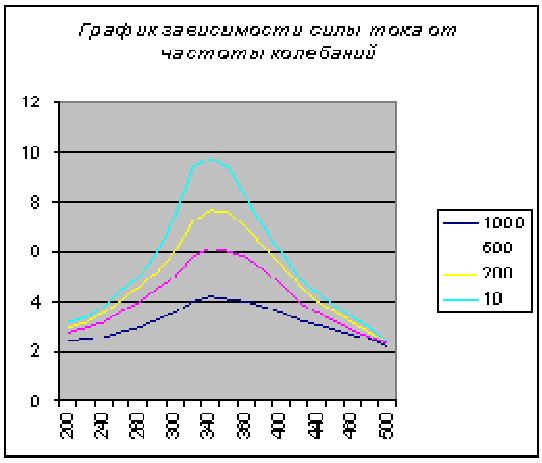
в) как зависит величина силы тока при резонансной частоте от активного сопротивления контура?

10. Сделайте выводы о соответствии экспериментальных результатов теоретическим формулам.

Таблица 1.

Зависимость силы тока от частоты колебаний тока при различных значениях емкости конденсатора

C, мкФ	ω, Гц							
	200	240	260	300	…	440	460	500
	I, мА							
1.								
2.								
3.								
5.								



Контрольные вопросы

1. Запишите закон Ома для цепи, содержащей резистор, емкость и индуктивность.

2. Опишите идею метода векторных диаграмм для изображения соотношения между токами или напряжениями в цепи переменного тока.

3. Запишите соотношение между амплитудными значениями тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей: а) только резистор; б) только конденсатор; в) только индуктивность; г) резистор с конденсатором; д) резистор с индуктивностью; е) все три элемента.

4. Чему равен сдвиг фаз между напряжением и током в цепи, содержащей только катушку, только ёмкость?

5. Изобразите векторную диаграмму для последовательной цепи, содержащей резистор, емкость и индуктивность.

6. Какое явление называется электрическим резонансом? При каком условии наступает резонанс в последовательной RLC-цепи?

7. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением при резонансе в последовательной RLC-цепи?

8. Как связаны между собой амплитудные значения напряжения на конденсаторе, тока в катушке и внешней ЭДС при резонансе в последовательной RLC-цепи?

9. Какая величина называется добротностью электрической цепи? Изобразите резонансные кривые для контуров с различными значениями добротности.

10. Можно ли подобрать значения парметров *R, C* и *L* таким образом, чтобы напряжение на участке цепи, содержащем резистор, конденсатор или индуктивность, и подключенном к источнику переменного напряжения, было равно нулю?

11. Опишите порядок выполнения работы и изобразите схему экспериментальной установки.

12. Каким образом можно уменьшить потери электрической энергии, затрачиваемой на прохождение тока в цепи, содержащей резистор, емкость и индуктивность.

Литература

1. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Электричество и магнетизм. – М., Наука, 1979. – 536 с.

2. Э. Парселл. Электричество и магнетизм. – М., Наука, 1975. – 440 с.

3. С.Н. Бравичев, Г.И. Дегтярев Г.И., В.Н. Трубникова. Электрические цепи: Учебное пособие к лабораторному практикуму по курсу "Теоретические основы электротехники". – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 111 с

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: ознакомиться теоретически с температурной зависимостью сопротивления различных материалов. Практически изучить зависимость сопротивления различных видов проводников от температуры с помощью лабораторной установки.

Теоретическая часть

Любые материалы способные проводить электрический ток обладают некоторым сопротивлением в широком диапазоне температур. Исключением являются сверхнизкие температуры при которых наблюдается явление сверхпроводимости. Проводники электричества разделяются на два основных вида: проводники первого и второго рода. В проводниках первого рода при протекания тока не происходят химические изменения. К ним относятся металлы, графит и некоторые полупроводники. К проводникам второго рода преимущественно относятся растворы кислот, солей и щелочей, т. е. электролиты. При протекании через них тока происходит химическое изменение их состава. Это явление называется электролизом.

Одним из основных параметров характеризующих проводящие свойства проводников является удельное сопротивление. Удельное сопротивление ρ проводников измеряется в единицах Ом·м. Для широко используемых материалов и решения задач используются таблицы. Удельное сопротивление зависит не только от вида вещества, но и от его температуры. Значение ρ у различных материалов будет различным. Зависимость удельного сопротивления от температуры можно охарактеризовать температурным коэффициентом сопротивления данного вещества:

$$\alpha = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$$

Он дает относительное приращение сопротивления при увеличении температуры на один градус. Температурный коэффициент сопротивления для данного вещества различен при разных температурах, т. е. удельное сопротивление изменяется с температурой не по линейному закону, а зависит от нее более сложным образом. У металлов подобная зависимость не является сильно выраженной. Если интервал изменения температуры достаточно мал, то приближенно можно считать α постоянным, равным среднему значению внутри рассматриваемого диапазона температур. Так, например, если ρ_0 – удельное сопротивление при 0^0C, а ρ – его значение при t^0 C, то можно записать следующее уравнение:

$$\rho = \rho_0(1+\alpha t)$$

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) различных проводников может быть как положительным, так и отрицательным. У всех металлов ТКС положителен, а у полупроводников и электролитов он отрицателен. Рост сопротивления с увеличением температуры у металлов связан с увеличением колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, которые препятствуют прохождению свободных электронов. Количество свободных электронов создающий электрический ток увеличивется при этом незначительно. При повышении температуры на 100^0 С у некоторых чистых металлов сопротивление может увеличиваться на 40–50%. Для чистых металлов температурный коэффициент сопротивления (ТКС) близок к 1/ 273=0,00367, т.е. к величине температурного коэффициента расширения идеального газа. Некоторые виды металлических сплавов имеют очень низкий ТКС, например, константан и манганин. Константан является сплавом меди и никеля. Манганин – это сплав меди, никеля и марганца. Сплавы с анологичными свойствами применяются в приборостроении в тех случаях, когда параметры приборов не должны зависеть от изменения температуры. Например, эталонные (прецизионные) магазины сопротивлений. Зависимость сопротивления металлов от температуры носит достаточно линейный характер в широком диапазоне температур, поэтому они широко применяются в электрических термометрах и в устройствах автоматики там, где изменение температуры может достигать нескольких сотен градусов. В некоторых случаях для улучшения параметров используют специальные электронные схемы. В качестве датчика температуры чаще всего используют тонкую платиновую или медную проволоку. Платиновый датчик может работать в химически агрессивных средах, но стоимость его значительно выше медного. У полупроводников при увеличение температуры имеет место значительное увеличение количества генерируемых электронно – дырочных пар, которые создают ток. Поэтому их сопротивление уменьшается. При нагреве некоторых полупроводников на 100^0 С их сопротивление может уменьшаться в 50 раз. Такой резкой зависимости нет ни у металлов, ни у электролитов. Отрицательный коэффициент сопротивления (ТКС) у электролитов связан с усилением диссоциации в растворах. Это означает, что при нагревании растворов увеличивается количество анионов и катионов, которые являются электрическими зарядами и создают электрический ток.

На практике широко используются полупроводниковые датчики температуры. Основным их преимуществом по сравнению с резистивными RTD (Resistance Temperature Detector) металлическими датчиками является высокая чувствительность к малейшим изменениям температуры. Наиболее существенным их недостатком является высокая нелинейность температурной характеристики. Полупроводниковые датчики могут иметь как положительный ТКС, так и отрицательный. Чаще всего в качестве термо-чувствительного элемента применяются специальные полупроводниковые резисторы-термисторы. Термисторы бывают с положительным или отрицательным значением ТКС, но большинство из них имеет отрицательный ТКС.

Так же широко используются полупроводниковые датчики выполненные на основе полупроводниковых приборов- диодов, биполярных и полевых транзисторов. Они имеют отрицательный ТКС. Для получения линейной температурной характеристики они используются со специальными электронными схемами. В качестве регистрирующего устройства могут применяться электронные самописцы, аналоговые и цифровые измерительные приборы.

Основной задачей данной лабораторной работы является снятие зависимости сопротивления от температуры металлического и полупроводникового элементов, а так же вычисление их температурных коэффициентов сопротивления.

Выполнение работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и оборудованием.

1-2 клеммы для подключения исследуемого элемента и моста Уитсона. Можно использовать цифровой омметр повышенной точности.

3-4 клеммы для подключения источника тока нагревателя – понижающий трансформатор.

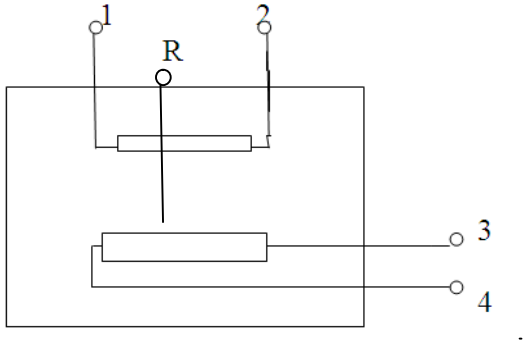


Рис. 1. Лабораторная установка

2. Измерить сопротивление металлической проволоки при комнатной температуре.

3. Включить трансформатор в сеть 220 В.

4. Используя термометр произвести измерения сопротивления проволоки через каждые 50 нагревая проводник до 600С.

5. Результаты измерений занести в таблицу 1.

6. По результатам измерений вычислить температурный коэффициент сопротивления. Для этого можно использовать значения двух смежных точек.

7. Построить график зависимости сопротивления от температуры.

8. Вычислить абсолютную и относительную погрешности измерения.

Таблица 1.

t^0 C	20	25	30	35	40	45	50	55	60
R(Ом)									

Изучение зависимости сопротивления полупроводникового диода от температуры

1. Подключить к клеммам 1-2 диод и мост Уитсона. С помощью моста подобрать множители так, чтобы можно было измерить сопротивление диода при комнатной температуре. Так же можно использовать цифровой омметр повышенной точности. Сопротивление диода в прямом направлении составляет десятки Ом, а в обратном направлении тысячи Ом. Измерить сопротивление диода в обратном направлении.

2. Как и в предыдущем задании регулируя ток нагревателя реостатом, изменять температуру термостата.

3. Проводя измерение сопротивления диода через каждые 5^0C, вплоть до 50^0C, записать результаты в таблицу 2.

4. По результатам построить график зависимости сопротивления от температуры.

5. Рассчитать по двум смежным точкам температурный коэффициент сопротивления диода.

Таблица 2.

t^0C	20	25	30	35	40	45	50
R(Ом)							

Контрольные вопросы

1. Основные положения теории электропроводности металлов, полупроводников и диэлектриков.
2. Объясните полученные зависимости сопротивления от температуры.
3. Зонная теория проводимости. Уровень Ферми.
4. Температурный коэффициент сопротивления. Единицы измерения.
5. Где и как используется зависимость сопротивления от температуры различных видов проводников?
6. Достоинства и недостатки различных видов электрических термометров.
7. Сверхпроводимость.

Список литературы

1. Калашников Э.Г. Электричество / Э.Г. Калашников. – М.: Наука, 1977.
2. Савельев И.В. Курс общей физики в 3 т./ И.В. Савельев. – М.: Наука, 1979.
3. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1997.
4. Детлаф. А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, В.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 2003.
5. Бордовский Г.А. Общая физика в 2 т. / Г.А. Бордовский, Э.В. Бурсиан. – М.: ВЛАДОС-Пресс, 2001.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИГА ФАЗ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: изучение цепей переменного тока, экспериментальная оценка сдвига фаз между током и напряжением для цепи переменного тока с последовательно соединенным активным сопротивлением, емкостью и индуктивностью.

Теоретическая часть

Основные характеристики переменного электрического тока

В технике большое распространение получил синусоидальный переменный ток, то есть ток, величина которого изменяется со временем по закону синуса или косинуса:

$$i = I_m \cos\left(\omega t + \varphi_0\right) \qquad (1)$$

где I_m – амплитуда тока, $\Phi = \left(\omega t + \varphi_0\right)$ – фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза.

Мгновенными значениями силы тока i, напряжения u, ЭДС и мощности p в цепях переменного тока называют их значения в данный момент времени.

Амплитудными значениями силы тока I_m, напряжения U_m, ЭДС $\mathcal{E}_m$ и мощности P_m в цепях переменного тока называют наибольшие мгновенные значения этих величин в случае синусоидального переменного тока за период.

Периодом T называется наименьший промежуток времени, через который переменный ток повторяет свои значения в той же самой последовательности (рис. 1).

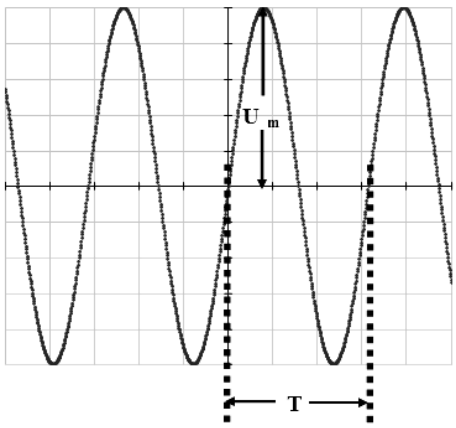


Рис. 1. Амплитудное значение напряжения U_m и период T сигнала

Частотой ν переменного периодического тока называется величина обратная периоду: Циклической или круговой частотой называют величину:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \qquad [\omega] = \frac{рад}{с}, \text{ радиан на секунду}$$

Сила тока и напряжение переменного тока непрерывно изменяются по величине, поэтому возникла необходимость каким-либо образом сравни-

вать различные токи друг с другом. При этом необходимо использовать такое действие переменного тока, которое бы не зависело от его направления. В этом отношении наиболее удобным оказалось тепловое действие тока. Причём по тепловому действию тока можно сравнивать переменные токи с постоянными. В связи с этим возникло понятие эффективного значения переменного тока. Для синусоидального тока рис. 1, получим:

$$I_{эфф} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad U_{эфф} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \qquad (4)$$

Наличие реактивных сопротивлений в цепи переменного тока приводит к тому, что возникает разность фаз между изменениями напряжения и тока в цепи (то есть ток и напряжение не одновременно достигают своего максимального значения). Это обстоятельство значительно усложняет расчёты цепей переменного тока.

Сдвиг фаз в цепях переменного тока.

Цепь переменного тока с идеальной емкостью

Рассмотрим цепь переменного тока с последовательно включенным идеальным конденсатором, имеющим только емкостное сопротивление X_C (рис. 2). При этом полагаем, что в цепи R=0, L=0

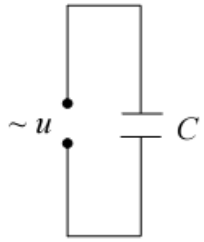


Рис. 2. Цепь переменного тока с идеальной ёмкостью

Пусть источник переменного тока (генератор звуковой частоты), дающий напряжение $U = U_m \sin\omega t$, (где U_m – амплитуда входного напряжения, а ω – циклическая частота) подключен к входу цепи.

Мгновенное значение силы тока в такой цепи с ёмкостью равно скорости изменения заряда на обкладках конденсатора $i = \frac{dq}{dt}$. Так как q=Cu, то можно записать:

$$i = \frac{dCu}{dt} = C\frac{du}{dt} = \frac{dU_m \sin\omega t}{dt} = \omega C U_m \cos\omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \qquad (5)$$

где $I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/\omega C}$ – закон Ома для цепи переменного тока с идеальной ёмкостью. Из этого следует, что роль сопротивления в цепи играет величина: $X_C = \frac{1}{\omega C}$, называемая **реактивным емкостным сопротивлением** [*Xc*] = Ом

Таким образом получаем, что:

$$\begin{cases} u = U_m \sin \omega t \\ i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$ - то есть в такой цепи ток опережает по фазе напряжение на $\frac{\pi}{2}$

График напряжения и тока в данной цепи, а также векторная диаграмма представлены на рис 3.

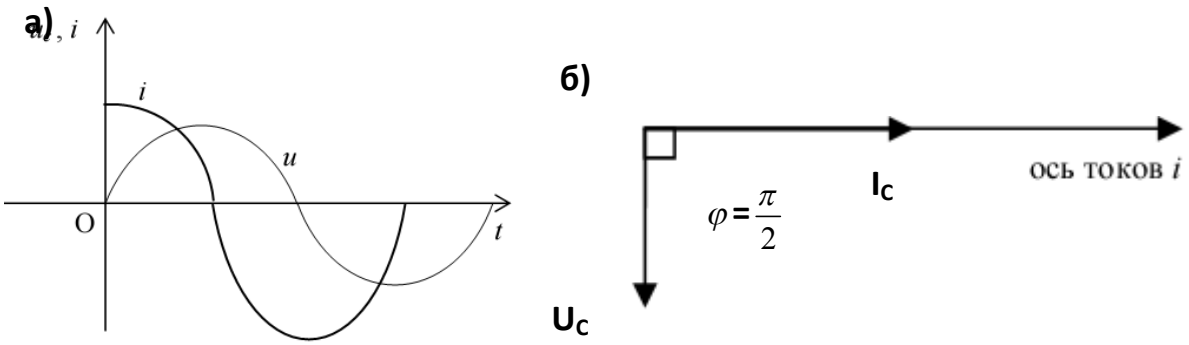


Рис. 3 Графики тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей только идеальную ёмкость а) и векторная диаграмма цепи б)

Для практического применения, часто используется последовательная RC цепочка (рис. 4). Обозначим U_{0R}, U_{0C} соответственно амплитудные значения напряжения на резисторе UR, конденсаторе UC. Полное напряжение на всей цепи, равное напряжению, поступающему с генератора, обозначим как U. Пользуясь тем, что напряжение U_{0R} на резисторе UR пропорционально току в цепи и синфазно с ним, можно построить векторную диаграмму аналогичную рис. 3.

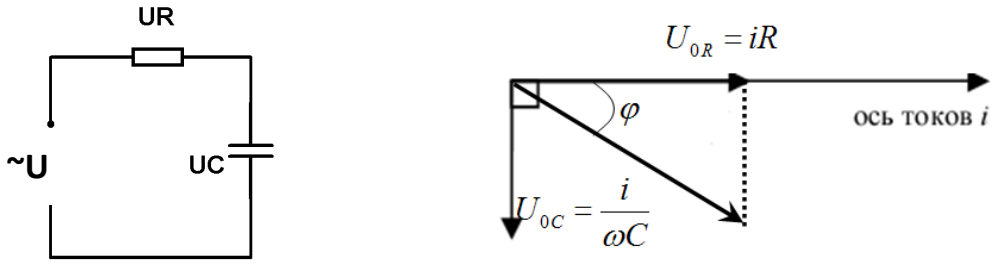


Рис. 4. Последовательная RC цепочка и векторная диаграмма для этой цепи

Напряжение на емкости U_{0C} всегда отстает по фазе от напряжения на сопротивлении U_{0R} на $\frac{\pi}{2}$, как показано на условной векторной диаграмме (рис. 4), где вектор $\overrightarrow{U_{0C}}$ соответствует амплитудному значению напряжения на емкости, а вектор $\overrightarrow{U_{0R}}$ – амплитудному значению напряжения на сопротивлении. Из закона Ома для цепи переменного тока амплитудное значение напряжения на емкости:

$$U_{0C} = i_0 \frac{1}{\omega C} \qquad (6)$$

где C – емкость, ω– круговая частота, i_o – амплитудное значение тока.

Таким образом, суммарное амплитудное напряжение на RC-цепочке (которое равно напряжению с выхода генератора U) равно векторной сумме $\overrightarrow{U_{0R}} + \overrightarrow{U_{0C}}$, т.е.:

$$U = i_0 \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \qquad (7)$$

Очевидно, что это **полное напряжение U отстает от напряжения на сопротивлении** $U_{0R}=iR_0$ **(а значит и от тока в цепи) на угол φ**. Этот фазовый сдвиг можно определить из векторной диаграммы:

$$tg\varphi = \frac{i/\omega C}{iR} = \frac{1}{\omega RC} \qquad (8)$$

Цепь переменного тока с последовательно включенными R, L, C.

Рассмотрим электрическую цепь с последовательно включенными активным сопротивлением R, индуктивность L и емкостью C (рис. 5).

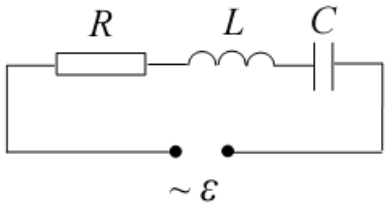


Рис. 5. Цепь переменного тока с последовательно соединенными R, L, C

Пусть ток в цепи меняется по гармоническому закону $I = I_0 \sin(\omega t)$.

По закону Ома на активном сопротивлении падение напряжения равно:

$$U_R = IR = I_0 R \sin(\omega t) \qquad (9)$$

Сдвига фаз между током I и напряжением U_R на резисторе нет.

Напряжение на конденсаторе равно:

$$U_C = \frac{q}{C} \qquad (10)$$

Но $I = \frac{dq}{dt}$, $q = \int I dt = I_0 \int \sin(\omega t) = -\frac{I_0 \cos(\omega t)}{\omega}$. Тогда из (10) следует, что на конденсаторе:

$$U_C = \frac{I_0 \cos(\omega t)}{\omega C} = \frac{I_0 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}{\omega C} \qquad (11)$$

На емкости имеется сдвиг фаз: напряжение U_C отстает от тока I на угол $\frac{\pi}{2}$.

При протекании через катушку переменного тока, в ней по закону Фарадея возникает ЭДС самоиндукции $\varepsilon_s = -L\frac{di}{dt}$. По второму правилу Кирхгофа с учетом того, что активное сопротивление катушки равно нулю R_A=0 Ом, запишем:

$$IR_A=\varepsilon+\varepsilon_S$$

$$\varepsilon=-\varepsilon_S= L\frac{dI}{dt}$$

Таким образом, можно записать:

$$U_L = L\frac{dI}{dt} \tag{12}$$

Тогда:

$$U_L = L\frac{dI}{dt} = LI_0\omega\cos(\omega t) = I_0\omega L\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right) \tag{13}$$

На индуктивности сдвиг фаз: напряжение *U* опережает ток *I* на угол $\frac{\pi}{2}$.

При протекании переменного тока через катушку *L* и конденсатор *C* тепло не выделяется. Сопротивления X_C и X_L называются реактивными. Реактивное сопротивление *LCR* -контура равно:

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \tag{14}$$

Построим векторную диаграмму токов и напряжений для последовательного LCR конура.

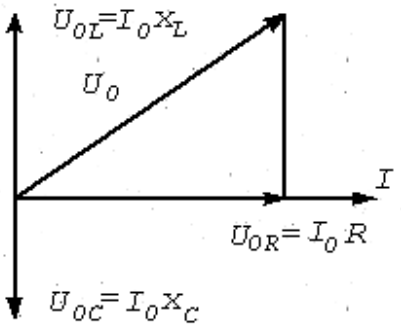


Рис. 6. Векторная диаграмма для цепи переменного тока с последовательно соединенными R, L, C

Длина вектора амплитуды напряжения на клеммах контура равна:

$$U_0 = I_0\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2} \tag{15}$$

Полное сопротивление контура называется импедансом и равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \tag{16}$$

Напряжение на клеммах контура равно:

$$U = U_0 \sin\left(\omega t + \varphi\right), \tag{17}$$

где сдвиг фаз между током I в контуре полным напряжением U равен:

$$tg\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad \varphi = arctg\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) \tag{18}$$

Выполнение работы

Для измерения сдвига фаз можно использовать фигуры Лиссажу, получаемые на экране осциллографа. Пусть имеются два синусоидальных напряжения одинаковой частоты ω. Подадим эти напряжения на вертикальные и горизонтальные пластины осциллографа. Смещение луча под действием этих напряжений пропорционально напряжению:

по горизонтали $x = A\sin\left(\omega t\right)$

по вертикали $y = B\sin\left(\omega t + \varphi\right)$, где φ – сдвиг фаз между напряжениями; *A=s1·u1, B=s2·u2* – амплитуды смещения луча, пропорциональные амплитудам напряжения *u1* и *u2* и коэффициентам усиления *s1* и *s2* соответствующих каналов осциллографа. Исключив время t, получим:

$$\left(\frac{x}{A}\right)^2 + \left(\frac{y}{B}\right)^2 - \frac{2xy}{AB}\cos\varphi = \sin^2\varphi \tag{19}$$

Выражение (19) – уравнение эллипса, описываемого электронным лучом на экране осциллографа (рис. 7).

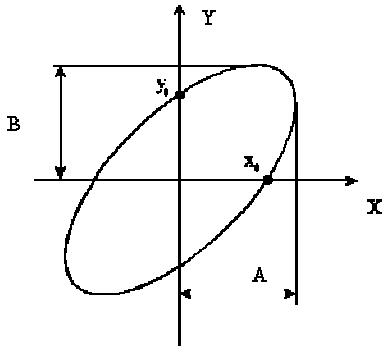


Рис. 7. К определению сдвига фаз методом фигур Лиссажу

Из квадратного уравнения (19) можно выразить в явном виде $y = y(x)$:

$$y = \frac{B}{A}\left(x\cos\varphi + \sqrt{A^2 - x^2}\,\sin\varphi\right) \tag{20}$$

Найдем точки пересечения эллипса с осями координат. Приняв *x=0,* получим $y_0 = B\sin\varphi$. Аналогично при *y=0* получим $x_0 = A\sin\varphi$.

Тогда для нахождения сдвига фаз получим формулу:

$$\sin\varphi = \pm\frac{y_0}{B} = \pm\frac{x_0}{A} \qquad (21)$$

$$\varphi = \pm\arcsin\left(\frac{y_0}{B}\right) = \pm\arcsin\left(\frac{x_0}{A}\right)$$

К недостаткам метода эллипса относится практическая невозможность установления знака угла сдвига фаз.

Принципиальная электрическая схема учебной установки для изучения сдвига фаз в цепях переменного тока приведена на рис. 8.

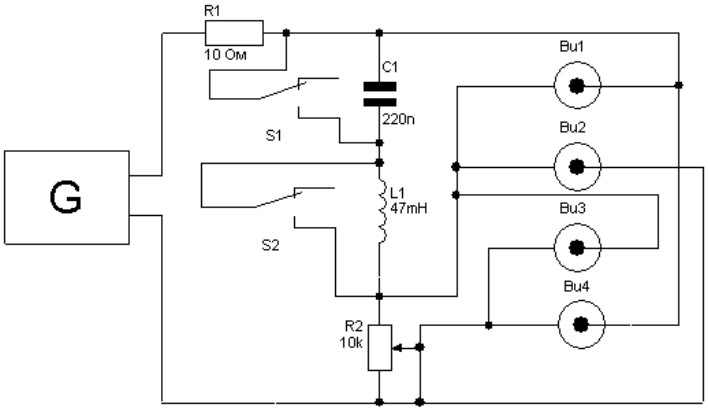


Рис. 8. Упрощенная принципиальная электрическая схема для исследования сдвига фаз в цепи переменного тока

Цифровой кварцованный генератор G выдает синусоидальное напряжение, поступающее на исследуемую цепь. Частота генератора задается с помощью кнопок «ЧАСТОТА», амплитуда регулируется ручкой «АМПЛИТУДА». Переключатели «ЁМКОСТЬ» и «ИНДУКТИВНОСТЬ» (S1 и S2 на рис. 7) позволяют включать в цепь по отдельности конденсатор C1 и катушку самоиндукции L1 либо шунтировать их накоротко. Переменный резистор «СОПРОТИВЕНИЕ» (R2 на рис. 7) используется в качестве магазина сопротивлений и позволяет плавно регулировать активное сопротивление в контуре в диапазоне до 10 кОм. Для защиты от перегрузки в цепь введен балластный резистор с малым сопротивлением R1=10 Ом. Значение сопротивления измеряется цифровым омметром и выводится совместно с текущим значением частоты на ЖКД LCD дисплей. Установка снабжена микропроцессорной системой управления и контроля необходимых параметров.

Для исследования цепи переменного тока в корпусе установки выведены контрольные точки Bu1-Bu4 для подключения измерительных щупов электронного осциллографа.

Индуктивность цепи, L = 47 мГн.

Емкость цепи C = 220 нФ.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой рис. 8., разобраться в назначении переключателей и ручек регулировки. Проверить целостность соединительных проводов и сетевых шнуров учебной установки и электронного осциллографа.

2. Включить учебную установку и электронный осциллограф в сеть ~220 В. Поставить переключатели «СЕТЬ» на панели учебного модуля и электронного осциллографа в положение «ВКЛ», при этом должны загореться сигнальные индикаторы «СЕТЬ».

3. Установить частоту ν генератора от 1 кГц до 3 кГц с помощью кнопок «ЧАСТОТА». Определить круговую частоту $\omega = 2\pi\nu$ c^{-1}

4. **Измерить сдвиг фаз между током и полным напряжением (напряжением генератора)** в RC цепи с последовательно соединенным активным сопротивлением и конденсатором (без катушки самоиндукции). Для этого поставить переключатель «КОНДЕНСАТОР» в положение «ВКЛ», переключатель «ИНДУКТИВНОСТЬ» в положение «ВЫКЛ» (тем самым вы шунтируете катушку самоиндукции и получаете цепь, аналогичную рис. 4 в которой сопротивление R переменно).

5. Подключить измерительные щупы осциллографа к контрольным точкам: ВХОД Y – Bu3; ВХОД X – Bu4. Тем самым, на ось Y подается сигнал с переменного резистора R2, а на ось X сигнал с выхода генератора (полное напряжение цепи см. схему рис. 8).

6. Подготовить осциллограф к режиму измерения фигур Лиссажу. Для этого поставить переключатель «+ - x-EXT» в положение «X-EXT» - режим фигур Лиссажу. В этом режиме внутренний генератор развертки осциллографа выключается. Переключатель VOLTS/DIV (Вольт/дел) рекомендуется установить в положение.5 V.

7. Вращая ручку «СОПРОТИВЛЕНИЕ», установить в цепи небольшое активное сопротивление ~0.7 кОм (700 Ом) (по показаниям цифрового омметра). Получить эллипс на экране осциллографа. Вращая ручку «АМПЛИТУДА» установить такое значение амплитуды с выхода генератора, чтобы эллипс занимал ¾ экрана. Вращением ручек «POSITION» оси Y и X установить эллипс СТРОГО в центр экрана. Изображение эллипса в следствии наличия наводок от катушки самоиндукции может быть несколько размыто, особенно на больших частотах и при большом усилении генератора.

8. Определить точки пересечения эллипса с осями координат x_0, y_0 и максимальные отклонения луча A и B (см. рис. 7). По формуле (21) определить экспериментально сдвиг фаз между током в RC цепи и напряжением генератора, а по формуле (8) рассчитать φ теоретически.

Все измеренные и рассчитанные данные занести в таблицу:

R, Ом	C, Ф	$\omega = 2\pi\nu$, c^{-1}	$\frac{x_0}{A}$	$\frac{y_0}{B}$	$\varphi_{эксп1} = \arcsin\left(\frac{y_0}{B}\right)$	$\varphi_{эксп1} = \arcsin\left(\frac{x_0}{A}\right)$	$<\varphi_{эксп}>=\frac{\varphi_{эксп1}+\varphi_{эксп2}}{2}$	$\varphi_{теор}$

9. Вращая ручку «СОПРОТИВЛЕНИЕ» наблюдать эволюцию эллипса при увеличении активной нагрузки в цепи. Провести измерения аналогичные п.8 для 3-5 других значений сопротивления R.

10. **Приступить к изучению последовательной LCR цепочки**. Для этого, установив активное сопротивление порядка 700 Ом, подключить к цепи катушку самоиндукции, поставив переключатель «ИНДУКТИВНОСТЬ» в положение «ВКЛ». Наблюдать, как включение в цепь индуктивности влияет на форму эллипса и сдвиг фаз. Измерить этот сдвиг фаз по методу аналогичному п. 8 и сравнить получившиеся значения с теоретическим расчетом по формуле (18).

11. Повторить измерения п. 10 для других значений активного сопротивления R либо частот ω

12. **Измерить сдвиг фаз между током в цепи I и напряжением U_c на конденсаторе.** Для этого следует отключить катушку самоиндукции, зашунтировав ее переключателем «ИНДУКТИВНОСТЬ», переведя его в положение «ВЫКЛ»

13. Подключить измерительные щупы к контрольным точкам Bu2 и Bu1. Тем самым на одну из осей осциллографа подается сигнал U_C с конденсатора, а на другую сигнал с резистора U_R, который пропорционален току и совпадает по фазе с током в цепи. Теоретически, сдвиг фаз между током и напряжением на конденсаторе равен $\frac{\pi}{2}$ и на экране осциллографа будет наблюдаться круг (только в случае равенства амплитуд сигналов, поступающих на вход X и Y осциллографа). В режиме фигур Лиссажу коэффициент чувствительности оси X электронного осциллографа, если не применяются дополнительные делители, фиксирован и равен 0,5 Вольт/дел. Устанавливая коэффициент чувствительности оси Y таким же K_y=0,5 Вольт/дел, при некотором положении переменного резистора «СОПРОТИВЛЕНИЕ» получаем на экране осциллографа круг. В этом случае амплитуды напряжений, подаваемые на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины осциллографа равны, т. е. $U_R = U_C$, что позволяет оценить емкостное сопротивление конденсатора X_C, которое в данном случае равно активному сопротивлению резистора R (по показаниям омметра).

14. Провести оценку емкостного сопротивления конденсатора X_C согласно п. 13 для 2-3 частот и сравнить полученные значения с теоретическим расчетом по формуле $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Контрольные вопросы

1. Что называется переменным электрическим током?

2. Перечислите основные характеристики переменного тока.

3. Чему равен сдвиг фаз в последовательной RC цепочке между током и напряжением с выхода генератора? Между током и напряжением на обкладках конденсатора? Свой ответ аргументируйте соответствующими векторными диаграммами.

4. Нарисуйте векторную диаграмму для цепи переменного тока с последовательно соединенными R, L, C. Получите выражение для реактивного сопротивления такого LCR контура и выражения для импеданса цепи.

5. Проанализируйте векторную диаграмму данной цепи. Как зависит угол сдвига фаз между напряжением на клеммах генератора и током в цепи от частоты, индуктивности и емкости контура. Отдельно рассмотрите случай равенства индуктивного и емкостного сопротивления.

6. Объясните используемый вами в этой работе метод фигур Лиссажу для измерения сдвига фаз. В чем его недостатки?

7. Выведите формулы для нахождения угла сдвига фаз этим методом.

8. Объясните принцип работы учебной установки исходя из принципиальной схемы рис. 8.

9. Предложите другие способы определения угла сдвига фаз в цепях переменного тока.

Литература

1. Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин / Э.Г. Атамалян. – М. Высшая школа, 1982.

2. Фазосдвигающие устройства / Е.Д. Колтик. – М. Изд-во стандартов, 1981.

3. Измерения в электронике. Справочник / Под ред. В.А. Кузнецова. – М. Энергоатомиздат,1987.

4. Практикум по физике. Электричество и магнетизм: уч. пособ. для вузов / под ред. Ф.А. Николаева – М.: Высш. шк., 1991. – 151 с.

5. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2 / И.В. Савельев – М.: Наука, 1988. – 496 с.

6. Детлаф А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский – М.: Высш. шк., 1989. – 608 с.

7. Бордовский Г.А. Общая физика: курс лекций с компьютерной поддержкой. Т.1. / Г.А. Бордовский, Э.В. Бурсиан – М.: Изд-во Владос-Пресс, 2001. – 240 с.

8. Кошкин Н.И. Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич – М.: Наука, 1988. – 284 с.

9. Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М.: Физматгиз. 1985–1986.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПЕДАНСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: изучение цепей переменного тока, экспериментальная проверка закона Ома для цепи переменного тока с последовательно соединенным активным сопротивлением, емкостью и индуктивностью.

Теоретическая часть

Переменный электрический ток

Переменным называется ток, который с течением времени изменяет свою величину или направление.

В промышленности наибольшее распространение получил синусоидальный переменный ток, то есть ток, величина которого изменяется со временем по закону синуса или косинуса:

$$i = I_m \cos\left(\omega t + \varphi_0\right) \qquad (1)$$

где I_m – амплитуда тока, $\Phi = \left(\omega t + \varphi_0\right)$ – фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза.

Синусоидальный переменный ток имеет целый ряд преимуществ перед постоянным током, что и объясняет его использование в промышленности и в быту:

1. от генератора постоянного тока получить высокие напряжения практически невозможно;

2. генератор и двигатель переменного тока значительно проще по конструкции, надёжнее и дешевле генератора и двигателя постоянного тока;

4. при необходимости переменный ток можно преобразовать в постоянный ток;

5. переменный ток можно трансформировать, то есть повышать или понижать его напряжение с помощью трансформаторов.

В цепях переменного тока, кроме процессов нагрева проводов имеются дополнительные процессы, обусловленные изменяющимися магнитными и электрическими полями. Изменение этих полей оказывает влияние на величину и форму тока в цепи и может приводить к дополнительным потерям энергии. Величина и форма кривой силы тока зависят не только от параметров электрической цепи, но и от частоты и формы кривой приложенного напряжения. Поэтому анализ явлений, происходящих в цепях переменного тока, вследствие этого значительно усложняются.

Электромагнитные возмущения распространяются по цепи со скоростью света в вакууме. Если за время, необходимое для передачи электромагнитного возмущения в самую отдалённую точку электрической цепи,

величина тока не успевает значительно измениться, то мгновенные значения тока во всех сечениях цепи будут практически одинаковыми. (Токи, удовлетворяющие такому условию, называются квазистационарными).

Квазистационарным называется переменный ток, который во всех сечениях неразветвлённой электрической цепи имеет одинаковую силу тока.

К мгновенным значениям квазистационарных токов можно применять законы Ома и правила Кирхгофа (однако при этом необходимо учитывать возникающую при изменении тока ЭДС электромагнитной индукции).

Основные характеристики переменного синусоидального электрического тока

Мгновенными значениями силы тока i, напряжения u, ЭДС и мощности p в цепях переменного тока называют их значения в данный момент времени.

Амплитудными значениями силы тока I_m, напряжения U_m, ЭДС $\mathcal{E}_m$ и мощности P_m в цепях переменного тока называют наибольшие мгновенные значения этих величин в случае синусоидального переменного тока за период.

Периодом T называется наименьший промежуток времени, через который переменный ток повторяет свои значения в той же самой последовательности (рис. 1).

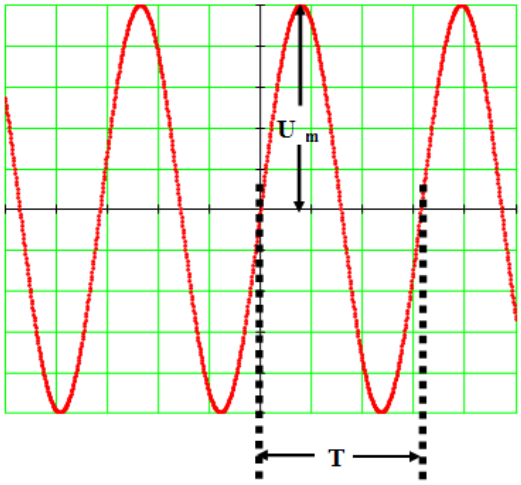


Рис. 1. Амплитудное значение напряжения U_m и период T сигнала

Частотой ν переменного периодического тока называется величина обратная периоду:

$$\nu = \frac{1}{T}, \qquad [\nu] = \text{Гц}, \text{Герц} \tag{2}$$

Циклической или круговой частотой называют величину:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \qquad [\omega] = \frac{рад}{с}, \quad \text{радиан на секунду} \tag{3}$$

Сила тока и напряжение переменного тока непрерывно изменяются по величине, поэтому возникла необходимость каким-либо образом сравнивать различные токи друг с другом. При этом необходимо использовать такое действие переменного тока, которое бы не зависело от его направления. В этом отношении наиболее удобным оказалось тепловое действие тока. Причём по тепловому действию тока можно сравнивать переменные токи с постоянными. В связи с этим возникло понятие эффективного значения переменного тока.

Эффективным (действующим, среднеквадратичным) значением переменного тока $I_{эфф}$ называется такая величина силы постоянного тока, который оказывал бы в цепи такое же тепловое воздействие за время одного периода. По определению:

$$I_{äåéñò â} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,dt} \qquad (4)$$

$$U_{äåéñò â.} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\,dt}$$

резистор R подключен к источнику постоянного напряжения, например батареи E (рис. 2). В течение времени T, равное периоду переменного напряжения в нем выделится количество теплоты равное:

$$Q = P \cdot T = I^2 RT \qquad (5)$$

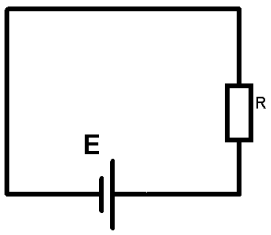


Рис. 2

Подключим теперь этот резистор в цепь переменного тока. Количество теплоты, выделенное переменным током за время *dt* равно *dQ*:

$$dQ = i(t)Rdt$$

а за период T:

$$Q = dQ = \int_0^T i^2(t)Rdt \qquad (6)$$

Приравнивая (6) и (5) получим: $I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,dt}$

Для синусоидального тока рис. 1, проводя интегрирование, получим:

$$I_{эфф} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad U_{эфф} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \qquad (7)$$

Как правило, все измерительные приборы в электрических цепях отградуированы в действующих значениях величин.

Все элементы электрической цепи обладают сопротивлением. Различают два вида сопротивления: активное и реактивное. Если при прохождении тока через элемент цепи происходит только необратимое превращение электрической энергии в теплоту, то сопротивление такого участка цепи называют активным. Если такого превращения не происходит, то сопротивление называют реактивным.

Элемент цепи с активным сопротивлением называется резистором. Реактивным сопротивлением – емкостным и индуктивным – обладают соответственно конденсаторы и катушки индуктивности.

Наличие реактивных сопротивлений в цепи переменного тока приводит к тому, что возникает разность фаз между изменениями напряжения и тока в цепи (то есть ток и напряжение не одновременно достигают своего максимального значения). Это обстоятельство значительно усложняет расчёты цепей переменного тока.

Сопротивлением участка цепи постоянного тока называют величину равную:

$$R = \frac{U}{I} \tag{8}$$

Сопротивлением участка цепи переменного тока называют величину равную:

$$R = \frac{U_{эфф}}{I_{эфф}} = \frac{U_m}{I_m} \tag{10}$$

Математическое описание переменного тока можно осуществить тремя методами:

- аналитический метод (с помощью тригонометрических функций);
- символический метод (с помощью комплексных чисел);
- метод векторных диаграмм (используется графический метод описания переменного тока).

Аналитический метод описания синусоидальных токов иногда приводит к громоздким математическим преобразованиям при определении каких-либо величин. Поэтому для упрощения расчётов в этих случаях были придуманы другие методы вычислений, которые мы сейчас рассмотрим.

Метод векторных диаграмм

Гармонические колебания допускают наглядную графическую интерпретацию. Ее смысл состоит в том, что каждому гармоническому колебанию с частотой ω_0 можно поставить в соответствие вращающийся с угловой скоростью ω_0 вектор, длина которого равна амплитуде s_0 а его начальное (стартовое) положение задается углом φ_0 совпадающим с начальной фазой (рис. 3).

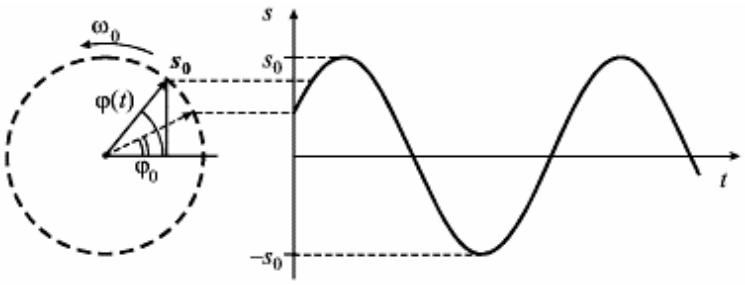


Рис. 3. Графическое описание колебаний с помощью метода векторных диаграмм

Вертикальная проекция вектора s_0 изменяется со временем:

$$s(t) = s_0 \sin \varphi(t) \tag{11}$$

Мгновенное положение вектора s_0 определяется углом $\varphi(t)$ – фазой:

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \varphi_0 \tag{12}$$

При угловой скорости (круговой частоте) ω_0 вектор совершает $\nu_0 = \dfrac{\omega_0}{2\pi}$ оборотов (циклов) в секунду, а продолжительность одного оборота (период) равна отношению угла 2π к угловой скорости ω_0: $T = \dfrac{2\pi}{\omega_0}$.

С помощью векторных диаграмм легко осуществить сложение гармонических колебаний. Так, если необходимо сложить два гармонических колебания с одинаковыми частотами:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) = s_{01}\sin(\omega_0 t + \varphi_1) + s_{02}\sin(\omega_0 t + \varphi_2) = s_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \tag{13}$$

то амплитуду s_0 и начальную фазу φ_0 суммарного колебания $s(t)$ с той же частотой ω_0 можно легко рассчитать из рис. 4а, на котором графически изображена операция сложения векторов $\vec{s_0} = \vec{s_{01}} + \vec{s_{02}}$ в момент времени t=0.

$$\begin{aligned} s_0 &= \sqrt{\left(s_{01}\cos\varphi_1 + s_{02}\cos\varphi_2\right)^2 + \left(s_{01}\sin\varphi_1 + s_{02}\sin\varphi_2\right)^2} \\ \varphi_0 &= arctg\left(\frac{s_{01}\sin\varphi_1 + s_{02}\sin\varphi_2}{s_{01}\cos\varphi_1 + s_{02}\cos\varphi_2}\right) \end{aligned} \tag{14}$$

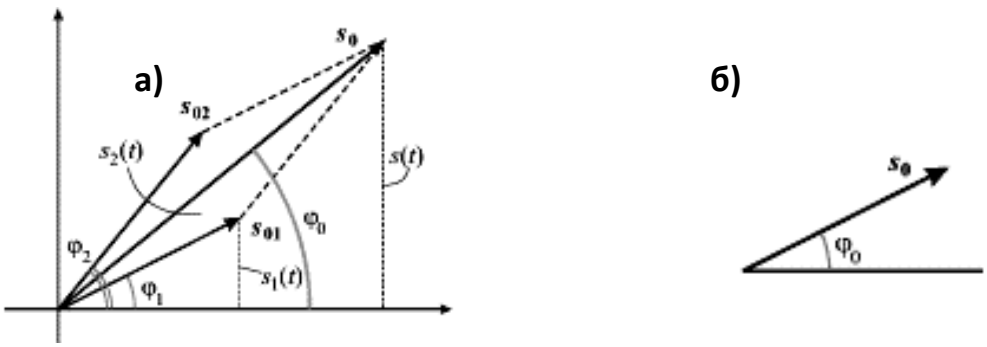


Рис. 4. Графическое сложение гармонических колебаний

Ясно, что вертикальная проекция вектора s_0 будет также изменяться по гармоническому закону с частотой ω_0 поскольку взаимное расположение векторов s_{01}и s_{02} не изменяется с течением времени.

Из этой диаграммы наглядно видно, что суммарное колебание $s(t)$ опережает по фазе колебание $s_1(t)$ и отстает по фазе от колебания $s_2(t)$. Полная фаза для каждого из трех колебаний в произвольный момент времени отличается от их начальных фаз на одну и ту же величину $\omega_0 t$ которую при построении векторных диаграмм не учитывают. При этом колебание изображается неподвижным вектором (рис. 4б), а частота колебания предполагается известной.

Этот метод очень удобен при сложении двух или нескольких гармонических колебаний, так как в этом случае громоздкие тригонометрические преобразования можно заменить простым сложением векторов.

Используя идеи этого метода, для различных цепей синусоидального тока строят свои диаграммы, на которых одновременно в виде векторов изображают напряжения и токи в цепи, а по ним определять сдвиг по фазе между изменениями тока и напряжения, а также ряд других характеристик цепи.

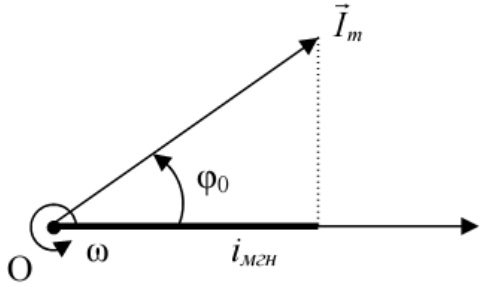


Рис. 5. Графическое изображение синусоидального тока на векторной диаграмме

Символический метод описания синусоидального тока

Идея этого метода заключается в записи гармонических колебаний $i = I_m \cos\left(\omega t + \varphi_0\right)$ в комплексном виде:

$$\dot{I} = I_m e^{j(\omega t + \varphi_0)}, \quad \text{где} \quad j = \sqrt{-1} \text{ - мнимая единица.} \qquad (15)$$

Согласно формуле Эйлера $e^{j\alpha} = \cos\alpha + j\sin\alpha$ поэтому комплексное уравнение (15) можно записать в виде:

$$\dot{I} = I_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} = I_m \left[\cos\left(\omega t + \varphi_0\right) + j\sin\left(\omega t + \varphi_0\right)\right]. \qquad (16)$$

При анализе такой записи предполагается, что вещественная часть уравнения (16) представляет собой уравнение гармонического колебания $i = I_m \cos\left(\omega t + \varphi_0\right)$. Таким образом, величина силы тока, записанной в форме уравнения (15), в любой момент времени определяется вещественной частью этого уравнения.

Этот метод очень удобен при умножении и дифференцировании уравнений гармонических колебаний, так как в этом случае громоздкие тригонометрические преобразования можно заменить простым действиями над показательными функциями.

Как отмечалось ранее, расчёт цепей переменного тока значительно усложняется по сравнению с цепями постоянного тока из-за наличия в них реактивного сопротивления.

Ниже мы более подробно рассмотрим особенности работы некоторых цепей переменного синусоидального тока.

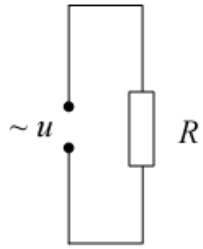


Рис. 6. Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Цепь переменного тока только с активным сопротивлением

Пусть напряжение в сети изменяется по закону:

$$u = U_m \sin\left(\omega t\right) \tag{17}$$

Тогда по закону Ома можем записать:

$$i = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R}\sin\omega t = I_m \sin\omega t\,, \tag{18}$$

где $I_m = \dfrac{U_m}{R}$ – закон Ома для цепи переменного тока только с активным сопротивлением.

Из уравнений (17) (18) следует, что:

$\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t) \\ i = I_m \sin(\omega t) \end{cases}$ – т. е. разность фаз между изменениями тока и напряжения в такой цепи равна нулю (см. рис. 7).

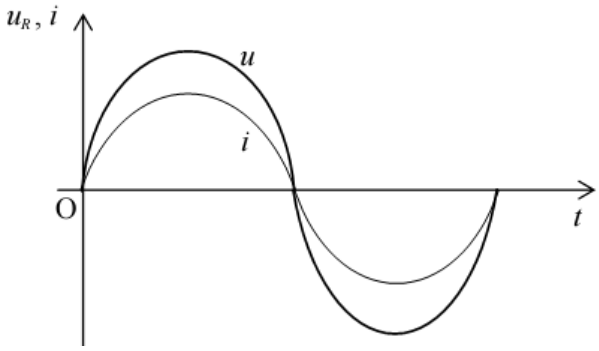


Рис. 7. Графики тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление

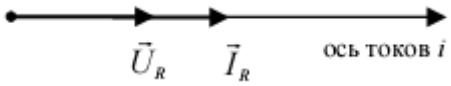


Рис. 8. Векторная диаграмма цепи

Цепь переменного тока только с идеальной индуктивностью. (R=0, C=0)

Рассмотрим цепь переменного тока на рис. 8. Пусть внешнее ЭДС в цепи меняется по закону $\varepsilon = \mathcal{E}_m \sin \omega t$. При протекании через катушку переменного тока, в ней по закону Фарадея возникает ЭДС самоиндукции $\varepsilon_s = -L\dfrac{di}{dt}$. С учетом того, что сопротивление катушки равно нулю, по второму правилу Кирхгофа можно записать:

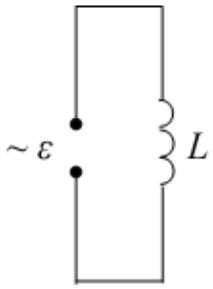


Рис. 8. Цепь переменного тока с индуктивностью.

$$0 = \varepsilon + \varepsilon_s \text{ или } \varepsilon = -\varepsilon_s \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = L\frac{di}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{di}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} = \frac{\mathcal{E}_m}{L}\sin \omega t .$$

Таким образом, имеем:

$$i = \int_0^{\infty} \frac{\mathcal{E}_m}{L}\sin \omega t dt = -\frac{\mathcal{E}_m}{\omega L}\cos \omega t + Const = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega L}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + Const .$$

При отсутствии составляющей постоянного тока Const=0. Тогда окончательно получим:

$$i = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega L}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \qquad (19)$$

Если внутренне сопротивление источника ЭДС пренебрежимо мало, то он создает на входе цепи напряжение, равное его ЭДС. В этом случае напряжение на катушке индуктивности будет меняться по закону:

$$u = U_m \sin(\omega t) \qquad (20)$$

и уравнение (19) можно переписать в виде:

$$i = \frac{U_m}{\omega L}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \qquad (21)$$

где $I_m = \dfrac{U_m}{\omega L}$ – закон Ома для цепи переменного тока с идеальной индуктивностью. Из уравнения (21) следует, что роль сопротивления в такой цепи играет величина:

$X_L = \omega L$, называется **реактивным индуктивным сопротивлением** $[X_L] = \text{Ом}$

Из уравнений (20) (21) следует, что:

$\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t) \\ i = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases}$ - т. е. в такой цепи ток отстает по фазе от напряжения на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 9 а, б).

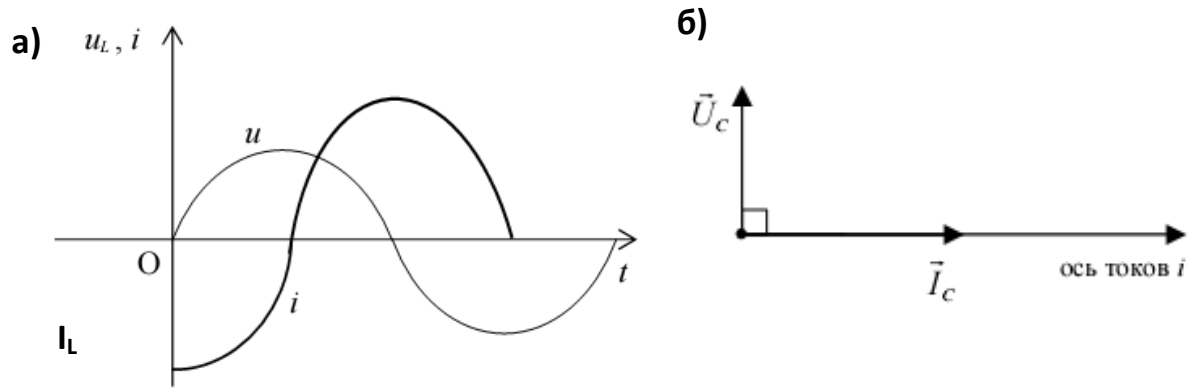


Рис. 9 Графики тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей только индуктивность а) и векторная диаграмма цепи б)

Физически это явление моно объяснить следующим образом: при изменении напряжения на катушке в ней возникает ЭДС самоиндукции, которая направлена так, что препятствует изменению тока, текущего по катушке. В результате этого явления появляется сдвиг фаз между изменением напряжения на индуктивности и силой тока в цепи.

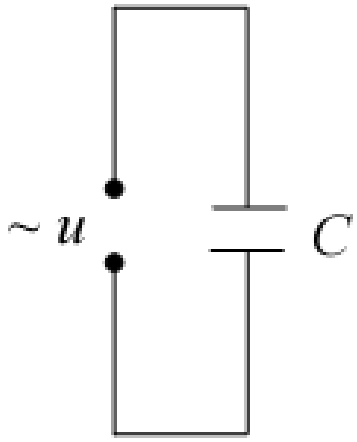


Рис. 10. Цепь переменного тока с идеальной ёмкостью

Цепь переменного тока только с идеальной емкостью. (R=0, L=0)

Рассмотрим электрическую цепь на рис. 10. Будем считать, что емкость в цепи является идеальной, т. е. R=0, L=0. Пусть напряжение в цепи меняется по закону:

$$u = U_m \sin(\omega t) \qquad (22)$$

Мгновенное значение силы тока в такой цепи с ёмкостью равно скорости изменения заряда на обкладках конденсатора $i = \frac{dq}{dt}$. Так как q=Cu, то можно записать:

$$i = \frac{dCu}{dt} = C\frac{du}{dt} = \frac{dU_m \sin\omega t}{dt} = \omega C U_m \cos\omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \qquad (23)$$

где $I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/\omega C}$ – закон Ома для цепи переменного тока с идеальной ёмкостью. Из этого следует, что роль сопротивления в цепи играет величина:

$X_C = \frac{1}{\omega C}$, называемая **реактивным емкостным сопротивлением**. $[X_C] = Ом$.

Из сравнения (22) и (23) следует, что:

$$\begin{cases} u = U_m \sin\omega t \\ i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$ - то есть в такой цепи ток опережает по фазе напряжение на $\frac{\pi}{2}$

График напряжения и тока в данной цепи, а также векторная диаграмма представлены на рис 11.

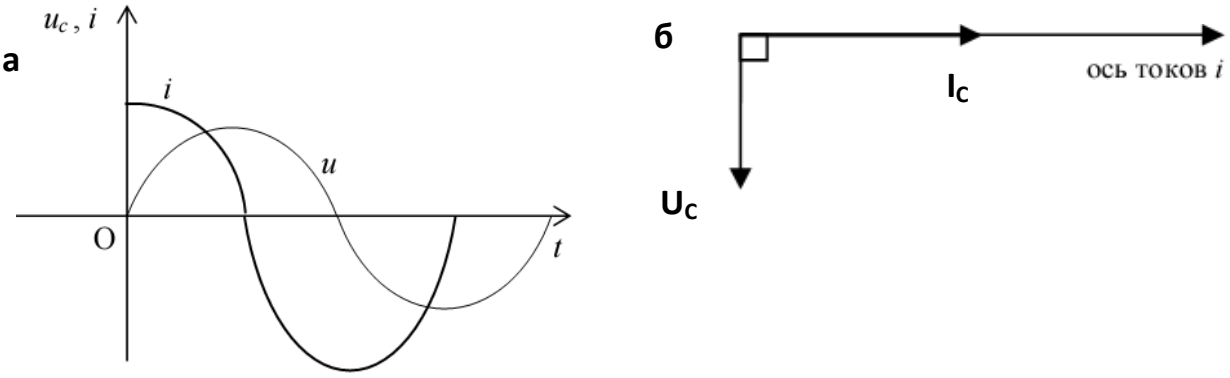


Рис. 11. Графики тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей только идеальную ёмкость а) и векторная диаграмма цепи б)

Цепь переменного тока с последовательно включенными R, L, C.

Перейдем теперь к анализу полной электрической цепи с последовательно включенными активным сопротивлением R, индуктивность L и емкостью C, исследуемой в данной работе (рис. 12).

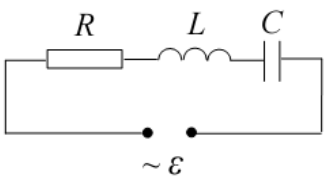


Рис. 12. Цепь переменного тока с последовательно соединенными R, L, C

Пусть ЭДС в цепи меняется по гармоническому закону:

$$\varepsilon = \mathcal{E}_m \cos \omega t \tag{24}$$

В результате чего в цепи потечет электрический ток:

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) \tag{25}$$

Определим амплитуду I_m и сдвиг фаз φ между током и внешней ЭДС, если известны параметры цепи R, L, C. На основании второго закона Кирхгофа для данной цепи запишем:

$$u_R + u_C = \varepsilon + \varepsilon_s\,, \tag{26}$$

Т. е. сумма падений напряжений на отдельных элементах контура равна в каждый момент времени сумме ЭДС, действующих в контуре.

Для любого момента времени t справедливы следующие соотношения:

$$u_R = iR \qquad R = const\,; \tag{27}$$

$$u_C = \frac{1}{C} q = \frac{1}{C} \int_0^t i dt \qquad C = const\,; \tag{28}$$

$$\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt} \qquad L = const\,, \tag{29}$$

где R – сопротивление резистора, C- емкость конденсатора, L – индуктивность катушки, u_R и u_C – напряжения на соответствующих элементах цепи, i- ток в цепи, q – заряд конденсатора, $\varepsilon_s = -L\frac{di}{dt}$ – ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке индуктивности при прохождении через неё переменного тока. Подставим (27), (28), (29) в (26).

Получим: $$iR + \frac{1}{C}\int_0^t i dt = \varepsilon - L\frac{di}{dt}.$$

Следовательно:

$$iR + \frac{1}{C}\int_0^t i dt + L\frac{di}{dt} = \varepsilon\,. \tag{30}$$

Далее, подставляя в (30) выражения (24) (25):

$$I_m R\cos(\omega t - \varphi) + \frac{1}{C}\int_0^t I_m \cos(\omega t - \varphi) dt + L\frac{dI_m \cos(\omega t - \varphi)}{dt} = \mathcal{E}_m \cos \omega t$$

После выполнения операций интегрирования и дифференцирования получим:

$$I_m R\cos(\omega t - \varphi) + I_m \frac{1}{\omega C}\sin(\omega t - \varphi) - I_m \omega L \sin(\omega t - \varphi) = \mathcal{E}_m \cos \omega t\,.$$

Воспользуемся известными тригонометрическими соотношениями:

$$\sin(\omega t-\varphi)=\cos(\omega t-\varphi-\frac{\pi}{2}),\qquad -\sin(\omega t-\varphi)=\cos(\omega t-\varphi+\frac{\pi}{2}),$$

преобразуем выражение к окончательному виду:

$$I_m R\cos(\omega t-\varphi)+\frac{I_m}{\omega C}\cos(\omega t-\varphi-\frac{\pi}{2})+I_m\omega L\cos(\omega t-\varphi+\frac{\pi}{2})=\mathcal{E}_m\cos\omega t\ . \quad (31)$$

Из анализа (31) можно сделать следующие выводы:

- Напряжение на резисторе u_R совпадает по фазе с током в цепи *i*.
- Напряжение на ёмкости u_C отстает по фазе от тока *i* на угол $\frac{\pi}{2}$.
- Напряжение на индуктивности u_L опережает ток *i* на угол $\frac{\pi}{2}$.

Из этого же уравнения следует, что:

$$U_R=I_m R,\ \ U_C=I_m\frac{1}{\omega C}\ \text{ и }\ U_L=I_m\omega L. \quad (32)$$

Уравнение (31) позволяет определить амплитуду результирующего тока I_m, сдвиг фаз между током в цепи и изменением внешней ЭДС, а также полное сопротивление цепи Z, изображенной на рис. 10.

Учитывая уравнения (32) перепишем (31) в виде:

$$U_R\cos(\omega t-\varphi)+U_C\cos(\omega t-\varphi-\frac{\pi}{2})+U_L\cos(\omega t-\varphi+\frac{\pi}{2})=\mathcal{E}_m\cos\omega t \quad (33)$$

Далее, используя метод векторных диаграмм, представим каждое слагаемое (33) в виде векторов $\overrightarrow{U_R}$, $\overrightarrow{U_C}$, $\overrightarrow{U_L}$ и $\overrightarrow{\mathcal{E}_m}$.

Запишем это уравнение как сумму трех векторов, каждый из которых описывает изменение напряжения на резисторе, емкости и индуктивности соответственно:

$$\vec{U}_R+\vec{U}_C+\vec{U}_L=\vec{\mathcal{E}}_m.$$

Так как R, L и C соединены последовательно, то через них протекает одинаковый по величине ток, поэтому в качестве основной оси отсчёта на векторной диаграмме выберем ось токов. Тогда, учитывая сдвиги фаз, возникающие между током и напряжениях на ёмкости и индуктивности, векторная диаграмма для нашей цепи будет иметь вид рис. 13.

Из рис. 9. по теореме Пифагора имеем: $\mathcal{E}_m=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}$ или

$$\mathcal{E}_m=\sqrt{I_m^2R^2+(I_m\omega L-\frac{I_m}{\omega C})^2}\ .$$

$$\mathcal{E}_m=I_m\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}\ .$$

Вынося *I* за знак корня получим:

Таким образом, окончательно имеем:

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{Z}$$ – Закон Ома для переменного тока с последовательно соединенными R. L и C

Величина $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ называется **полным сопротивлением электрической цепи или импедансом** $[Z] =$ **Ом**. Сдвиг фаз φ между внешней ЭДС генератора и силой тока *i* можно найти из векторной диаграммы рис. 10:

$$tg\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

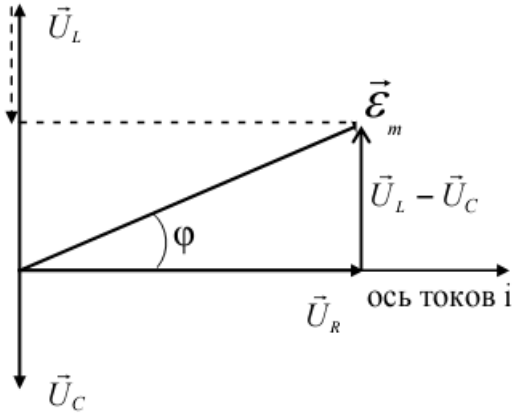


Рис. 13. Векторная диаграмма цепи переменного тока с последовательно соединенными R, L, C

Выполнение работы

Принципиальная электрическая схема учебной установки (упрощенная) приведена на рис. 14.

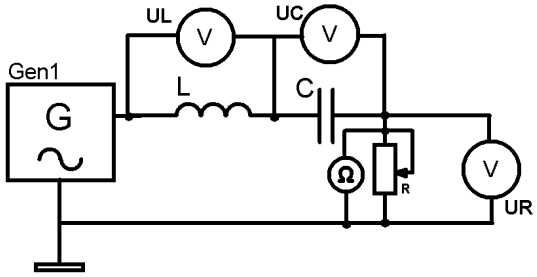


Рис. 14. Принципиальная электрическая блок-схема учебной лабораторной установки ФЭЛ-19

Гармоническая ЭДС создается с помощью кварцованного цифрового генератора G. Частоту генератора можно изменять ступенчато от 1 кГц до 10 кГц с шагом 1 кГц (кнопки «ЧАСТОТА») Текущее значение частоты генератора индуцируется на цифровом LCD ЖКД индикаторе. Для измерений действующих значений напряжения на емкости, катушки самоиндукции и резисторе применяются чувствительные высокочастотные циф-

ровые вольтметры. Переменный резистор R служит для плавной установки активного сопротивления цепи, значение сопротивления резистора измеряется цифровым Омметром и выводится на экран. Для переключения между режимами измерения (1 режим – основной: Омметр R, частота f; 2 режим: вольтметр UR, UC; 3 режим вольтметр UR, UL) предусмотрены кнопки «РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЯ». Для смены частоты необходимо перейти в основной режим. Учебный модуль снабжен микропроцессорной системой контроля и управления.

Порядок выполнения

1. Проверить целостность сетевого провода перед включением установки в сеть и разобраться в принципиальной схеме учебной установки на рис. 11.
2. Включить установку в сеть ~220 В. Поставить переключатель есть на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальные индикатор.
3. Установить одну из частот генератора с помощью кнопок «ЧАСТОТА».
4. Установить переменный резистор «R» (активное сопротивление) в среднее положение. Занести значение R и частоты ν в табл. 1.
5. Нажатием кнопки «R,f / U» «РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЯ» включить вольтметры, измеряющие падения напряжений на катушке индуктивности и резисторе R. Ручку R при этом не трогать (в любом режиме работы, вращение ручки R приводит к изменению активного сопротивления) Занести измеренные данные в таблицу 1.
6. Переключить установку кнопкой «UR, UL / UR, UC» «РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЯ» для точного измерения падения напряжения на конденсаторе (падение напряжение на резисторе, естественно не изменяется). Занести измеренные значения в табл. 1
7. Рассчитать по формулам (32) действующее значение электрического тока в цепи, значения индуктивного и емкостного сопротивления, а также значения емкости конденсатора и индуктивности катушки самоиндукции. Следует помнить, что вольтметры измеряют действующие значения напряжения, в формулы же (32) входят амплитудные значения. Однако, согласно (7), действующие и амплитудные значения различаются только постоянным множителем и (32) можно также использовать для действующих значений без изменений (подставляя показания вольтметров, получаем не I_m а $I_{дейст}$). При расчетах считать все элементы цепи идеальными.
8. Нажатием кнопки «R,f / U» перейти в режим работы Омметр-Частота и установить другое значение активного сопротивления R, не изменяя частоты генератора. Записать R в таблицу 1.
9. Повторить действия пп.5, 6, 7. Все рассчитанные и измеренные данные занести в таблицу.

10. Нажатием кнопки «R,f / U» перейти в режим работы Омметр-Частота и, устанавливая кнопками «ЧАСТОТА», другие значения частоты генератора, провести аналогичные измерения пп. 5, 6, 7 для еще каких-либо двух-трех частот и двух- трех значений активной нагрузки R.

11. Рассчитать средние значения индуктивности <L> и емкости <C>.

12. По формулам $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ рассчитать импеданс электрической цепи для частот ω и активных сопротивлений R, при которых вы проводили измерения. Все вычисления производите в СИ. Данные занести в табл. 1

13. Сравните рассчитанные вами значения емкости C и индуктивности L с реальными значениями этих параметров для данной установки:

C=10 нФ; L=0,47 Гн

Таблица 1

	R, Ом	U_R, В	U_C, В	U_L, В	C, нФ	L, Гн	Z, Ом
$\nu = \ldots$ Гц							
$\omega = 2\pi\nu = \ldots$							
$\nu = \ldots$ Гц							
$\omega = 2\pi\nu = \ldots$							

<L>=… Гн, <C>=… нФ

14. Проверить справедливость закона Ома для цепи переменного тока. Рассчитать для нескольких частот ω и значений импеданса Z действующее значение ЭДС $\varepsilon_{äåéñò â.} = I_{äåéñò â} \cdot Z$ с выхода генератора G и сравнить его с реальным значением для данной установки $\varepsilon_{äåéñò â.} \approx 5$ Вольт.

15. По окончании работы поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебной установки в положение «ВЫКЛ» и вынуть сетевую вилку из розетки. **Все расчеты проводить после измерений**, т. к. режим работы установки прерывистый – через каждый час работы необходим перерыв не менее 10 минут.

Контрольные вопросы

1. Что называется переменным электрическим током?

2. Перечислите основные характеристики переменного тока.

3. Что называется действующим значением напряжения, тока, ЭДС? Каковы эти значения при синусоидальном токе? Выведите формулу (7) для действующих значений.

4. Перечислите основные методы вычислений для цепей переменного тока.

5. Из рисунка 4 выведите формулу (14) для сложения гармонических колебаний. Объясните построение векторной диаграммы.

6. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением в цепочках R, L и R, C? Построить векторные диаграммы.

7. Чему равны индуктивное и емкостное сопротивления? Как они изменяются с частотой?

8. Рассмотрите цепь на рис. 10 и выведите закон Ома для нее.

9. Что называется импедансом электрической цепи? Что произойдет, если при некоторой частоте генератора ω_0 в электрической цепи рис. 10 значения индуктивного и емкостного сопротивлений сравняются по величине? Изобразите этот случай на векторной диаграмме.

Литература

1. Практикум по физике. Электричество и магнетизм: уч. пособ. для вузов / под ред. Ф.А. Николаева – М.: Высш. шк., 1991. – 151 с.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2 / И.В. Савельев – М.: Наука, 1988. – 496 с.

3. Детлаф А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский – М.: Высш. шк., 1989. – 608 с.

4. Бордовский Г.А. Общая физика: курс лекций с компьютерной поддержкой. Т. 1. / Г.А. Бордовский, Э.В. Бурсиан – М.: Изд-во Владос-Пресс, 2001. – 240 с.

5. Кошкин Н.И. Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М. Г. Ширкевич – М.: Наука, 1988. – 284 с.

6. Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М.: Физматгиз. 1985–1986

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6.
ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и режимов работы однофазных выпрямителей и сглаживающих фильтров.

Теоретическая часть

Выпрямителем называют устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии источника переменного тока в электрическую энергию, потребляемую приемником постоянного тока. Такое преобразование необходимо в том случае, когда первичным источником электроэнергии является однофазная (трехфазная) сеть или автономный генератор переменного тока, а потребитель электроэнергии работает на постоянном токе.

Для потребителей постоянного тока мощностью до нескольких сотен ватт используют однофазные выпрямители, подключаемые к однофазной сети переменного тока. Однофазные выпрямители, как правило, входят в состав источников вторичного электропитания (ИВЭ) радио- и телевизионных, измерительных, вычислительных электронных устройств, применяют для питания электродвигателей постоянного тока, зарядки аккумуляторных батарей и др.

Для потребителей постоянного тока мощностью более 1 кВт используют трехфазные выпрямители, подключаемые к промышленной трехфазной сети.

Структурная схема традиционного однофазного источника питания постоянного тока представлена на рис. 1.

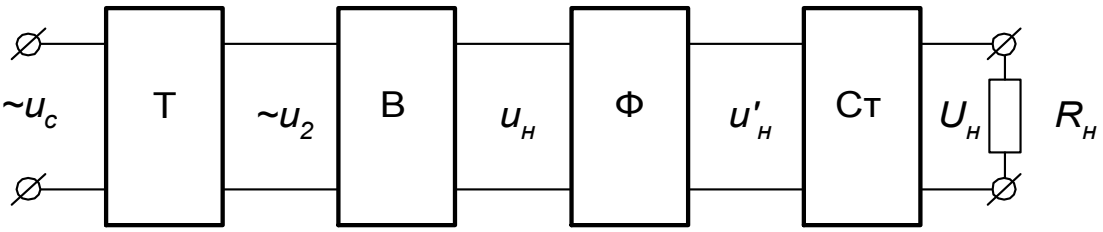


Рис. 1

Основным и обязательным элементом схемы является выпрямитель (В) на полупроводниковых вентилях. Принцип действия любого выпрямителя основан на односторонней проводимости вентилей, преобразующих переменный ток в пульсирующий ток постоянного направления. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения после выпрямителя может быть включен сглаживающий фильтр (Ф), а при необходимости постоянства величины напряжения $U_н$ на нагрузке – стабилизатор напряжения (Ст). Выпрямитель подключается к питающей сети переменного тока через трансформатор (Т) в случае, если требуется преобразование уровня

напряжения питающей сети $U_с$ к необходимому уровню напряжения нагрузки $U_н$, а также для электрического разделения цепей.

Основными недостатками выпрямителей с трансформаторным входом являются большие габариты, масса трансформатора и сглаживающего фильтра. В малогабаритных ИВЭ электронной аппаратуры применяют схемы с бестрансформаторным входом, работа которых основана на многократном преобразовании электрической энергии. В таких схемах выпрямитель подключен непосредственно к питающей сети, а согласование уровней напряжений сети и нагрузки производится трансформатором на повышенной промежуточной частоте переменного тока, что позволяет значительно уменьшить габариты и массу трансформатора и фильтра.

В данной работе рассматриваются два вида неуправляемых однофазных выпрямителей: однополупериодный и двухполупериодный мостовой. В неуправляемых выпрямителях нет возможности регулировать величину выпрямленного напряжения, потому что они выполняются на неуправляемых вентилях - полупроводниковых диодах. При анализе работы выпрямителей будем считать вентили и трансформатор идеальными, т.е. сопротивление диодов при прямом включении равно нулю, при обратном включении - бесконечности; для трансформатора пренебрегаем сопротивлением рассеяния и активным сопротивлением обмоток.

Однополупериодный выпрямитель.

Однофазный однополупериодный выпрямитель содержит один вентиль *VD*, включенный в цепь вторичной обмотки трансформатора *T* последовательно с нагрузкой $R_н$ (рис. 2, а). Временные диаграммы напряжений и токов, поясняющие работу выпрямителя на активную нагрузку без фильтра, представлены на рис. 2,б. В первый полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора $u_2=U_{2m}Sin(\omega t)$, когда оно положительно, диод *VD* открыт, т.к. на его аноде действует положительный потенциал. На этом интервале времени (*0 – T/2*) через нагрузку будет протекать ток $i_н = \frac{U_{2m}}{R_н}Sin(\omega t)$, являющийся для диода прямым током. При этом $u_в=0$, $u_н=u_2=U_{2m}Sin(\omega t)$. На втором полупериоде напряжение u_2 становится отрицательным, и диод закрывается под действием отрицательного потенциала на аноде диода. На этом интервале времени (*T*/2 - *T*) $i_н=0$, $u_н=0$, напряжение на вентиле (диоде) $u_в=u_2=U_{2m}Sin(\omega t)$ будет являться обратным напряжением диода.

В результате такой работы вентиля ток через нагрузку будет протекать в течение только одного полупериода переменного напряжения u_2 и вызывать на нагрузке периодическое напряжение $u_н$, среднее значение которого может быть определено по теореме о среднем значении функции на отрезке (рис. 3):

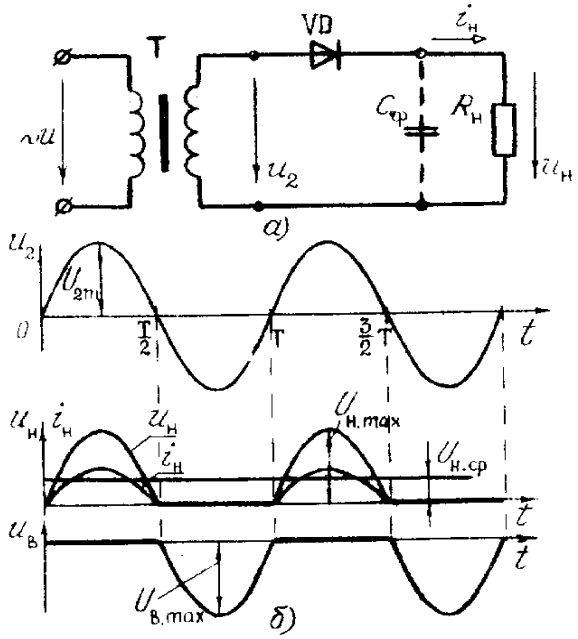


Рис. 2.

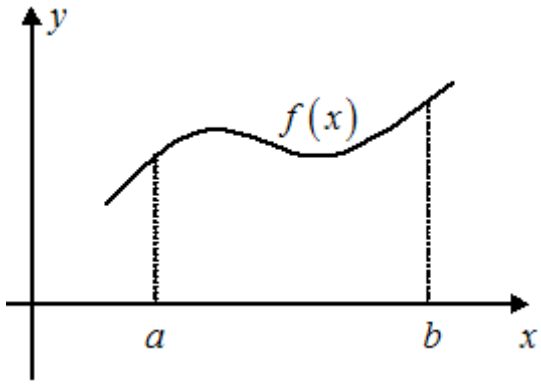


Рис. 3.

$$< f >= \frac{1}{b-a}\int_a^b f(x)dx \qquad (1)$$

Таким образом, для формы напряжения на нагрузки однополупериодного выпрямителя рис. 2 получаем среднее значение (или, как иногда его называют - постоянная составляющая) за период Т:

$$U_i = \frac{1}{T}\int_0^T U_{2m} Sin(\omega t)d(t) = \frac{1}{T}U_m \int_0^{T/2} Sin(\omega t)dt = \frac{U_{2m}}{\pi} \qquad (2)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

При выводе формулы (2) мы учли, что ток через нагрузку течет только в отрезок времени $\left[0 - \frac{T}{2}\right]$.

Действующим (эффективным, среднеквадратичным) значением тока (напряжения) называют величину, численно равную такому значению постоянного тока, который за время одного периода произведет тот же самый тепловой или электродинамический эффект, что и периодический ток:

$$I_{действ} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} \qquad U_{действ} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt} \qquad (3)$$

Поясним запись формулы (3). Пусть резистор R подключен к источнику постоянного напряжения, например батареи Е (рис. 4). В течение времени Т, равное периоду переменного напряжения в нем выделится количество теплоты равное:

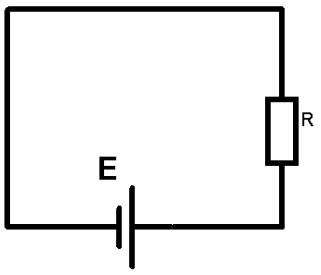


Рис. 4.

$$Q = P \cdot T = I^2 RT \tag{4}$$

Подключим теперь этот резистор в цепь переменного тока. Количество теплоты, выделенное переменным током за время *dt* равно *dQ*:

$$dQ = i(t)Rdt$$

а за период Т:

$$Q = dQ = \int_0^T i^2(t)Rdt \tag{5}$$

Приравнивая (5) и (4) получим:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt}$$

При однополупериодном выпрямлении используя (3) найдем:

$$I = \sqrt{\frac{I_м^2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2 \omega t \, dt} = \sqrt{\frac{I_м^2}{T} \cdot \frac{T}{4}} = \frac{I_м}{2}, \tag{6}$$

Аналогично для действующего значения напряжения получим:

$$U_{действ} = \frac{U_{2m}}{2} \tag{7}$$

Средний ток через вентиль $I_{пр}$ равен среднему току нагрузки $I_{пр}=I_н$.
Максимальное напряжение на закрытом вентиле

$$U_{2m} = \pi \cdot U_i = 3{,}14 U_i$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_{действ} = \frac{U_{действ}}{R_i} = \frac{\pi U_i}{2R_i} \approx 1.57\, I_i$$

Пульсации выпрямленного напряжения оцениваются коэффициентом пульсации, который представляет собой отношение амплитуды первой (основной) гармоники $U_{(1)2m}$, как наибольшей из всех остальных к среднему значению напряжения $U_{ср}$ и определяется по формуле:

$$K_{I(1)} = \frac{U_{(1)2m}}{U_{ср}} \tag{8}$$

Для получения значения коэффициента пульсации воспользуемся преобразованием Фурье для периодических функций с произвольным

периодом. Согласно математической теории вещественная форма ряда Фурье для функции с произвольным периодом $T=2l$ записывается как:

$$f(x) \square \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos\frac{\pi n x}{l} + b_n \sin\frac{\pi n x}{l} \right) \tag{9}$$

где коэффициенты a_0, a_n, b_n равны:

$$a_0 = \frac{1}{l}\int_{-l}^{l} f(\tau)d\tau,\ \ a_n = \frac{1}{l}\int_{-l}^{l} f(\tau)\cos\frac{\pi n\tau}{l}d\tau,\ \ b_n = \frac{1}{l}\int_{-l}^{l} f(\tau)\sin\frac{\pi n\tau}{l}d\tau \tag{10}$$

$$n = 1,2,3,...$$

Разложим сигнал на нагрузке однополупериодного выпрямителя (рис. 2) в ряд Фурье. Будем считать, что период сигнала равен T=2π (в дальнейшем это не повлияет на ход рассуждений) и примем $U_{2m} = 1$. Тогда математически функцию сигнала с выхода однополупериодного выпрямителя можно представить в виде (рис. 5):

$$f(x) = \begin{cases} \sin x, x \in [0,\pi) \\ 0, x \in [\pi, 2\pi] \end{cases} \tag{11}$$

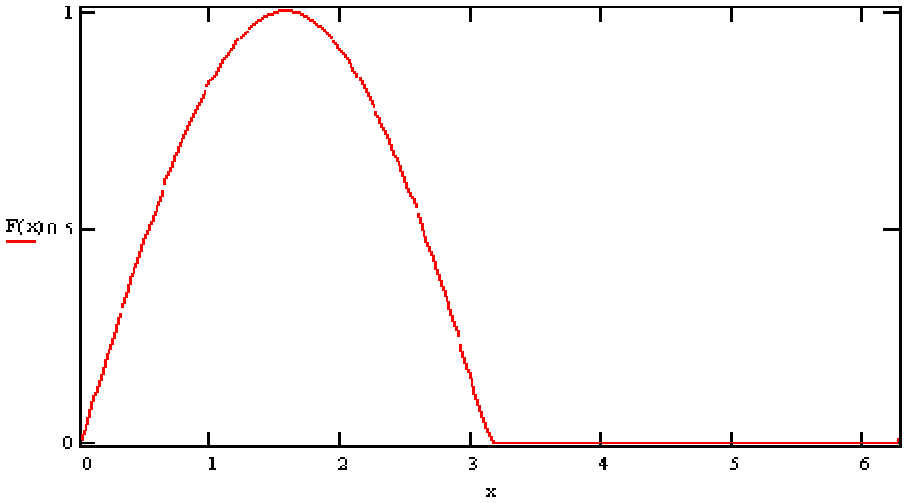


Рис. 5.

Функция периодическая с периодом $T = 2\pi - 0$. *(f(x+T)=f(x))* Функция имеет на промежутке $(0,2\pi]$ конечное число точек разрыва первого рода.

Сумма ряда в точках функции сходится к значению самой функции, а в точках разрыва к величине $\frac{f(x_0 - 0) + f(x_0 + 0)}{2}$, где x_0-точки разрыва. Производная также непрерывна везде, кроме конечного числа точек разрыва первого рода. Вывод: функция удовлетворяет условию разложения в ряд Фурье. Согласно (9) и (10) запишем:

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)dx = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{0} 0dx + \frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi} \sin x dx = -\frac{1}{\pi}\cos x\Big|_0^{\pi} = \frac{2}{\pi} \tag{12}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\cos nx dx = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{0} 0dx + \frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi} \sin x \cos nx dx = \frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\pi}\left[\sin(1+n)x + \sin(1-n)x\right]dx =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\pi}\sin(x+nx)dx + \frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\pi}\sin(x-nx)dx = -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\cos(x+nx)}{1+n}\Big|_0^{\pi} + \frac{\cos(x-nx)}{1-n}\Big|_0^{\pi}\right) =$$

$$= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\cos(\pi+n\pi)+1}{1+n} + \frac{\cos(\pi-n\pi)+1}{1-n}\right) = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{2+(n-1)\cos(\pi+n\pi)-(n+1)\cos(\pi-n\pi)}{1-n^2}\right) =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\frac{2-(\cos(\pi+n\pi)+\cos(\pi-n\pi))}{1-n^2};$$

$$a_n = \frac{2+2(-1)^n}{2\pi(1-n^2)} = -\frac{1+(-1)^n}{\pi(n^2-1)}$$

Из разложения видим, что при n нечетном a_n принимает значения равные 0, и дополнительно надо рассмотреть случай когда n=1.

$$a_1 = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\sin x\cos x dx = \frac{1}{\pi}\frac{\sin^2 x}{2}\Big|_0^{\pi} = 0$$

Поэтому формулу для a_n можно записать в виде:

$$a_n = -\frac{2}{\pi(2n-1)(2n+1)}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{0} 0dx + \frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi}\sin x \sin nx dx = \frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\pi}\left[\cos(1-n)x - \cos(1+n)x\right]dx = \frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\pi}\cos(1-n)xdx -$$

$$-\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\pi}\cos(1+n)xdx = \frac{1}{2\pi}\frac{\sin(x-nx)}{1-n}\Big|_0^{\pi} - \frac{1}{2\pi}\frac{\sin(x+nx)}{1+n}\Big|_0^{\pi} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{\sin(\pi-n\pi)}{1-n} - \frac{\sin(\pi+n\pi)}{1+n}\right) = 0$$

(так как $\sin(\pm n\pi) = 0$).

Отдельно рассмотрим случай когда n=1:

$$b_1 = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\sin x \sin x dx = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\frac{1-\cos 2x}{2}dx = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}dx - \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\cos 2x dx = \frac{x}{2\pi}\Big|_0^{\pi} - \frac{\sin 2x}{4\pi}\Big|_0^{\pi} = \frac{1}{2}$$

Подставим найденные коэффициенты в получим (9) с учетом $T=2\pi=2l$:

$$F(x) = \frac{1}{\pi} + \frac{\sin x}{2} - \frac{2}{\pi}\left(\frac{\cos 2x}{1\cdot 3} + \frac{\cos 4x}{3\cdot 5} + \frac{\cos 6x}{5\cdot 7} + \ldots + \frac{\cos 2nx}{(2n-1)(2n+1)} + \ldots\right) \qquad (13)$$

и вообще

$$F(x) = \frac{1}{\pi} + \frac{\sin x}{2} - \frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos 2nx}{4n^2-1} \qquad (14)$$

Таким образом, обобщая (12) на случай произвольного периода $T = \frac{2\pi}{\omega}$ и амплитуды U_{2m}, выпрямленное пульсирующее напряжение u_2 на нагрузке может быть представлено рядом Фурье как периодическая функция времени

$$u_2 = \frac{U_{2m}}{\pi} + \frac{U_{2m}}{2}\sin\omega t - \frac{2U_{2m}}{1\cdot 3\cdot \pi}\cos 2\omega t - \frac{2U_{2m}}{3\cdot 5\cdot \pi}\cos 4\omega t - \dots , \quad (15)$$

а ток в нагрузке

$$i_i = \frac{u_2}{R} = I_0 + I_{(1)2m}\sin\omega t - I_{(2)2m}\cos 2\omega t - I_{(3)2m}\cos 4\omega t - \dots , \quad (16)$$

где $U_0 = I_0 = I_m/\pi = 0{,}318 I_m$ – постоянная составляющая выпрямленного тока; $I_{(i)m}$ – амплитудное значение i-ой гармоники тока нагрузки.

А коэффициент пульсации согласно (8) определяется как:

$$K_I = \frac{\frac{U_{2m}}{2}}{\frac{U_{2m}}{\pi}} = \frac{\pi}{2} = 1{,}57 \quad (17)$$

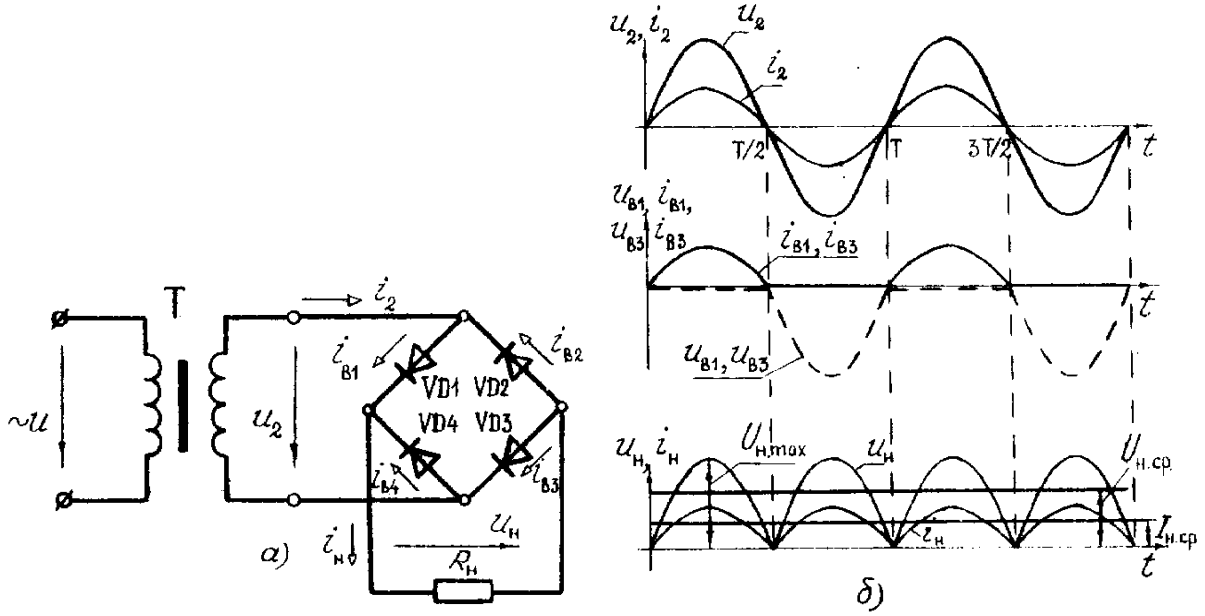


Рис. 6. Двухполупериодная мостовая схема

Недостатками однополупериодного выпрямителя являются большой уровень пульсаций выпрямленного напряжения, вынужденное намагничивание сердечника трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки, плохое использование трансформатора, низкие коэффициенты использования вентилей ($K_I = I_{в.max}/I_н = \pi$, $K_U = U_{обр.max}/U_н = \pi$), малый КПД выпрямителя $\eta = 0{,}481$.

Однополупериодную схему применяют обычно в маломощных выпрямителях и в тех случаях, когда не требуется высокой степени сглаживания выпрямленного напряжения – для питания маломощных усилителей, электронно-лучевых трубок и в высоковольтных установках для испытания изоляции.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из четырех вентилей, включенных по мостовой схеме (рис. 6). К одной диагонали моста подано переменное напряжение $u_2 = U_{2m} Sin(\omega t)$, к другой -

подключена нагрузка $R_н$. Временные диаграммы напряжений и токов представлены на рис. 4.3, б. В первый полупериод напряжения u_2, когда потенциал на аноде *VD1* положительный, диоды *VD1* и *VD3* открыты, и ток нагрузки протекает через *VD1*, $R_н$ и *VD3*. В этом интервале времени $u_н=u_2$, диоды *VD2* и *VD4* закрыты и находятся под обратным напряжением. На втором полупериоде напряжение u_2 становится отрицательным, и диоды *VD1* и *VD3* будут теперь в закрытом состоянии находиться под обратным напряжением, а диоды *VD2* и *VD4* – открыты. Ток $i_н$ будет протекать через *VD2*, *VD4* и через нагрузку $R_н$ в том же направлении, что и в предыдущий полупериод.

В результате такой попарной работы диодов ток в нагрузке будет протекать в течение двух полупериодов и вызывать напряжение $u_н$, среднее значение которого будет в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении (см. формулы (1) и (2)

$$U_{ср} = U_i = 2U_{2m}/\pi = \frac{2\sqrt{2}U_{действ}}{\pi} = 0.9U_{действ};\ U_{действ} = 1.11U_i;$$
$$U_{действ} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}};\ I_{действ} = 1.11I_i \qquad (17\text{-}1)$$

Так как пары диодов проводят ток нагрузки поочередно по полпериода, то прямой ток вентилей будет равен $I_{пр}=0,5I_{н.}$

Максимальное напряжение на закрытых вентилях $U_{обр.т} = U_{2m} = 1{,}57U_н$.

Коэффициент пульсации определяется аналогично однополупериодной схеме, с той лишь разницей, что следует учитывать прохождение тока в интервалы времени $\left[\frac{T}{2} - T\right]$. Тогда получим:

Ток нагрузки $i_i = \frac{u_2}{R} = I_m\left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{1\cdot 3\cdot \pi}\cos 2\omega t - \frac{4}{3\cdot 5\cdot \pi}\cos 4\omega t - \ldots\right)$. (18)

Напряжение на нагрузки пропорционально току:

$$u_2 = i_i R = U_m\left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{1\cdot 3\cdot \pi}\cos 2\omega t - \frac{4}{3\cdot 5\cdot \pi}\cos 4\omega t - \ldots\right) \qquad (19)$$

Из выражения (17) видно, что ток $i_н$ не содержит нечетных гармоник, что облегчает задачу фильтрации выпрямленного напряжения.

Коэффициент пульсации для этой схемы определяется по формуле (8):

$$K_{\tilde{I}} = \frac{\frac{4U_{2m}}{3\pi}}{\frac{2U_{2m}}{\pi}} = 0{,}66 \qquad (20)$$

Двухполупериодный выпрямитель в сравнении с однополупериодным имеет следующие преимущества: выпрямленные ток и напряжение вдвое больше, значительно меньший уровень пульсаций $u_н$, вентили выбираются по половине тока нагрузки, хорошо используется трансформатор и отсутствует вынужденное подмагничивание его сердечника. Мостовая

схема имеет преобладающее применение в выпрямителях небольшой и средней мощности.

Применение сглаживающих фильтров. Работа выпрямителя на резистивно-емкостную нагрузку

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяют сглаживающие фильтры. Основными элементами пассивных фильтров являются реактивные элементы: конденсаторы и дроссели. На базе транзисторов и операционных усилителей выполняются более сложные активные фильтры. Эффективность фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания, равным отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра $S = \frac{q_{вх}}{q_{вых}}$.

Емкостной фильтр состоит из конденсатора, подключаемого параллельно нагрузке, при этом напряжение $u_н = u_C$ определяется процессами заряда и разряда конденсатора. В однополупериодном выпрямителе конденсатор $C_ф$ будет заряжаться через вентиль, если $u_2 > u_C$ (интервал времени $t_1 - t_2$ на рис. 7). Когда $u_2 < u_C$ ($t_2 - t_3$), вентиль закрыт, и конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки $R_н$ с постоянной времени $\tau_р = C_ф R_н$; при этом $u_н = u_C = U_{C\max} e^{-t/\tau_р}$.

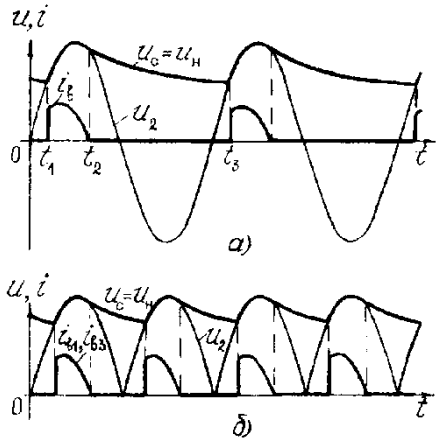


Рис. 7.

Достоинством емкостного фильтра является простота, повышенное напряжение на нагрузке и хорошее сглаживание при малых выходных токах. С увеличением тока нагрузки при уменьшении $R_н$ уменьшается постоянная разряда конденсатора и возрастает коэффициент пульсаций на нагрузке. Емкостной фильтр целесообразно использовать при высокоомной нагрузке с малым значением выпрямленного тока. Коэффициент сглаживания тем выше, чем больше емкость конденсатора. При большой емкости конденсатора, когда выполняется условие $\tau = RC >> 2\pi/\omega$, амплитуда пульсаций $\Delta U_п$ и $к_п$ могут быть определены по как:

$$\Delta U_{п} = \frac{U_{(1)m} 2\pi}{\tau_{п} \omega} \qquad \hat{e}_{п} \approx \frac{\Delta U_{п}}{U_{(1)m}} = \frac{2\pi}{\omega\tau} . \qquad (21)$$

Индуктивный фильтр состоит из индуктивной катушки (дросселя), включаемой последовательно с нагрузкой. Дроссель с индуктивностью $L_ф$ не оказывает сопротивления постоянной составляющей тока нагрузки, но подавляет переменные составляющие тока, для которых реактивное сопротивление катушки возрастает с увеличением частоты высших гармоник. Недостатками индуктивных фильтров являются большие габариты и масса дросселя, поэтому применяются такие фильтры преимущественно в трехфазных выпрямителях большой и средней мощности при низкоомной нагрузке с большими значениями токов.

Для более эффективного сглаживания применяют составные или многозвенные фильтры, коэффициент сглаживания которых равен произведению коэффициентов сглаживания отдельных звеньев $S_ф = S_1 \cdot S_2 \cdot \ldots \cdot S_n$. К составным фильтрам можно отнести *Г*- и *П*-образные *LC* и RC-фильтры.

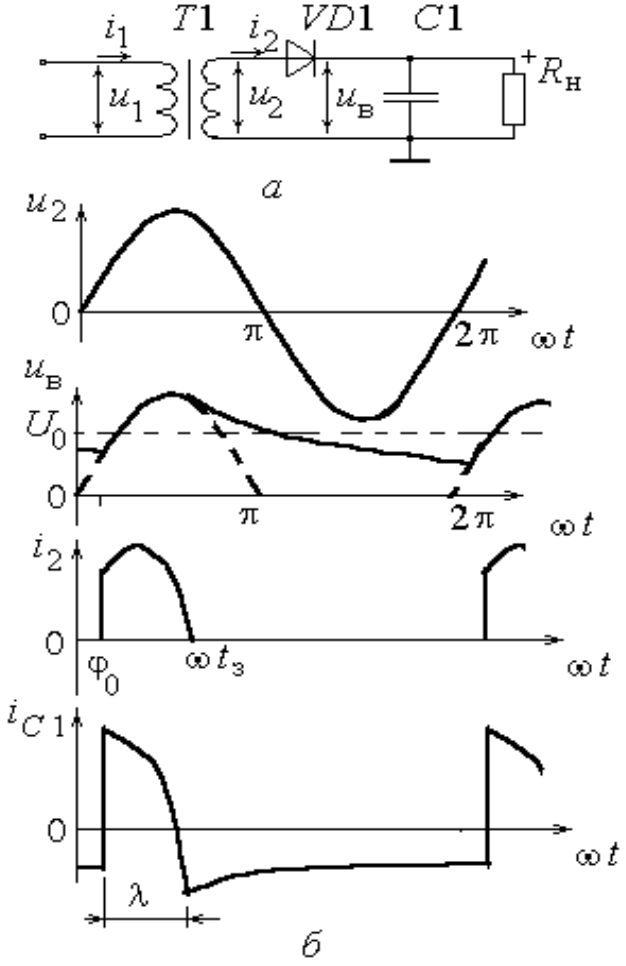


Рис 8. Диаграммы токов и напряжений

Рассмотрим более подробно режим работы выпрямителя на резистивно-емкостную нагрузку. Этот режим работы является наиболее распространенным в маломощных выпрямителях. В этом режиме, как было сказано ранее, параллельно сопротивлению нагрузки подключается конденсатор (рис. 8, *а*), что приводит к существенным изменениям форм тока диода и выпрямленного напряжения, а также энергетических соотношений.

Временные диаграммы токов и напряжений в однофазной однотактной схеме выпрямления с резистивно-емкостной нагрузкой в установившемся режиме приведены на рис. 8, *б*.

Если в первом приближении пренебречь падением напряжения на диоде, то можно принять, что к моменту перехода u_2 через максимум конденсатор C_1 оказывается заряженным до амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке, т. е. U_{2m}. Начиная с этого момента конденсатор C_1 будет разряжаться на сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}}$, а ток $i_{\text{С}}$ изменит направление на обратное. В некоторый момент времени, определяемый углом закрывания $\omega t_3 = \varphi_0 + \lambda$, ток через диод прекратится, а напряжение на нагрузке будет поддерживаться лишь разрядным током конденсатора:
$u_{\text{Н}}(t) = u_{\text{С}}(t) = U_{2m} \sin(\omega t_3) \exp[-(t - t_3)/\tau_{\text{Н}}]$.

Увеличение емкости фильтра $C1$ (или постоянной $\tau_{\text{Н}} = R_{\text{Н}} C_1$) приводит не только к уменьшению коэффициента пульсаций, но и к увеличению постоянной составляющей выпрямленного напряжения. Уменьшение сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$ приводит к уменьшению постоянной времени цепи разряда $\tau_{\text{Н}}$, поэтому внешняя характеристика выпрямителя с емкостной нагрузкой крутопадающая, что определяет высокое выходное сопротивление и ограничения при использовании переменной нагрузки.

Выполнение работы

Приборы и оборудование.

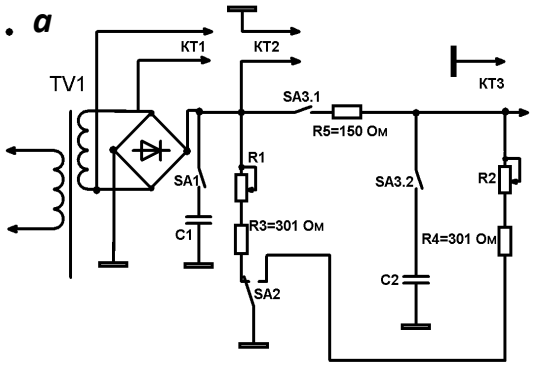


Рис. 9. Однополупериодный выпрямитель

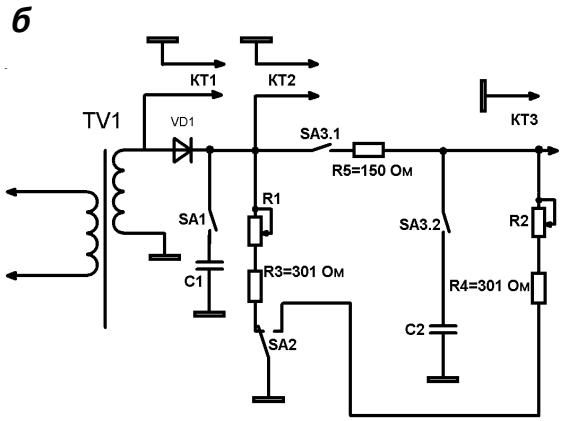


Рис. 10. Мостовой выпрямитель

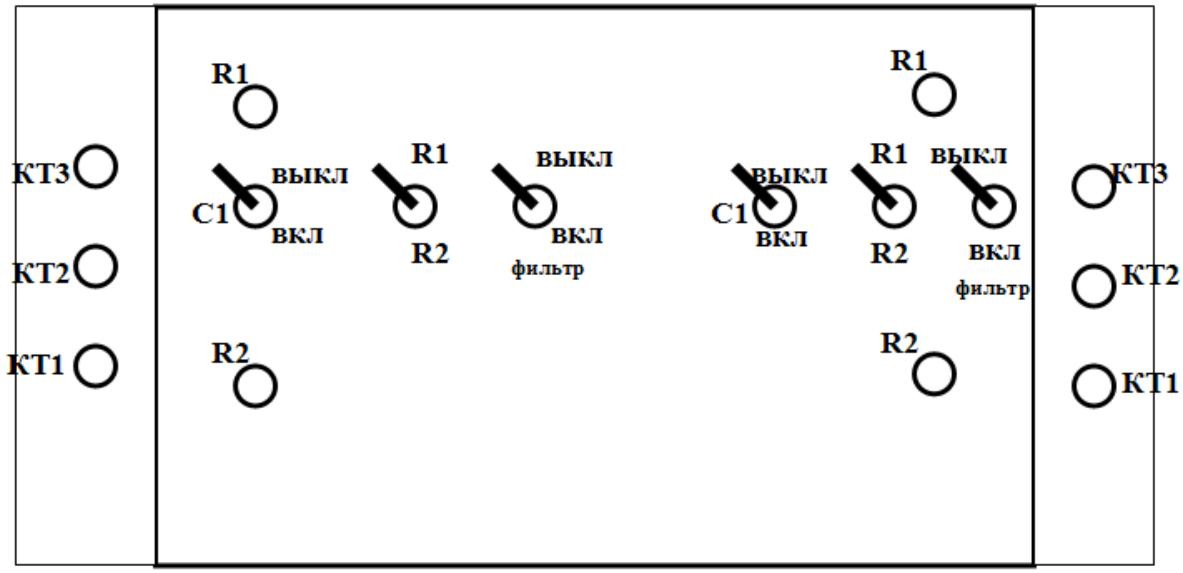


Рис. 11. Лицевая панель измерительного стенда

Изучение основных типов полупроводниковых выпрямителей производится на учебной установке ФЭЛ-7, принципиальная схема которой приведена на рис. 9 и 10. Сетевое напряжение подается через понижающий трансформатор на изучаемую схему однополупериодного выпрямителя в случае 9 и двухполупериодного мостового выпрямителя 10. Две схемы являются эквивалентными и включены и работают совместно. На боковых панелях установки выведены контрольные точки КТ1-КТ-3. Сигнал с вторичной обмотки трансформатора подается на контрольную точку КТ-1. Контрольная точка КТ-2 служит для наблюдения сигнала на нагрузке после диода (схема рис. 9 либо диодного моста (схема рис. 10). Точка КТ-3 служит для наблюдения сигнала с выхода сглаживающего фильтра. Переключатель S1 служит для коммутации сглаживающего конденсатора С1; переключатель S2 коммутирует в схему переменную нагрузку R1 (для исследования сигнала до фильтра) либо R2 (для наблюдения сигнала после сглаживающего фильтра). Сдвоенный переключатель S3 включает и отключает сглаживающий фильтр.

Порядок выполнения

1. Ознакомится с принципиальными схемами для изучения работы полупроводниковых выпрямителей на рис. 9, 10. Разобраться с расположением и назначением ручек на панели учебного модуля.

2. Перед включением установки в сеть проверить целостность сетевых проводов и соединительного провода.

3. Включить установку и осциллограф в сеть ~220 В, нажать кнопку «СЕТЬ» на панелях учебного модуля и осциллографа, при этом должен загореться сигнальный светодиод «СЕТЬ». Дать прогреться в течение 2–3 минут.

4. Приступить к изучению однополупериодного выпрямителя (лицевая левая часть учебной установки). Поставить ручки в исходное положе-

ние: конденсатор С1 (переключатель SA1) – выкл.; резистор R1-R2 (переключатель SA2) – в положение R1; сглаживающий фильтр (переключатель SA3) – выкл.

5. Подготовить осциллограф к наблюдению сигналов. Для этого перевести осциллограф в режим синхронизации от сети – переключатель «INT. LINE EXT» слева от входа X осциллографа в положение «LINE». Ручки плавной регулировки «VOLT VAR» и «TIME VAR» повернуть до упора по часовой стрелке – только в таком положении показания ручек «VOLTS/DIV» и «TIME/DIV» соответствуют надписям у этих ручек (положение данных переключателей 5 V и 5 mS соответственно). Ручку «AUTO NORM TV» (режим развертки) поставить в положение «AUTO». Переключатель «+ - x-EXT» в положение «+» или «-». Ручку «DC ⩲ AC» поставить в положение «DC» для измерения сигнала с учетом постоянной составляющий, либо в «AC» для наблюдения только формы переменного сигнала.

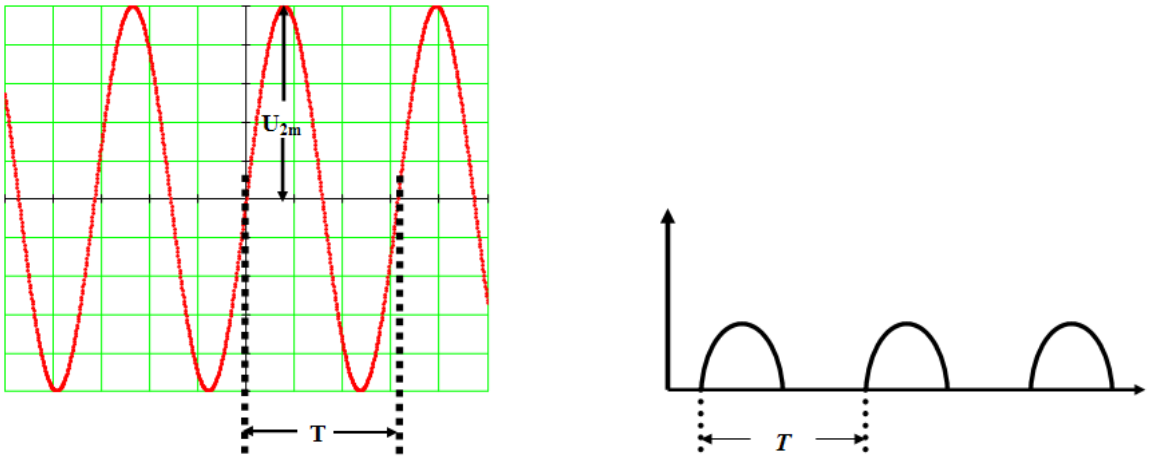


Рис. 12. К определению основных характеристик сигнала

6. Подключить электронный осциллограф соединительным кабелем к контрольной точке КТ-1 и наблюдать вид сигнала сетевого напряжения с выхода вторичной обмотки трансформатора. Вращением ручек «POSITION» оси Y и X установить картинку в центральную часть экрана симметрично относительно центра.

7. Срисовать полученную кривую (форма сигнала от сети практически совпадает с синусоидой) на миллиметровую бумагу по клеткам. Из полученного графика определить период T, частоту ν и круговую частоту $\omega = 2\pi\nu$ сигнала. Измерить по графику амплитуду сигнала U_{2m}.

8. Подключить измерительный провод осциллографа к контрольной точке КТ-2 и, установив резистор R1 в среднее положение, наблюдать форму напряжения на нагрузки с выхода однополупериодного выпрямителя. Срисовать полученный пульсирующий сигнал с экрана осциллографа по клеткам на миллиметровую бумагу, графически определить период сигнала T, частоту ν и круговую частоту $\omega = 2\pi\nu$. Измерить по графику амплитуду сигнала U_{2m}.

9. По формуле (2) определить среднее значение (постоянную составляющую U_0 напряжения на нагрузке, по формуле (7) оценить действующее значение напряжения $U_{действ}$. Рассчитать амплитуду первой гармоники $U_{(1)2m} = \frac{U_{2m}}{2}$ (см. формулы (14), (15)) и коэффициент пульсации $K_п$ по формуле (8).

10. Подключить в схему сглаживающий конденсатор С1. Зарисовать форму напряжения на нагрузке по клеткам на миллиметровую бумагу.

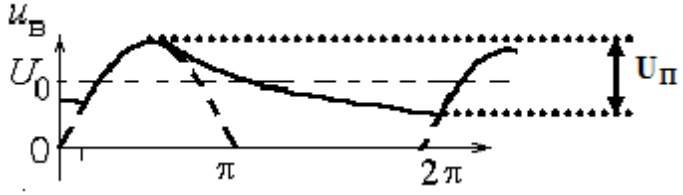


Рис. 13. К определению амплитуды пульсации

11. Вращая переменный резистор R1 по часовой стрелке в сторону увеличения нагрузки (т. е. уменьшения сопротивления) и против часовой стрелке в сторону уменьшения нагрузки (увеличения сопротивления) наблюдать за изменением формы сигнала и пульсациями. Срисовать ВАХ для двух крайних положений резистора R1. Для этих двух крайних положений R1 графически определить амплитуду пульсаций напряжения $\mathbf{U_п}$ на нагрузке как разность между максимальным и минимальным значением напряжения u.

12. Переключить цепь для исследования сглаживающего фильтра, поставив переключатель резистор R1-R2 (переключатель SA2) – в положение R2 (резистор R1 при этом отключается), сглаживающий фильтр (переключатель SA3) – в положение вкл.

13. Повторить действия п. 11 (вращать R2), наблюдая за изменениями формы сигнала при вращении резистора R2.

6. Приступить к исследованию двуполупериодного мостового выпрямителя. Проверить исходное положение переключателей на правой лицевой стороне лабораторного модуля: конденсатор С1 (переключатель SA1) – выкл.; резистор R1-R2 (переключатель SA2) – в положение R1; сглаживающий фильтр (переключатель SA3) – выкл.

14. Подключив измерительный провод осциллографа к точке КТ-1, наблюдать форму сигнала сетевого напряжения, далее установив резистор R2 в среднее положение и подключив измерительный щуп к контрольной точке КТ-2, наблюдать сигнал на нагрузке с выхода мостового выпрямителя и повторить расчеты пп 7-8. По формулам (16-1) рассчитать постоянную составляющую $U_{ср}$ и действующее значение напряжения на нагрузке.

15. Рассчитать амплитуду первой гармоники $U_{(1)2m} = \frac{4U_{2m}}{3\pi}$ (см. формулы 17, 18) и коэффициент пульсации $K_п$ по формуле (8).

16. Проделать действия, полностью аналогичные действиям пп. 10, 11, 12, 13 – подключить сглаживающий конденсатор С1, изменять нагрузку R1 для изучения влияния сглаживающего конденсатора, переключиться на режим исследования фильтра и включить R2, для изучения влияния нагрузки на работу фильтра изменять нагрузку R2.

17. По окончании работы выключить осциллограф и учебную установку от сети, вынув сетевые вилки из розетки и поставив переключатель «СЕТЬ» в положение «выкл».

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действие выпрямителей.
2. Какие существуют схемы выпрямителей?
3. Пояснить работу сглаживающего фильтра в вентиле.
4. Почему уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения при включении емкостного или индуктивного фильтра?
5. Достоинства и недостатки разных типов фильтров.
6. Что такое коэффициент пульсаций и коэффициент сглаживания?
7. По каким критериям осуществляется выбор вентилей?
8. Как изменится форма напряжения на нагрузке при пробое одного вентиля в исследуемых выпрямителях?
9. Поясните работу схемы рис. 9 для изучения полупроводниковых выпрямителей.

Литература

1. Галкин В.И. Промышленная электроника и микроэлектроника / В.И. Галкин, Е.В. Пелевин. – Минск, Высшая школа, 2000.

2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М.: Высшая школа, 1990.

3. Гелин Ф.Д. Материаловедение / Э.И. Крупицкий, И.П. Позняк. – Минск, Высшая школа, 1997.

4. Никулин Н.В. Электроматериаловедение / Н.В. Никулин. – М.: Высшая школа, 1994.

5. Пасынков В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков., В.С. Сорокин. – М.: Высшая школа, 1986.

6. Савельев И.В. Курс общей физики : в 3 т. / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1979. – Т. 3. 221 – 226 с.

7. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1997. – 442 с.

8. Детлаф А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, В.М. Яворский. – М. : Высшая школа, 2003. – 530 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7.
ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА И ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА

Цель работы: изучение принципа работы преобразователей Холла и измерение индукции магнитного поля постоянных магнитов.

В работе используются: магнитометр на основе интегральной микросхемы AD22151 (датчика Холла), постоянные магниты, линейка.

Теоретическая часть

Эффект Холла

Пусть по однородной металлической пластинки или ленте шириной a протекает электрический ток плотности $\vec{j}$ в направлении оси Y (рис. 1).

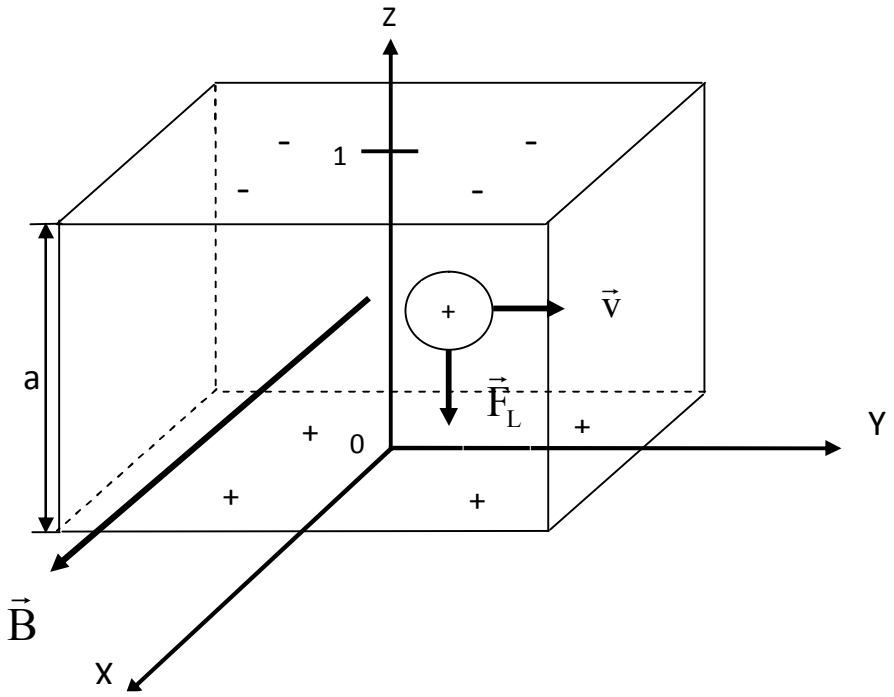


Рис. 1

Пусть перпендикулярно к пластине приложено постоянное однородное магнитное поле $\vec{B}$, направленное вдоль оси X. Если носителями тока являются положительные частицы, то они двигаются вправо и испытывают действие силы Лоренца

$$\vec{F}_L = e\left[\vec{v}\vec{B}\right] \qquad (1)$$

($\vec{v}$ средняя скорость носителей тока), которая отклоняет их вниз. Нижний край пластины при этом заряжается положительно, а верхний – отрицательно. Возникшее электрическое поле $\vec{E}_Z$ препятствует отклонению, вы-

званному магнитным полем. В результате индуцированное электрическое поле $\vec{E}_Z$ уравновешивает силу $\vec{F}_L$:

$$e\vec{E}_Z=-\vec{F}_L=-e\left[\vec{v}\vec{B}\right]. \qquad (2)$$

Из рис. 1 видно, что поле $\vec{E}_Z$ направлено вверх вдоль оси Z, и, следовательно, разность потенциалов между точками 0 и 1, лежащими на нижнем и верхнем краях пластины соответственно, будет равна:

$$U_X=\varphi_0-\varphi_1=E_Z a=vaB. \qquad (3)$$

Выражая среднюю скорость электронов v через плотность тока j с помощью уравнения $j=nev$, получаем формулу

$$U_X=\varphi_0-\varphi_1=\frac{jaB}{en}=RjaB, \qquad (4)$$

где коэффициент $R=\frac{1}{en}$ носит название коэффициента Холла. Возникновение поперечной разности потенциалов в несущем ток проводнике при включении магнитного поля было экспериментально обнаружено Холлом в 1879 г., а само явление получило название эффекта Холла.

Преобразователи Холла

Принцип действия преобразователей Холла основан на эффекте Холла. Выходная величина преобразователя Холла пропорциональна произведению двух входных величин – плотности тока и магнитной индукции (это вытекает из формулы (4)). При постоянных во времени j и B ЭДС Холла является постоянной величиной. Если одна из входных величин (B или j) постоянная, а другая – переменная, то ЭДС Холла будет переменной величиной той же частоты, что и частота входной величины. В случае если обе входные величины имеют одну и ту же частоту и сдвинуты по фазе на угол φ, ЭДС Холла будет состоять из постоянной составляющей и переменной составляющей частоты: $\varphi_0-\varphi_1=\frac{R}{a}BI\cos\varphi+\frac{R}{a}BI\cos(2\omega t+\varphi)$. Если ток изменяется с частотой ω_1, а магнитная индукция – с частотой ω_2, то ЭДС Холла содержит две составляющие, одна из которых имеет частоту $(\omega_1-\omega_2)$, а другая $(\omega_1+\omega_2)$.

Гальваномагнитная чувствительность преобразователя Холла определяется при номинальном значении входного тока $I_{ном}=\text{const}$ выражением:

$$S_{BI}=\frac{\varphi_0-\varphi_1}{BI}=\frac{U_X}{BI}. \qquad (5)$$

Значение тока $I_{ном}$ ограничено допустимой температурой перегрева преобразователя. Для высокоомных преобразователей допустимые значения токов составляют 5 – 50 мА, для низкоомных 100 – 200 мА.

Остаточным напряжением преобразователя Холла называется напряжение, которое возникает между Холловыми электродами при прохожде-

нии через преобразователь тока в отсутствии магнитного поля. Причиной остаточного напряжения в первую очередь является расположение Холловых электродов в неэквипотенциальных точках пластины. Остаточное напряжение может составлять от единиц микровольт до десятков вольт.

При наличии температурного градиента между Холловыми контактами возникает термо-ЭДС. При разности температур между контактами 0,1°С возникает термо-ЭДС ε=10 – 100 мкВ. Для уменьшения градиента температур преобразователь следует укреплять на подложке из материала с хорошей теплопроводностью.

Погрешность нуля, обусловленная дрейфом остаточного напряжения, является одной из наиболее трудноустраняемых составляющих погрешности преобразователей Холла. Дрейф главным образом связан с колебаниями температуры преобразователя и наличием градиента температур между его электродами. Погрешность нуля является основной характеристикой, определяющей применимость преобразователей Холла для измерения слабых магнитных полей.

Температурная погрешность преобразователей Холла обусловлена зависимостью от температуры постоянной Холла, сопротивления преобразователя и остаточного напряжения. Если температурные коэффициенты постоянной Холла и сопротивления имеют одинаковые знаки и близки по значению, коррекцию температурной погрешности можно осуществить при питании преобразователя от источника стабильного напряжения. Такой режим питания целесообразно применять для преобразователей Холла из антимонида индия. Уменьшение температурной погрешности достигается также при применении схем коррекции с использованием терморезисторов. Однако, поскольку напряжение Холла сложным образом зависит от ряда температурно-зависимых параметров, осуществить точную коррекцию температурной погрешности практически невозможно, особенно для широкого диапазона рабочих температур.

Анализ основных метрологических характеристик преобразователей Холла показывает, что основная погрешность большинства приборов, в которых используются преобразователи Холла, составляет 0,5 – 3,0% и более. Только при применении сложных методов коррекции можно снизить погрешность измерения до 0,1 – 0,2% при работе в узком диапазоне температур.

Для обозначения совокупности измерительных преобразователей, объединенных в один конструктивный узел, выносимый на объект измерения, сохранен укоренившийся в практике термин «датчик». К примеру - используемый в данной работе датчик Холла (рис. 2).

Рис. 2. Датчик Холла

Наиболее широко датчики Холла применяются в магнитометрах. Магнитометр (от греч. magnetis – магнит и… метр), прибор для измерения характеристик постоянных, переменных и импульсных магнитных полей и определения характеристик ферромагнитных материалов. В зависимости от определяемой величины различают приборы для измерения напряжённости поля (эрстедметры), направления поля (инклинаторы и деклинаторы), градиента поля (градиентометры), магнитной индукции (тесламетры или гауссметры), магнитного потока (веберметры, или флюксметры), коэрцитивной силы (коэрцитиметры), магнитной проницаемости (мюметры), магнитной восприимчивости (каппа-метры), магнитного момента.

Выполнение работы

Помещая щуп с интегральным датчиком AD22151 в магнитное поле, созданное постоянным магнитом (рис. 3) так, чтобы оно было приложено перпендикулярно верхней части корпуса датчика и затем измерив напряжение на выходе измерительного блока магнитометра с помощью мультиметра, можно количественно определить модуль вектора магнитной индукции в данной точке поля. Под этим следует понимать измерение магнитной индукции в объёме пространства пренебрежимо малом по сравнению с объемом исследуемого поля. Результат измерения зависит от расстояния до поверхности магнита и формы магнита.

Получив значение Холловского напряжения с помощью мультиметра, величина магнитной индукции рассчитывается при помощи функции преобразования:

$$y=\frac{x-2.34}{4}=\frac{x}{4}-0.585, \qquad (6)$$

где x – значение напряжения (в Вольтах) на выходе измерителя индукции магнитного поля, y – соответствующее значение магнитной индукции (в Теслах). Данная функция предлагается разработчиками микросхемы AD22151. В ней учитывается то, что данный датчик Холла является линейным измерительным преобразователем (4 мВ на 0.1 мТл), что значительно упрощает работу с ним. Остаточное напряжение датчика AD22151 составляет 2.34 В. Численное значение магнитной индукции определяется с погрешностью ±0.6 мТл.

I**. Измерение магнитной индукции постоянных магнитов.** Подключить магнитометр к сети переменного тока (220 В). Включить прибор тумблером, расположенным на его корпусе (при этом загорится световой индикатор). Включить мультиметр и установить его на режим измерения постоянного напряжения. Затем к выводам измерительного блока магнитометра подсоединить измерительные щупы мультиметра.

1. Для определения значения магнитной индукции щуп с датчиком AD22151 поднести к постоянному магниту так, чтобы магнитное поле бы-

ло приложено перпендикулярно верхней части корпуса датчика, и снять показания мультиметра (вольтметра). Рассчитать значение магнитной индукции по формуле (6).

2. Проделать данную процедуру на расстояниях 1, 5, 10 и 15 мм от поверхности магнита, используя при этом линейку для установления нужного расстояния.

3. Проделать измерительную операцию для разных постоянных магнитов.

4. Занести результаты в табл. 1.

Рис. 3. Схема установки.
1 – щуп с датчиком AD22151, 2 – магнитометр с выводами для измерения напряжения с выхода датчика, 3 – мультиметр

Таблица 1.

		Значение магнитной индукции, Тл			
Расстояние от магнита, мм		1	5	10	15
Номер магнита, №	1				
	2				
	3				

II. Расчет гальваномагнитной чувствительности преобразователя Холла.

Зная, что номинальное значение входного тока $I_{ном}$ = 10 мА, рассчитать значение гальваномагнитной чувствительности для данного преобразователя Холла по формуле (5), пользуясь данными из табл. 1.

Контрольные вопросы

1. Магнитное поле. Магнитная индукция. Напряженность магнитного поля.
2. Силы, действующие в магнитном поле на движущиеся заряды и токи.
3. Эффект Холла.
4. Преобразователи Холла.
5. Остаточное напряжение преобразователей Холла.
6. Погрешности преобразователей Холла.
7. Применение датчиков Холла.

Список литературы

1. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.; Наука, 1966.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том III. Электричество. – М.; Наука, 1977.
3. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс). Под ред. Е.Г. Шрамкова. – М.; Высшая школа, 1972.
4. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. – Ленинград; Энергоатомиздат, 1983.
5. Ранне Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений. – М.; Академия, 2004.
6. Описание интегрального преобразователя Холла AD22151, http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD22151.pdf

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА ПРИ ПОМОЩИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕНАСЫЩЕННОГО ВАКУУМНОГО ДИОДА

Цель работы: изучить явление термоэлектронной эмиссии, экспериментально оценить на основании этого явления физические постоянные, ознакомится с одним из методов определения удельного заряда электрона.

Теоретическая часть

Термоэлектронная эмиссия

Явление термоэлектронной эмиссии заключается в испускании электронов с поверхности нагретого твердого тела. Это явление в простейшем случае проявляется в том, что в электрической цепи с двумя телами (электродами), разделёнными вакуумным зазором, обнаруживается электрический ток.

Современные представления о природе термоэлектронной эмиссии в металлах основываются на следующих предположениях. Распределение электронов по энергетическим уровням в металле подчиняется статистике Ферми-Дирака, согласно которой вероятность квантового состояния с энергией E для электронов определяется функцией Ферми-Дирака:

$$f(E)=\frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)+1}, \qquad (1)$$

где E_F – энергия Ферми, которая выступает в качестве характеристики всей системы электронов; $k=1.38\cdot10^{23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – температура в градусах Кельвина.

Графики функции Ферми-Дирака $f(E)$ качественно для нескольких температур представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, при $T=0$ $f(E)$ имеет вид разрывной функции. Для всех энергий $E<E_F$, $f=1$, т.е. все квантовые состояния с такими энергиями заняты электронами. При $T\neq0$ функция $f(E)$ становится непрерывной и тем более размытой, чем выше температура.

Для металлов E_F порядка нескольких электрон-вольт (эВ). В связи с этим, для комнатных температур и даже более высоких (вплоть до температуры плавления) распределение электронов существенно не отличается от распределения для $T\neq0$. В то же время, если обозначить через E_0 – минимальное значение энергии электрона, способного покинуть объём металла, то в состояниях с энергией $E>E_F$ при $T\neq0$ будет находиться некоторая часть электронов, концентрация которых увеличивается с ростом температуры (заштрихованная часть на рис. 1).

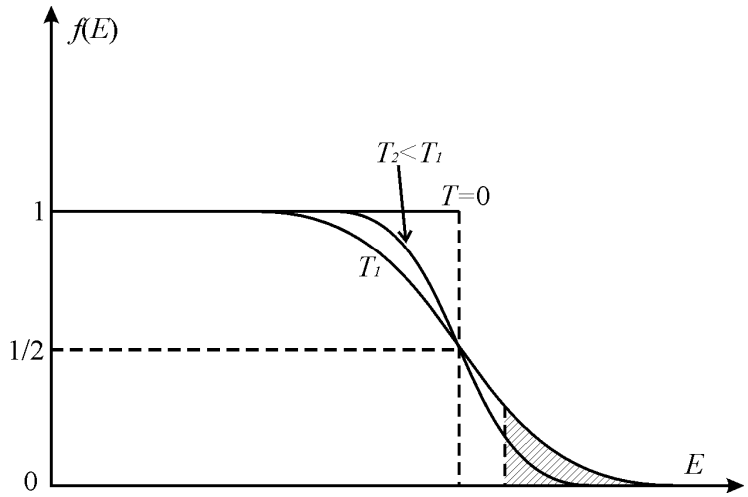


Рис. 1. Функция Ферми-Дирака для металлов

Минимальная работа, которую должен совершить электрон переходя из объёма металла в вакуум равна $\Phi = E_0 - E_F$. Эту величину называют работой выхода электрона из металла в вакуум.

Термоэлектронную эмиссию удобно изучать и наблюдать с помощью вакуумного диода, который имеет два электрода (накаленный катод, служащий для эмиссии электронов, и анод, принимающий эти электроны), расположенные в стеклянном, металлическом или керамическом баллоне.

Рассмотрим физические процессы, протекающие в диоде с катодом косвенного накала и плоскими электродами, включенного по схеме (рис. 2). Напряжение (плюс на аноде) создает между анодом и катодом электрическое поле, которое при напряжении накала $U_{нак} = 0$ будет однородным. Когда $U_{нак} \neq 0$, катод испускает термоэлектроны, которые в пространстве между анодом и катодом создают отрицательный объёмный заряд, препятствующий движению электронов к аноду и имеющий наибольшую плотность вблизи катода. Распределение электрического поля становится неоднородным.

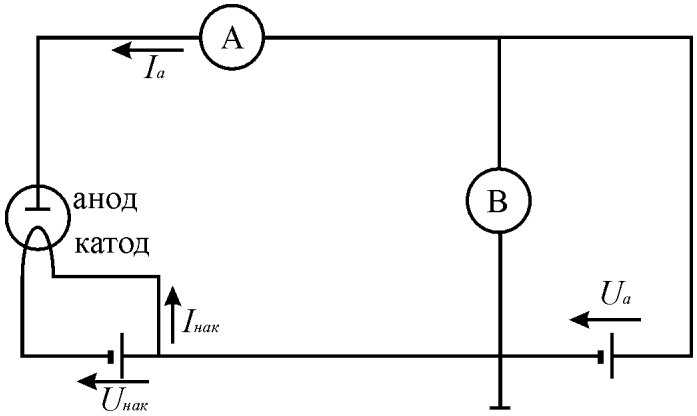


Рис. 2. Схема для изучения явления термоэлектронной эмиссии

Выделяют два режима работы диода:

1. Режим насыщения ($U_a \geq U_{a_нас}$). Все электроны, вылетевшие из катода, под действием ускоряющего поля между анодом и катодом долетают

до анода. Тогда эмиссионный ток I_e равен анодному току I_a и будет максимальным для данной температуры катода (Этот ток называется током насыщения).

$$I_a = I_e. \tag{2}$$

2. Режим объёмного заряда ($U_a < U_{a_нас}$). Вблизи катода имеется объёмный заряд, образующий тормозящее для термоэлектрона поле. Электроны с малой энергией не преодолевают этого поля и возвращаются на катод. И только электроны с большой энергией долетают до анода. И поэтому в этом режиме:

$$I_a < I_e. \tag{3}$$

Вольтамперная характеристика вакуумного диода при низких анодных напряжениях. Формула Богуславского – Ленгмюра.

Опыт показывает, что сила анодного тока зависит от температуры катода и от разности потенциалов между катодом и анодом лампы. При постоянной температуре величина анодного тока возрастает с увеличением разности потенциалов $U_a = \varphi_1 - \varphi_2$. Однако, эта зависимость не является линейной, как это следовало бы из закона Ома, а носит более сложный характер и подчиняется закону Богуславского – Ленгмюра, который называется ещё законом «трех вторых»:

$$I = B \cdot U^{3/2} \tag{4}$$

где В – коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, заряда и массы электрона.

Рассмотрим отдельные участки вольтамперной характеристики вакуумного диода на рис. 3. При напряжении на диоде $U = 0$ в цепи существует небольшой электрический ток $I \neq 0$(этот ток составляет порядка долей микроампер и при выполнении данной работы не измеряется и не учитывается). Термоэлектроны катода вследствие их теплового движения могут достигать анода и без внешнего (тянущего) электрического поля и тем самым создавать электрический ток в цепи. Для того чтобы электрический ток стал равным нулю надо создать тормозящее электрическое поле (участок *1-2*), т.е. потенциал катода должен быть выше потенциала анода. Участок *2-3* представляет наибольший интерес, т.к. эта область характеристики диода часто используется на

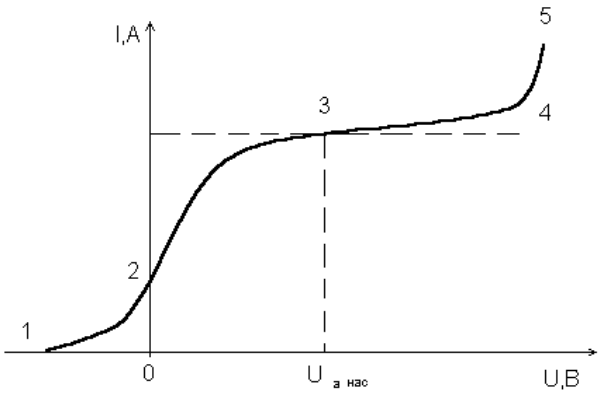


Рис. 3. Вольт амперная характеристика диода

практике и изучается в данной работе. Как показывают измерения, зависимость тока от напряжения в этом случае достаточно хорошо представляется выражением (4). В этом случае ток связан с перемещением термоэлектронов под действием "тянущего" электрического поля между катодом и анодом на участке *3-4* наблюдается некоторое увеличение тока через диод, которые связывают с уменьшением работы выхода электронов из твердого тела под действием электрического поля (эффект Шотки). Он существенен для достаточно больших электрических полей у поверхности катода $E > 10 \div 100$ кВ. В сильных электрических полях ($E > 10^5$ В/см) к термоэлектронной эмиссии добавляется автоэлектронная эмиссия, соответствующая участку *4-5* вольтамперной характеристики. Такую дополнительную эмиссию связывают с просачиванием электронов через потенциальный барьер, образующийся на границе тела.

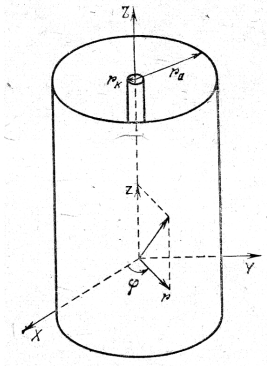


Рис. 4. Схема расположения электродов в диоде

Покажем, что закон «трех вторых» действительно имеет место для вольтамперной характеристики двухэлектродной вакуумной лампы. При расчетах необходимо учитывать, что распределение потенциала и тока I между анодом и катодом двухэлектродной вакуумной лампы зависит от формы электродов и их взаимного расположения.

Остановимся на изучаемом нами участке 2-3 характеристики вакуумного диода. Зададимся следующей упрощенной моделью:

1. Начальные скорости электронов, эмитируемых катодом равны нулю;

2. Анодный ток далек от насыщения;

3. Пространственный заряд создает такое распределение потенциала между катодом и анодом, что непосредственно у поверхности катода напряженность поля равна нулю, т.е. отсутствует градиент потенциала $\frac{d\varphi}{dx} = 0$.

Будем считать, что катод лампы имеет форму нити с радиусом $r_к$, а анод форму цилиндра с радиусом r_a. Между катодом и анодом приложена разность потенциалов U_a.

Движение электронов в лампе происходит под действием электрического поля, распределение которого само зависит от плотности электронного облака. Нас будет интересовать задача о стационарном (не меняющемся во времени) распределении потенциала и заряда. Будем считать, что

вследствии симметрии задачи потенциал электрического поля не зависит ни от координаты z, ни от угла φ и является функцией только радиуса r.

Известно, что связь между потенциалом и объемной плотностью зарядов определяется уравнением Пуассона:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial\ y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial\ z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{5}$$

где $\rho(r)$ – плотность электрического заряда.

Так как катод и анод имеют цилиндрическую форму, задачу удобнее решать в цилиндрических координатах, в которых уравнение (5) запишется в виде:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\vartheta^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} \tag{6}$$

Так как в рассматриваемом случае потенциал является функцией только расстояния r от поверхности катода, то выражение (6) упростится, и уравнение Пуассона будет иметь вид:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{d\varphi}{dr}\right) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{7}$$

Раскроем скобки по правилу дифференцирования произведения двух функций. Получим:

$$\Delta\varphi = \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\varphi}{dr} = -\frac{\rho(r)}{\varepsilon_0} \tag{8}$$

Двумя сечениями, перпендикулярными Z, вырежем в диоде слой толщиной l (можно считать, что l в данном случае – длина электродов). Плотность заряда $\rho(r)$ связана с током I, протекающим через этот слой очевидной формулой:

$$I = -2\pi r\rho(r)v(r)l \tag{9}$$

где $v(r)$ скорость электронов на радиусе r, знак минус учитывает, что объёмная плотность $\rho = \frac{dq}{dV} = n\cdot e < 0$ (n – концентрация электронов, e – заряд электрона с учетом знака), поэтому ток в итоге получается со знаком плюс. В стационарном случае I не зависит от r, т. е. $I = const$.

Скорость электронов определяется разностью потенциалов, которую они прошли, и скоростью их вылета из катода. Этой последней скоростью мы будем пренебрегать. Тогда:

$$\frac{mv^2(r)}{2} = e\varphi(r) \tag{10}$$

где m-масса электрона, e-модуль электрического заряда. Откуда найдем скорость электронов:

$$v(r)=\sqrt{\frac{2e}{m}\varphi} \tag{11}$$

Подставим (11) в (9) и выразив $\rho(r)$ перепишем уравнение (8) в виде:

$$r\frac{d^2\varphi}{dr^2}+\frac{d\varphi}{dr}=\frac{I}{2\pi\varepsilon_0 l}\sqrt{\frac{m}{2e\varphi}} \tag{12}$$

Таким образом, мы пришли к дифференциальному уравнению второго порядка, из которого следует определить $\varphi(r)$. Это уравнение может быть решено, если заданы граничные условия, т. е. значения потенциала на аноде и на катоде. Дополнительная трудность состоит в том, что неизвестен ток I, зависящий от φ и входящий в правую часть уравнения (12), и, таким образом, не полностью определено само уравнение.

Однако, одно из условий нашей упрощенной модели состоит в предположении, что непосредственно у поверхности катода напряженность поля равна нулю. Таким образом, фактически мы наложили на потенциал ещё одно граничное условие: $\left.\frac{d\varphi}{dr}\right|_{r=r_к}=0$. Наше предположение означает, что вблизи катода пространственный заряд электронов полностью компенсирует электрическое поле, создаваемое анодной разностью потенциалов. В электронных лампах при нормальных режимах работы электрическое поле обращается в нуль не на самом катоде. А на расстоянии 0,01÷0,1 мм от него. В случае нашего опыта этим расстоянием можно пренебречь.

Уравнение (12) является нелинейным дифференциальным уравнением. Его решение не может быть найдено простыми методами. Предположим, однако, что мы нашли решение этого уравнения при некотором $\varphi_а=\varphi_{а0}$ и пусть при этом ток оказался равным $I=I_0$. Покажем, что в этом случае можно найти решение (12) и при любом другом значении потенциала $\varphi_а$ и что, если I_0 и $\varphi_{a0}(r)$ являются решением задачи при напряжении $\varphi_{а0}$, то выражения:

$$I=I_0\left(\frac{\varphi_a}{\varphi_{a0}}\right)^{3/2},\ \varphi(r)=\varphi_{a0}(r)\frac{\varphi_a}{\varphi_{a0}} \tag{13}$$

являются искомыми решениями уравнения (12) при потенциале $\varphi_а$.

Подставляя (13) в (12) найдем:

$$r\frac{\varphi_a}{\varphi_{a0}}\frac{d^2\varphi_{a0}(r)}{dr^2}+\frac{\varphi_a}{\varphi_{a0}}\frac{d\varphi_{a0}(r)}{dr}=\frac{I_0}{2\pi\varepsilon_0 l}\left(\frac{\varphi_a}{\varphi_{a0}}\right)^{3/2}\sqrt{\frac{m}{2e\varphi_{a0}(r)\varphi_a/\varphi_{a0}}} \tag{14}$$

Сокращая это уравнение на φ_a/φ_{a0}, придём к уравнению:

$$r\frac{d^2\varphi_{a0}(r)}{dr^2}+\frac{d\varphi_{a0}(r)}{dr}=\frac{I_0}{2\pi\varepsilon_0 l}\sqrt{\frac{m}{2e\varphi_{a0}(r)}} \qquad (15)$$

которое выполняется согласно предположению о том, что I_0 и $\varphi_{à0}$ являются решением (12).

Формула (13) представляет собой содержание закона «трех вторых», утверждающего, что ток в вакуумном диоде пропорционален напряжению на нём в степени $3/2$. Этот закон справедлив при любой, а не только при цилиндрической геометрии электродов, если ток не сильно велик. В общем случае можно записать:

1) Для лампы коаксиальной геометрии с цилиндрическими электродами решение уравнения (12), удовлетворяющее условию $\left.\frac{d\varphi}{dr}\right|_{r=r_{\grave{e}}}=0$ не выражается через элементарные функции и обычно записывается в виде:

$$I_a=\frac{8\sqrt{2}\pi\varepsilon_0 l}{9}\sqrt{\frac{e}{m}}\frac{1}{r_a\beta^2}U^{3/2}=B_{\ddot{o}}U^{3/2}, \qquad (16)$$

$B_{\ddot{o}}$ – геометрический параметр диода, U – напряжение между электродами (напряжение анода) β^2 – функция от r_a/r_k, которая может быть задана бесконечным рядом или графиком. Численный коэффициент при $U^{3/2}$ выбран так, чтобы при $r_a/r_k\to\infty$ $\beta^2\to 1$. Зависимость β^2 от r_a/r_k показана на рис. 5.

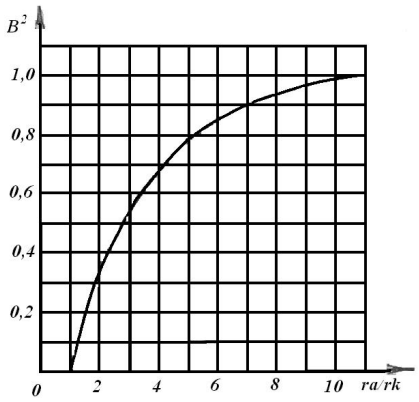


Рис. 5. График функции β^2

2) Для лампы с плоскими электродами

$$I_a=B_{пл}U^{3/2},\ \mathrm{B_{пл}}=\frac{9}{4}\varepsilon_0\left(\frac{2|\mathrm{e}|}{\mathrm{m}}\right)^{1/2}\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{d}^2} \qquad (17)$$

$B_{пл}$-геометрический параметр диода, S площадь катода, U – напряжение анода, d – расстояние между электродами.

Экспериментальная часть

Приборы и оборудование

Объектом исследования в данной лабораторной установке является вакуумный диод с цилиндрическими электродами типа 2Ц2С с катодом косвенного накала. Радиус катода r_k=0,9 мм, радиус анода r_a=9,5 мм, коэффициент $\beta^2 = 0{,}98$. Эмиссия электронов происходит с центральной части катода, покрытой оксидным слоем. Высота этого слоя $l = 9$ мм. Рабочая часть катода достаточно удалена от его концов, поэтому поле в этой части с хорошей точностью можно считать радиальным. Установка специально сконструирована и настроена для наиболее точного изучения характеристики вакуумного диода **в ненасыщенном режиме**, т. е. в области малых анодных напряжений и небольших токов накала. Для наблюдения конструкции объекта исследования предусмотрено смотровое окошко.

Принципиальная схема учебной установки для определения удельного заряда электрона с помощью вольтамперной характеристики вакуумного диода приведена на рис. 6. Стабилизированное напряжение (+30 В max) от регулируемого встроенного источника питания подается на анод исследуемого вакуумного диода. Цепь накала диода подключается к отдельному гальванически независимому выходу источника питания. Кнопка «УСТАНОВКА $I_н$» (на схеме рис. 6 обозначена как переменный резистор «регулировка Iнакала») позволяет установить ступенчато одно из трех рекомендованных для данного опыта токов накала (1,5 А; 1,6 А; 1,7 А). Для надежного срабатывания кнопки рекомендуется удерживать её в течение одной – двух секунд.

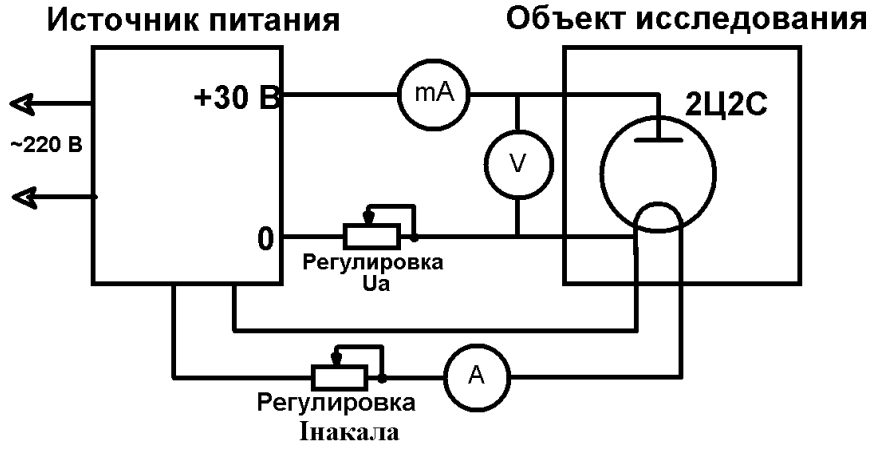


Рис. 6. Принципиальная электрическая блок-схема учебной установки для определения удельного заряда электрона

Напряжение, подаваемое на анод лампы, регулируется с помощью кнопок «УСТАНОВКА U_a» (на схеме рис.6 обозначены как переменный резистор «регулировка Ua»). Удержание кнопки приводит к плавному изменению напряжения Ua.

Измерения тока накала, тока и напряжения анода производится с помощью встроенного цифрового комбинированного прибора «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР» (на упрощенной схеме рис. 6 изображены отдельные элементы измерительного прибора как включаемые в соответствующие цепи mA, V, A). Комбинированный «измерительный прибор» обеспечивает измерение тока анода с точностью ±0,01 мА. Допускается нестабильность показаний измерительного прибора в пределах указанной погрешности. Все измеренные значения выводятся на ЖКД LCD дисплей.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой для исследования вольтамперной характеристики диода рис. 6., разобраться в назначении кнопок регулировки.

2. Проверить перед включением целостность сетевого шнура.

3. Включить установку в сеть ~220 В. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный светодиод.

4. Дать установки прогреться в течении 3-х минут после чего кнопкой «УСТАНОВКА $I_н$» установить одно из рекомендуемых значений тока накала диода.

5. Изменяя кнопками «УСТАНОВКА U_a» напряжение, подаваемое на анод лампы, и, контролируя его значение и значение тока анода, измеряемые цифровым индикатором**,** снять вольтамперную характеристику объекта исследования. Шаг изменения напряжения по возможности делать как можно меньше (рекомендуется шаг 2-3 В).

6. Установить кнопкой «УСТАНОВКА $I_н$» другое значение тока накала.

7. Проделать измерения п.5. Изменять напряжение U_a можно также и в сторону уменьшения.

8. Установить третье рекомендованное значение тока накала и повторить действия п.5.

9. По окончании измерений поставить переключатель «СЕТЬ» в положение «выкл», при этом должен погаснуть сигнальный индикатор и вынуть сетевую вилку из розетки.

10. Все измеренные значения для каждого тока накала занести в табл. 1

Таблица 1

Ток накала, А	Напряжение анода, U_a, В	…	…	…	…	…
…	$U_a^{3/2}$, $В^{3/2}$	…	…	…	…	…
	Ток анода, I_a, А	…	…	…		…

$$e/m = \ldots \left[\hat{E}\ddot{e}/\hat{e}\tilde{a} \right]$$

11. Построить на миллиметровой бумаге вольтамперные характеристики диода при различных токах накала.

12. Для одного из значений тока накала возвести каждое значение напряжения анода U_a (в вольтах) в степень $3/2$, заполнить таблицу 1 и построить график зависимости анодного тока (в амперах) от $U_a^{3/2}$, т. е. $I = I\left(U_a^{3/2}\right)$. Теоретически, согласно (16) в исследуемой области напряжений график должен иметь вид прямой линии.

13. Определить коэффициент $B_{цл}$ в формуле Богуславского-Ленгмюра (16) как тангенс угла наклона этой прямой к оси x. Оценку коэффициента $B_{цл}$ рекомендуется проводить с помощью метода наименьших квадратов (см. приложение) или по формуле $B_{öë} = \frac{\Delta I}{\Delta U^{3/2}}$, в которой для большей точности расчетов следует брать максимально возможные приращения. $\Delta I \sim \Delta U^{3/2}$

14. Определить с помощью закона Богуславского-Ленгмюра удельный заряд электрона e/m. Согласно (16) коэффициент $B_{ö} = \frac{8\sqrt{2}\pi\varepsilon_0 l}{9}\frac{1}{r_a\beta^2}\sqrt{\frac{e}{m}}$. Подставляя в эту формулу известные численные данные для исследуемого вакуумного диода (см. пункт «приборы и оборудование»), запишем:

$$B_{öë} \approx 3{,}45 \cdot 10^{-11} \cdot \sqrt{e/m} \qquad (18)$$

Из (18) легко выразить удельный заряд как:

$$\frac{e}{m} \cong \frac{B_{öë}^{\ 2}}{1{,}19 \cdot 10^{-21}} \qquad (19)$$

где $B_{цл.}$ – экспериментально найденный вами коэффициент согласно п. 13. Сравнить полученный вами результат с теоретическим значением $e/m = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг и оценить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Какую величину называют удельным зарядом электрона? Каково ее табличное значение и размерность?
2. Сформулируйте закон «трех вторых» – закон Богуславского – Ленгмюра.
3. Для какой части вольтамперной характеристики выполняется закон Богуславского – Ленгмюра?
4. При построении вольтамперной характеристики рекомендуется использовать экспериментальные данные, относящиеся к меньшим температурам катода, но в области, где закон «трех вторых» еще выполняется. Объясните, почему?

5. Для какой части вольтамперной характеристики выполняется закон Ома?

6. Какие предположения делаются при выводе закона Богуславского-Ленгмюра?

7. Какую систему координат удобнее использовать для вывода формулы закона «трех вторых»? Объясните вывод формулы (16). Попытайтесь провести аналогичные рассуждения для плоских электродов (формула (17)).

8. Что характеризует коэффициент β, входящий в выражение (16)? Какова его величина в случае плоского электрода?

9. Расскажите о существующих методиках измерения удельного заряда электрона.

10. Погрешностью измерения каких величин определяется точность измерения удельного заряда электрона?

11. Какова, на ваш взгляд, точность измерения удельного заряда электрона данным методом по сравнению с другими методами?

Литература

1. Сивухин Д.В. “Общий курс физики” / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1977.

2. Матвеев А.Н. “Электричество и магнетизм” / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1983.

3. Шпольский Э.В. Атомная физика / Э.В. Шпольский. – М.: 1963.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: знакомство с методами измерения сопротивления резистора, а также приобретение практических навыков обращения с измерительными приборами.

В работе используются: стабилизированный источник постоянного тока, неизвестное сопротивление, изменяемое сопротивление в виде сдвоенного потенциометра (переменный резистор), цифровой Омметр, два встроенных цифровых вольтметра.

Теоретическая часть

Одним из распространенных методов измерения сопротивления является метод, в котором используется мостовая схема рис. 1. Такая мостовая схема постоянного тока часто сокращенно называется **мостом Уитстона.**

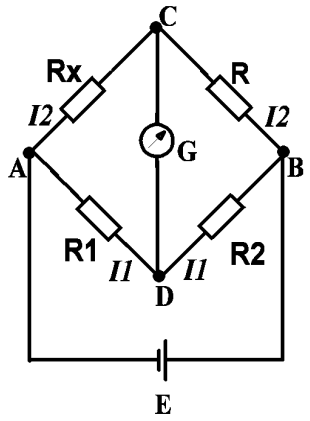


Рис. 1. Принципиальная схема моста постоянного тока

Сущность измерения электрического сопротивления методом мостика состоит в следующем: соединим сопротивления R_1, R_2, R между собой так, как это показано на рис. 1 и при этом пусть сопротивление, например R_x, является измеряемым. Электрический ток источника напряжения E разветвляется между параллельными ветвями АСВ и АДВ между которыми включается ветвь CGД, содержащая гальванометр G. Эту ветвь называют мостиком.

В общем случае в ветви CGД пойдет ток, направление которого зависит от того, какая из точек (С или Д) имеет более высокий потенциал. Но если потенциалы точек С и Д окажутся равными, то тогда ток в мостике не будет. В этом случае напряжение I_1R_1 на участке АД равно напряжению I_2R_x на участке АС. Тогда:

$$I_1R_1= I_2R_x \qquad (1)$$

В свою очередь, для участков ДВ и СВ имеем:

$$I_1R_2=I_2R \qquad (2)$$

Разделив (1) и (2) получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R} \qquad (3)$$

Следовательно, зная R_1, R_2 и R можно определить неизвестное сопротивление R_x. На пратике для измерений в качестве сопротивления R выбирают либо магазин сопротивлений, либо переменный резистор с таким расчетом, чтобы измеряемое сопротивление R_x было сопоставимо по величине с сопротивлениями R_1 и R_2.

Выполнение работы

I. Лабораторная установка.

Практическая схема, применяемая в лабораторной установке, приведена на рис. 2.

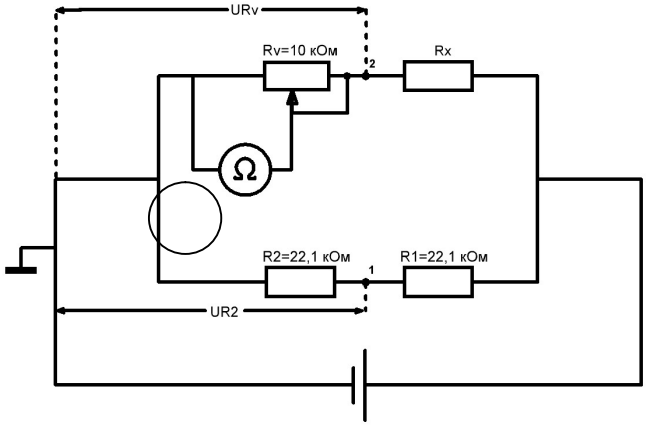


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема для измерения сопротивлений

Исследуемая схема питается от стабилизированного источника постоянного тока, обозначенного на рис.2 как батарея $\mathcal{E}$. В качестве неизвестного сопротивления R_x используется «БЛОК НАГРУЗКИ», содержащий переключатель и три резистора, сопротивления которых надо измерить. Изменяемое сопротивление R_v представляет собой сдвоенный потенциометр (переменный резистор), значение сопротивления которого можно изменять в пределах 0…10 кОм. К контактам потенциометра подключен встроенный цифровой Омметр. Измеренное значение сопротивления переменного резистора выводится на ЖКД LCD индикатор. В качестве гальванометра G используются два встроенных цифровых вольтметра URv (вольтметр 2) и UR2 (вольтметр 1), измеряющие потенциалы соответствующих точек «2» и «1» относительно общего корпуса. Нажатие кнопки INFO приводит к выводу на экран дисплея справочной информации на 10 секунд, после чего установка возвращается в рабочий режим.

В этих условиях процесс измерений на мостовой схеме заключается в установке переменного сопротивления R такого значения, при котором

разность потенциалов между точками «1» и «2» моста стала равной нулю, т. е. URv = UR2. При этом потенциал точки «1» остается неизменным, т. к. сопротивления R1 и R2 постоянны. Эта операция подбора переменного сопротивления называется уравновешиванием моста, а мост, через гальванометр которого не идет ток (т. е. у которого потенциалы точек 1» и «2» равны), называется уравновешенным. Значения измеренных потенциалов в точках «1» и «2» выводятся на LCD ЖКД индикатор.

II. Измерения.

1. Ознакомиться с принципиальной схемой для измерения сопротивлений методом моста рис. 1 и рис. 2.

2. Перед включением установки в сеть проверить целостность сетевых проводов и соединительных кабелей.

3. Подключить блок «НАГРУЗКА» к выходу «ИЗМЕРЯЕМОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ» на лабораторном модуле соединительными проводами.

4. Включить установку в сеть напряжением ~220 В. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор.

5. Поставить переключатель «РЕЗИСТОР» на блоке «НАГРУЗКА» в положение 1 для измерения первого сопротивления.

6. Вращением ручки переменного резистора «Rv» на передней панели учебной установки добиться равенства потенциалов точек «1» и «2». Цифровые вольтметры обозначены соответственно наименованию точек.

7. Записать значение сопротивления переменного резистора по показаниям цифрового Омметра Rvar.

8. Рассчитать значение измеряемого неизвестного сопротивления. Из формулы (3) легко получить соотношение для нахождения неизвестного сопротивления: $R_x = R_{\text{var}} \frac{R_1}{R_2}$ а так как в нашем случае R_1=R_2=22.1 кОм, то R_x=R_{var}

9. Поставив переключатель «РЕЗИСТОР» на блоке «НАГРУЗКА» в положение 2 (тем самым подключив к схеме неизвестное сопротивление 2), повторить пп. 5–7.

10. Проделать аналогичные действия пп. 4–7 для третьего измеряемого сопротивления из блока «НАГРУЗКА».

11. Подключить к блоку «НАГРУЗКА» цифровой мультиметр, поставив переключатель в положение 20 k, обеспечивающее измерение сопротивлений в диапазоне до 20 кОм и, переключаясь между сопротивлениями блока «НАГРУЗКА», сопоставить найденные вами значения сопротивлений методом моста показаниям мультиметра. Учесть, что ошибка измерения сопротивления мультиметром может составлять до ±5%.

12. По окончании работы выключить установку и вынуть сетевую вилку из розетки.

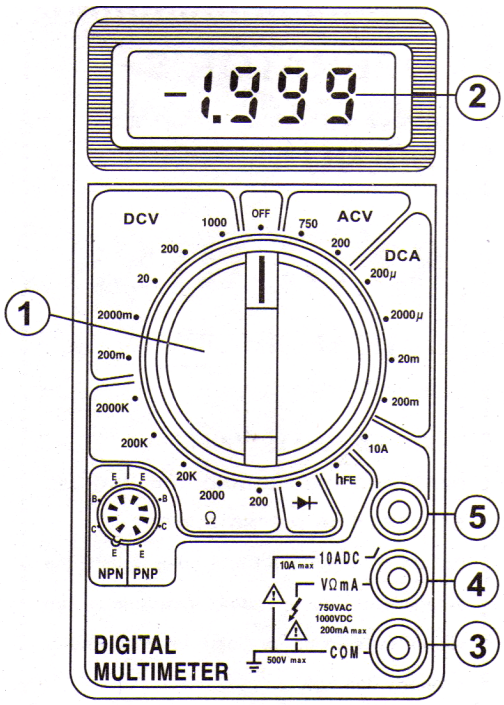


Рис. 3. Мультиметр универсальный. 1 – ручка переключения диапазонов 4 – разъем для подключения сигнального (красного) провода 3 – разъем для подключения ЗЕМЛИ (черного провода) 5 – разъем для измерения больших токов (не используется в работе)

Контрольные вопросы

1. Что такое резистор, от чего зависит сопротивление резистора?
2. Какое сопротивление можно назвать линейным?
3. Что представляет собой мостовая схема измерения? Объясните принцип измерения.
4. В чем преимущества измерения по мостовой схеме перед другими методами.
5. Вывести формулу для определения неизвестного сопротивления в мостовой схеме.
6. Пояснить принцип работы учебной установки согласно рис. 2. Рассчитайте токи и напряжения на схеме, используя измеренные вами значения.
7. Что представляет собой мультиметр? Для каких целей он может быть использован.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988, – 496 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1977, – 688 с.
3. Калашников С.Г. Электричество. Учебное пособие для вузов / С.Г. Калашников. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10. ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Цель работы: ознакомиться с основными характеристиками и способами описания электростатических полей, провести экспериментальное моделирование электростатических полей, создаваемых электродами методом электролитической ванны.

В работе используются: плоский сосуд (ванна) с координатной сеткой на дне, цифровой вольтметр с высоким входным сопротивлением, стабилизированный источник питания.

Теоретическая часть

Для электромагнитных полей уравнения Максвелла в дифференциальной форме имеют вид:

$$\begin{aligned} rot\vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ div\vec{D} &= \rho, \\ rot\vec{H} &= j + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ div\vec{B} &= 0, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\vec{E}, \vec{H}$ – напряженности электрического и магнитного поля,

$\vec{D}$ – вектор электрического смещения,

ρ – плотность заряда,

j – плотность тока.

Статические явления характеризуются постоянством величин во времени $\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0\right)$ и отсутствием токов проводимости $(j = 0)$. При этих условиях уравнения (1) разделяются на две полностью независимых системы, в одну из которых входят величины, характеризующие электростатическое поле:

$$rot\vec{E} = 0 \ , \ div\vec{D} = \rho \qquad (2)$$

а в другую – магнитостатическое поле:

$$rot\vec{H} = 0 \, , \ div\vec{B} = 0 \, . \qquad (3)$$

Таким образом, электростатическое и магнитостатическое поле можно рассматривать независимо друг от друга. В этом и состоит характерная особенность статических полей. Электростатическое поле обусловлено неподвижными электрическими зарядами, магнитостатическое поле – неподвижными постоянными магнитами. Электростатическое поле характеризуется силовой характеристикой – напряженностью $\vec{E}$ и энергетической характеристикой – потенциалом φ.

Метод электролитической ванны основан на использовании ионной проводимости электролитов. При условии равенства потенциалов электродов в вакууме и электролите можно показать, что при заполнении однородной проводящей средой пространства электрическое поле системы проводников не изменяется.

Закон Ома в дифференциальной форме для электролита записывается в виде:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = -\sigma \mathrm{grad}\varphi \,, \tag{4}$$

где j – плотность тока, σ – электропроводность электролита, $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, φ – потенциал.

Для установившегося в электролите тока:

$$\mathrm{div}\vec{j} = 0 \tag{5}$$

Подставляя в выражение (5) значение $\vec{j}$ из выражения (4), получаем:

$$\begin{gathered} \mathrm{div}\left(-\sigma \mathrm{grad}\varphi\right) \equiv -\sigma \Delta\varphi = 0 \\ \Delta\varphi = 0 \end{gathered} \tag{6}$$

Так как при наличии в электролите стационарных токов потенциал электрического поля удовлетворяет уравнению Лапласа и единственное решение этого уравнения определяется заданием потенциалов всех электродов, и потенциал электростатического поля тоже удовлетворяет уравнению Лапласа, то можем заключить; распределение потенциала, полученное в электролитической ванне, может быть непосредственно перенесено на случай интересующих нас полей проводников в вакууме.

Наглядно это можно объяснить следующим образом. Если токи стационарные, то распределение электрических зарядов в проводящей среде не меняется во времени, хотя и происходит движение зарядов. Это обусловлено тем, что в каждой точке проводника на место уходящих зарядов непрерывно поступают новые заряды в таком же количестве. Поэтому в случае постоянного тока движущиеся заряды создают такое же поле, что и неподвижные заряды той же концентрации. Следовательно, электрическое поле проводника с постоянным током будет потенциальным, как и поле неподвижных зарядов (электростатическое).

Таким образом, задача об определении электростатического поля между электродами в вакууме может быть заменена задачей об определении электростатического поля, возникающего при прохождении тока через электролит.

Основные характеристики поля.

Потенциальный характер поля заключается в том, что каждой точке поля можно сопоставить специальную скалярную функцию координат $\varphi(x, y)$, называемую потенциалом. Физический смысл потенциала прост – он численно равен потенциальной энергии единичного пробного заряда, помещенного в данную точку поля, т. е.:

$$\varphi(x,y)=\frac{U(x,y)}{q_0} \tag{7}$$

где q_0 – величина пробного заряда, $U(x,y)$ – его потенциальная энергия в точке с координатами *x, y*. Здесь мы ограничиваемся двумя координатами, так как в данной работе исследуется плоское поле на поверхности проводящего электролита (воды), но, естественно, что формула (7) применима и для пространственного случая.

Другая основная характеристика поля – напряженность электрического поля – физическая величина, численно равная силе, действующей на единичный пробный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E}(x,y)=\frac{\vec{F}(x,y)}{q_0} \tag{8}$$

Между $\vec{E}$ и φ существует взаимосвязь, вытекающая из определения этих величин:

$$\vec{E}=-grad\varphi \tag{9}$$

где вектор $grad\varphi$ называется градиентом потенциала. В двумерном случае:

$$grad\varphi=\vec{e}_x\frac{d\varphi}{dx}+\vec{e}_y\frac{d\varphi}{dy}$$

где $\vec{e}_x$ и $\vec{e}_y$ - единичные орты координатных осей.

Таким образом:

$$E_x=-\frac{\partial\varphi}{\partial x},\ E_y=-\frac{\partial\varphi}{\partial y} \tag{10}$$

Для наглядного графического изображения используют эквипотенциальные поверхности и силовые линии. Эквипотенциальные поверхности – поверхности равного потенциала, удовлетворяющие уравнению $\varphi(x,y,z)=const$, в рассматриваемом случае плоского поля это уже не поверхности, а линии, уравнение которых $\varphi(x,y)=const$.

Силовые линии – это геометрические линии, в каждой точке которых вектор $\vec{E}$ направлен по касательной.

Можно показать, что силовые линии и эквипотенциальные поверхности взаимно перпендикулярны, а также, что градиент потенциала направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности и равен по модулю $d\varphi/dn$, где *dn* – расстояние по нормали между двумя эквипотенциальными поверхностями, потенциал которых отличается на бесконечно малую *dφ*. Поэтому $\vec{E}=-\frac{d\varphi}{dn}\vec{e}_n$. Таким образом, вектор $\vec{E}$ направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности в сторону убывания потенциала. Модуль же вектора $\vec{E}$ будет равен:

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{d\varphi}{dn} \qquad (11)$$

Во всех практических приложениях вместо точной формулы (11) приходится использовать приближенное выражение (рис. 1):

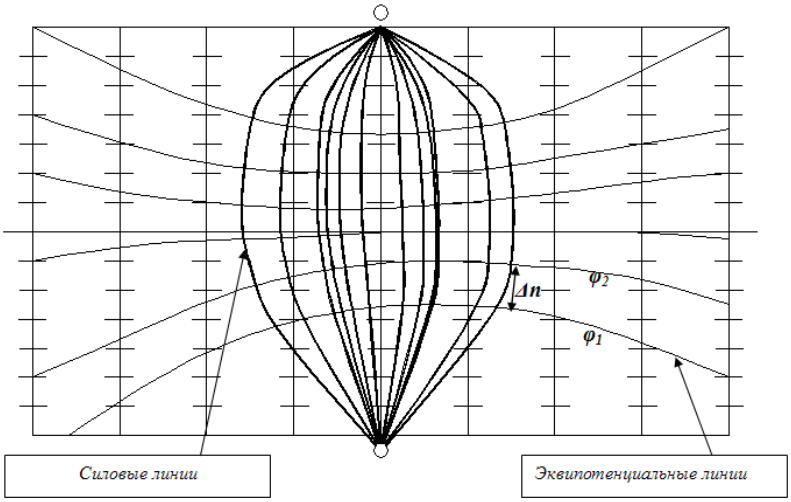


Рис. 1. К определению напряженности поля $\vec{E}$

$$\left|\vec{E}\right| \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta n} \qquad (12)$$

Эта формула тем точнее, чем меньше Δn, а значит и $\Delta\varphi$.

В заключении можно отметить, что между проводником с током и электростатическим полем существует важное различие: электростатическое поле равно нулю внутри проводника, а поле проводника с током нет, так как заряды, его создающие, движутся.

Выполнение работы

I. Лабораторная установка.

Экспериментальная установка представлена на рис. 2.

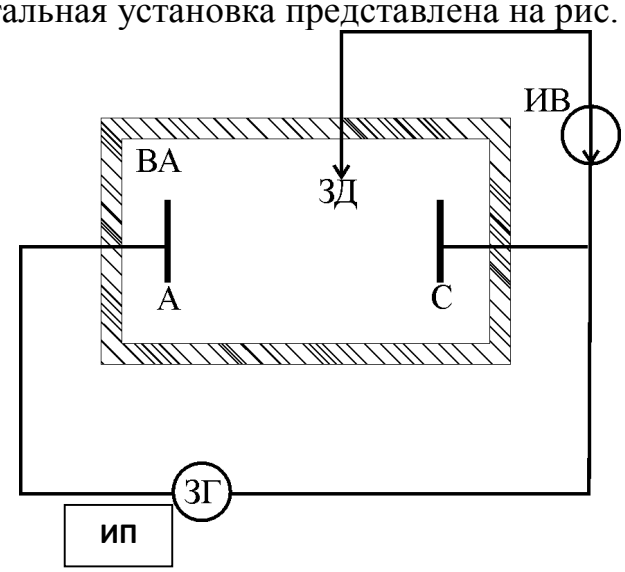


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки

В плоский сосуд (ванну) *ВА* с координатной сеткой на дне устанавливаются электроды *А* и *С* (катод и анод). Затем дно сосуда заполняют водой (заполнение рассчитывают таким образом, чтобы вода равномерно покрывала все дно). Для измерения потенциала точки поля используется специально собранный цифровой вольтметр «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР» *ИВ* с высоким входным сопротивлением. Потенциал точки поля измеряется относительно потенциала катода (при этом $\varphi_к=0$ В). Постоянное напряжение величиной 5 В подается от специального стабилизированного источника питания ***ИП***.

Зонд *ЗД* соединяется с измерительным вольтметром *ИВ*. Потенциал зонда равен потенциалу того места, где находится зонд. При касании зондом какой-либо точки граничной плоскости, вольтметр покажет потенциал этой точки относительно катода. Измеряя потенциалы различных точек, имеющих один и тот же потенциал, можно построить систему эквипотенциальных линий, затем изобразить совокупность силовых линий и при необходимости вычислить Е в любой точке поля по формуле (12).

II. Измерения.

1. Перерисовать на миллиметровую бумагу с установки электроды в натуральную величину, изобразив при этом координатные оси с делениями шкалы.

2. Определить потенциал анода φ_a, прикоснувшись к нему измерительным зондом. Проверить равенство нулю потенциала катода $\varphi_к$.

3. Выбрать эквипотенциальные линии, которые вы будете находить. Рекомендуется выбрать в качестве их линии, потенциалы которых равны φ_1=1,3 В; φ_2=1,5 В; φ_3=1,7 В и т. д. до максимально возможного значения ($\varphi_{i+1}= \varphi_i + 0.2$ В).

4. Найти эквипотенциали в которых потенциал имеет значение φ_1. Для этого следует, поместив зонд в ванночку и плавно перемещая его параллельно координатной оси *y* (при этом координата *x* зонда равна какому-либо определенному значению, например *x=2*), наблюдать за показаниями цифрового вольтметра. В какой-то точке вольтметр покажет значение потенциала φ_1. Это и будет первая точка эквипотенциальной линии. Отметить эту точку на миллиметровой бумаге. **Измерительный вольтметр обеспечивает точные показания только при нахождении его в жидкости. При нахождении в воздухе на дисплее будут наблюдаться «шумовые» эффекты, связанные с работой АЦП вольтметра.**

5. Изменяя координату *x* зонда на 0,5 см и повторяя действия п.4, найти вторую, третью и последующие точки эквипотенциали со значением потенциала φ_1, отмечая эти точки на миллиметровой бумаге.

6. Соединив на своем рисунке точки с потенциалом φ_1 вы получаете первую из искомых эквипотенциалей.

7. Аналогичные измерения проделать для всех потенциалов φ_2, φ_3 и т. д.

8. Аккуратно, соблюдая взаимную ортогональность нарисовать на миллиметровой бумаге систему силовых линий (10-12 линий), указав стрелками их направление. Следует учитывать, что силовые линии начинаются и заканчиваются на электродах, а их густота пропорциональна величине электрического поля E

9. Вычислить по формуле (12) значения E во всех точках пересечения какой-либо одной силовой линии с эквипотенциалями.

Контрольные вопросы

1. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах. Физический смысл каждого уравнения. Максвелловский ток смещения.

2. Что такое электрическое поле. Каковы его свойства?

3. Какие поля называются потенциальными? Как записать условие потенциального характера поля.

4. Что такое потенциал? Разность потенциалов? Каков их смысл?

5. Как определяется и какой смысл имеет электрический вектор E? Как он связан с потенциалом?

6. Что собой представляет градиент потенциала? Чему равен его модуль, проекции? Куда он направлен?

7. Почему поле постоянного тока является потенциальным?

8. Чем отличаются электростатическое поле и поле постоянного тока?

9. Доказать, что силовые линии перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988. – 496 с.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. – М.: Наука, 1977. – 688 с.

3. Калашников С.Г. Электричество. Учебное пособие для вузов. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМО-ЭДС

Цель работы: практическое изучение термоэлектрических явлений, исследование влияние разности температур на величину термоэлектродвижущей силы, определение постоянной термопары.

Теоретическая часть

Введение

Если привести два разных металла в соприкосновение, между ними возникнет разность потенциалов, которая называется контактной. Контактная разность потенциалов вызывается тем, что при соприкосновении металлов часть электронов переходит из одного металла в другой. Граница металла является потенциальным барьером, ограничивающим выход электрона во внешнее пространство. Чтобы вырвать свободный электрон из металла, надо совершить определенную работу. Эта величина называется работой выхода и зависит от природы металла. Из-за различия в величине работы выхода и диффузный поток электронов через границу металлов не будет уравновешенным, и металл с меньшей работой выхода зарядится положительно.

Подобным образом и различие концентрации свободных электронов в контактирующих металлах приведет к появлению скачка потенциала в месте контакта. В разных металлах плотность электронного газа различна. Поэтому различно и количество электронов, пересекающих в единицу времени место контакта в прямом и обратном направлениях. В результате металл, имеющий большую плотность электронного газа, будет терять электронов больше, чем получать, т. е. он будет заряжаться положительно. Металл, имеющий меньшую плотность электронного газа, будет заряжаться отрицательно. Возникшие заряды создают поле, которое будет тормозить дальнейший переход из одного металла в другой. В какой-то момент переход электронов прекратится, а в месте контакта установится некоторая разность потенциалов, называемая внутренней контактной разностью потенциалов.

Явление термоэлектричества

Термо-ЭДС возникает в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников M_1 и M_2, если места контактов (А, В) поддерживаются при разных температурах.

Если цепь замкнута, то в ней течет электрический ток (так называемый термоток I_T), причем изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления термотока (рис. 1).

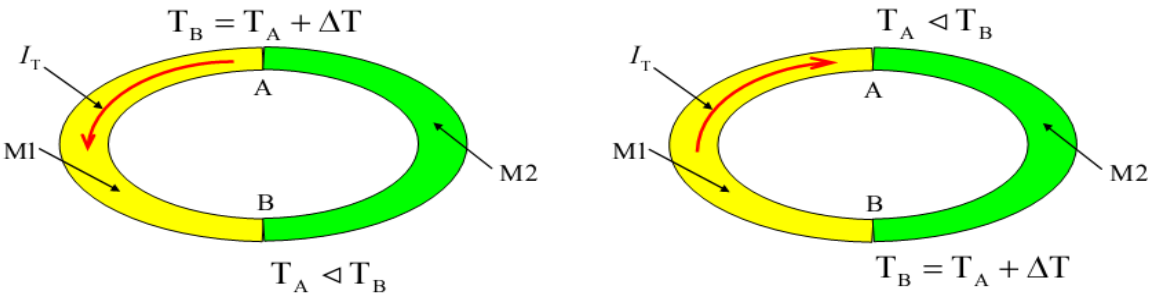


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая возникновение Термо-ЭДС в электрической цепи из последовательно соединенных разнородных проводников

Величина термо-ЭДС зависит от абсолютных значений температур спаев (T_A, T_B), разности этих температур ΔT и от природы материалов, составляющих термоэлемент.

Как было сказано выше, одной из причин возникновения термоЭДС является наличие разности в плотностях электронного газа для различных металлов. Рассмотрим более подробно эту причину.

Исходя из классической модели электронного газа, оценим величину контактной разности двух проводящих материалов с различной концентрацией электронов.

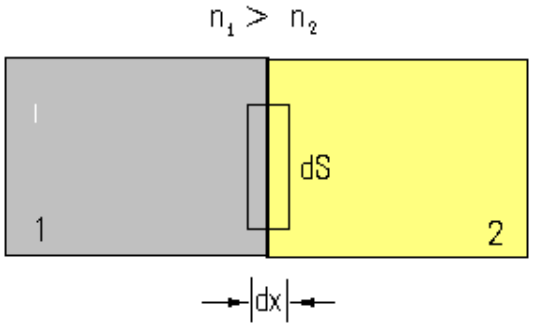


Рис. 2. К оценке величины контактной разности потенциалов

Возникновение внутренней контактной разности потенциалов связано с различием концентраций свободных электронов в металлах. Допустим, $n_1 > n_2$ (см. рис. 2). Будем рассматривать процессы, основываясь на представлениях классической электронной теории. При одинаковой температуре металлов (T) давление электронного газа в первом металле будет $P_1 = n_1 kT$, во втором $P_2 = n_2 kT$. В результате неуравновешенного диффузионного перехода электронов возникает внутренняя разность потенциалов, появляется электрическое поле, которое вызывает прекращение преимущественного перехода и установление динамического равновесия.

Рассмотрим тонкий слой dx вблизи границы раздела металлов. Перепад давлений на участке dx будет $dp = kTdn$. Выделим в рассматриваемом слое некоторый объем $dxdS$. Тогда сила $dF_{мех}$, действующая на электронный газ в этом объеме вследствие разности давлений будет равна:

$$dF_{мех} = dpdS = kT\,dn\,dS \quad (1)$$

Но электроны имеют электрический заряд и в возникшем внутреннем поле на них будет действовать $dF_{эл}$, равная и противоположно направленная:

$$dF_{эл} = eEndxdS, \quad (2)$$

где $ndxdS$ – число электронов в рассматриваемом объеме, eE - сила, действующая на каждый электрон. При достижении динамического равновесия:

$$kT\,dn\,dS = e\frac{d\varphi}{dx}ndxdS \quad (3)$$

Сокращая в (1.3) на элемент площади dS, а в правой части ещё и на dx, получим дифференциальное уравнение:

$$kT\,dn = end\varphi \quad (4)$$

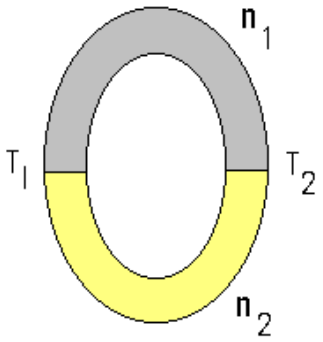


Рис. 3. Пояснение к формулам (7), (8)

Разделив переменные, получаем дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{dn}{n} = \frac{e}{kT}d\varphi\,. \quad (5)$$

Интегрируя (1.5) в пределах всего слоя контакта, получим величину контактной разности потенциалов

$$\varphi = \frac{kT}{e}\int_{n_1}^{n_2}\frac{dn}{n} = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (6)$$

Если цепь, состоящую из разнородных проводников при одинаковой температуре, замкнуть, то в каждом из контактов возникнет разность потенциалов, но электрический ток в цепи не возникает, так как результирующая контактная разность потенциалов $\Delta\varphi$ равна:

$$\Delta\varphi = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) + \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_1}{n_2}\right) = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) - \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 0 \quad (7)$$

Однако, если контакты замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, поддерживать при различных температурах, то в цепи возникает электрический ток, направление которого изменяется при изменении знака разности температур. Результирующая контактная разность потенциалов в этом случае записывается аналогично (7):

$$\Delta\varphi = \frac{kT_1}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) - \frac{kT_2}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \frac{k\left(T_1 - T_2\right)}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \qquad (8)$$

Сумма контактных скачков потенциала равна термоэлектродвижущей силе $\varphi = \varepsilon$.

Обозначая $\frac{k}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \alpha$, получим следующее выражение для величины термоэлектродвижущей силы:

$$\varepsilon = \alpha\left(T_1 - T_2\right) \qquad (9)$$

Величину α называют удельной термо ЭДС, коэффициентом термо-ЭДС или коэффициентом Зеебека (α = 10^{-4} – 10^{-5} Вольт/К). Хотя ТЭДС прямо пропорциональна разности температур спаев, она зависит не только от нее. Особенно это заметно при большой разности температур. Поэтому для характеристики термоэлектрических свойств какой-либо пары проводников пользуются удельной термо ЭДС, которая равна термоэлектродвижущей силе, возникающей при разности температур спаев в один градус:

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT} \qquad (10)$$

Для металлов величина α порядка десятков мкВ· $К^{-1}$ и, как правило, слабо зависит от температуры. У полупроводников она на один-два порядка больше и сильно зависит от температуры. Поэтому в ограниченном интервале температур для металлов можно считать, что термо-ЭДС ε изменяется линейно в зависимости от разности температур $\Delta T = \left(T_1 - T_2\right)$, а $\alpha \approx$const.

Устройство термопары

Замкнутая цепь, состоящая из двух разнородных металлов, места соединения которых поддерживаются при различных температурах, называется термопарой (рис. 4). Технически термопара представляет собой две проволоки из различных металлов, в месте контактов которые свариваются или спаиваются. Один из контактов помещается в термостатированную среду большой теплоемкости с известной и постоянной температурой T_0, а второй в область, температура которой измеряется Т.

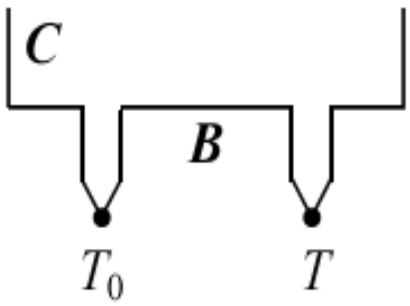


Рис. 4. Схема включения дифференциальной термопары

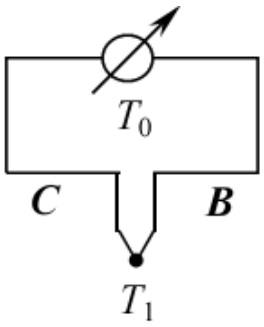


Рис. 5. Схема включения термопары

Для измерения возникающей термо-ЭДС в цепь необходимо включить гальванометр. Для подключения этого прибора разрыв цепи производится по проводнику, приобретающему положительный потенциал в контакте с другим. Так, в термопаре медь-константан разрыв осуществляется по меди.

Зависимость термо-эдс от температуры для данной пары металлов, составляющей термопару, обычно заранее известна (в виде градуировочного графика $\varepsilon = \alpha\left(T_1 - T_2\right)$, где α–угол наклона этого графика к оси температур). Такая термопара называется дифференциальной, т.к. с ее помощью можно измерять разность температур.

Оценить температуру какой-то среды можно и с помощью термопары, схема измерения которой представлена на рис. 5. В этом случае показания термопары в значительной степени будут зависеть от колебаний температуры окружающей среды T_0 (роль второго спая играет контакт с гальванометром).

Погрешность определения температуры с помощью термопар определяется в основном неоднородностью термопарной проволоки и составляет как правило, несколько градусов, и лишь у некоторых особо однородных сплавов достигает 0.1 К. ЭДС темопары генерируется на тех участках проволоки, где есть градиент температуры. Если градиент температуры в разных измерениях будет падать на разных участках проволоки, отличающихся по своим свойствам, то и термо-ЭДС будет немного отличаться. Проволоки большего диаметра, как правило, более однородны. Проволоки из чистых металлов, как правило, демонстрируют большую однородность, чем из сплавов.

При высоких температурах зависимость ЭДС термопары ε от температуры T близка к линейной, соответственно чувствительность $d\varepsilon / dT$ слабо зависит от температуры. При низких температурах чувствительность большинства термопар (за исключением специальных низкотемпературных) падает при приближении к абсолютному нулю температуры. Например у медь–константановой термопары при комнатной температуре чувствительность порядка 40 мкВ/К, а при температуре жидкого азота (T=77К) чувствительность уже 10 мкВ/К.

Следует отметить, что полуметаллы (висмут, сурьма) и особенно полупроводниковые материалы позволяют получить значительно более высокую чувствительность, чем металлы – до 1000 мкВ/К, но они не годятся для термометрии вследствие плохой воспроизводимости (свойства полу-

проводников определяются небольшим количеством легирующих примесей и поэтому воспроизводимость их свойств всегда хуже, чем у металлов и металлических сплавов) и невозможности изготовить из них гибкую проволоку. Полупроводниковые элементы применяются в прямом преобразовании энергии из тепловой формы в электрическую и наоборот.

Термопара платина – сплав (платина+10% родий) имеет стандартную градуировку от 0°С до 1600°С, а в области температур 630°С – 1064°С является *эталонным интерполяционным прибором* для установления практической температурной шкалы по реперным точкам затвердевания сурьмы, серебра и золота. Однако она содержит драгметалл, что несколько мешает ее широкому использованию.

Для точной работы необходима индивидуальная градуировка того сорта проволоки, из которой изготовлена термопара, причем градуировку часто представляют в виде поправок к стандартной таблице. Константан из различных партий может иметь существенно отличающиеся (до 5%) термометрические характеристики, что не позволяют создать стандартные таблицы для константановых термопар.

Конструктивное исполнение термопар различно для работы в области низких и высоких температур. Использование термопар при высоких температурах ограничивается термостойкостью (плавлением и окислением) самих проводов термопары. Обычно диаметр проволок термопары составляет 0.2–0.5 мм (более толстая проволока, как правило, более однородна). Высокотемпературные термопары изготавливают сваркой голых проволок, электроизоляция выполняется керамической соломкой (есть специальная двухканальная), иногда термопара заключается в металлический чехол с герметизацией на холодном конце. В низкотемпературных (ниже 100°С) термопарах можно применять простые электроизолированные провода ПЭЛ или ПЭЛШО, а измерительный спай можно спаять обычным припоем.

Достоинствами термопары являются:

- простота изготовления;
- воспроизводимость;
- малая теплоемкость и поэтому малая инерционность показаний;
- удобство измерения именно разности температур;
- нулевая рассеиваемая мощность на термопаре;
- простота регистрирующей аппаратуры – не нужен источник питания;
- малое выходное сопротивление;

Неудобствами являются:

- необходимость термостатирования опорного спая;
- часто недостаточная чувствительность *(dε/dT),* особенно в области низких температур;
- относительно большой теплоподвод к измеряемому объекту теплопроводностью по проволокам термопары;
- проблема вывода электродов из герметичного объема.

Выполнение работы

Проградуировать термопару – означает получить зависимость ее термоЭДС E_x от разности температур спаев ΔT.

В данной работе термо-ЭДС и разность температур спаев определяют с помощью одного и того же вольтметра.

Для измерения разности температур спаев исследуемой термопары используют контрольную хромель-копелиевую термопару, градуировочная кривая которой задана графически и в виде таблицы.

Оборудование: стандартная (хромель-копелиевая) термопара, двухполюсный переключатель, электропечь, исследуемая термопара, вольтметр.

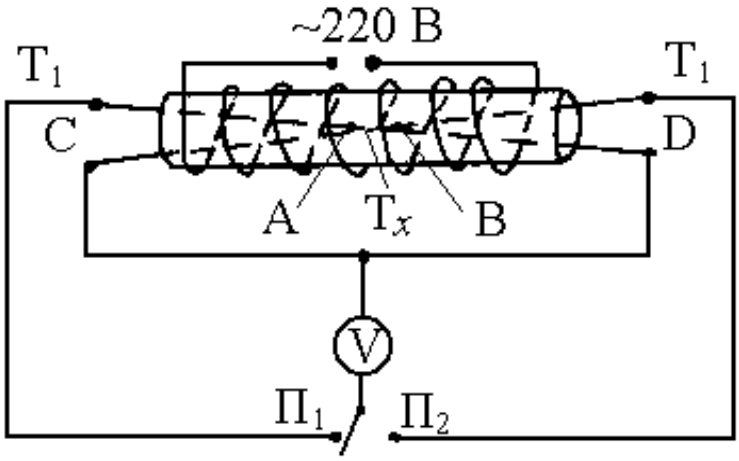


Рис. 6. Принципиальная схема установки

Спаи контрольной A и исследуемой B термопар помещают в узкую и длинную печь, т. е. поддерживают при одинаковой температуре T_x (рис. 6).

Концы термопар C и D выводят наружу и поддерживают при комнатной температуре T_1. С помощью переключателя $П_1П_2$ вольтметр можно подключать поочередно то к одной, то к другой термопаре.

Измерив ЭДС контрольной термопары, по градуировочной кривой определяют разность температур ΔT ее спаев, а следовательно, и спаев исследуемой термопары.

Порядок выполнения

1. Включить электропечь и нагреть ее до указанной на установке температуры.

2. Измерить вольтметром ЭДС E_x исследуемой термопары (переключатель в положении $П_2$).

3. Измерить ЭДС E контрольной термопары (переключатель в положение $П_1$).

4. Выключив печь из сети, провести попарные измерения E_x и E по п.п. 2,3 через каждую минуту до тех пор, пока температура внутри печи не станет постоянной.

5. По градуировочному графику хромель-копелиевой термопары определить разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$ для всех измеренных значений. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	E_x, мВ	E, мВ	ΔT, К	α, мВ/ К
1				
2				
3				
4				
5				
6				
.				
.				

6. По результатам измерений и вычислений построить график $E_x = f(\Delta T)$.
7. Вычислить среднее значение постоянной термопары $<\alpha>$.
8. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм возникновения контактной разности потенциалов.

2. От чего зависит величина внутренней контактной разности потенциалов?

3. Выведите формулу для величины контактной разности потенциалов, основываясь на представлениях классической электронной теории.

4. При каком условии появляется термо-ЭДС в цепи, состоящей из разнородных материалов? Что такое удельная термо-ЭДС?

5. Объясните применение термопар для измерения температуры. Приведите схемы включения термопар.

6. Опишите известные методы измерения ЭДС, проанализируйте их достоинства и недостатки.

7. Обоснуйте точность метода измерения ЭДС источника с помощью вольтметра.

8. Опишите устройство и назначение термопары.

9. Объясните принцип работы экспериментальной учебной установки согласно схеме рис. 6.

Литература

1. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М., Наука, 1979. (§§ 5–6 – Виды термометров. Практическая температурная шкала. – стр. 28–35.)

2. А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. Молекулярная физика. – М., Наука, 1976. (§ 19 – Измерение параметров состояния – стр. 83–94).

3. Руководство к лабораторным занятиям по физике. (ред. Л.Л. Гольдин) – М., Наука, 1973. – (Работа 6 – Градуирование термопары – стр. 65–71.)

4. Физический практикум. (ред. В.И. Иверонова) – М., Гос. издательство физико-математической литературы, 1962. (Задача 25 – Изготовление и градуировка термопар – стр. 142–145).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЭФФЕКТ ЗЕЕБЕКА

Цель работы: практическое изучение термоэлектрических явлений, исследование влияние разности температур на величину термоэлектродвижущей силы, определение постоянной термопары.

Теоретическая часть

Введение

Если привести два разных металла в соприкосновение, между ними возникнет разность потенциалов, которая называется контактной. Контактная разность потенциалов вызывается тем, что при соприкосновении металлов часть электронов переходит из одного металла в другой. Граница металла является потенциальным барьером, ограничивающим выход электрона во внешнее пространство. Чтобы вырвать свободный электрон из металла, надо совершить определенную работу. Эта величина называется работой выхода и зависит от природы металла. Из-за различия в величине работы выхода и диффузный поток электронов через границу металлов не будет уравновешенным, и металл с меньшей работой выхода зарядится положительно.

Подобным образом и различие концентрации свободных электронов в контактирующих металлах приведет к появлению скачка потенциала в месте контакта. В разных металлах плотность электронного газа различна. Поэтому различно и количество электронов, пересекающих в единицу времени место контакта в прямом и обратном направлениях. В результате металл, имеющий большую плотность электронного газа, будет терять электронов больше, чем получать, т. е. он будет заряжаться положительно. Металл, имеющий меньшую плотность электронного газа, будет заряжаться отрицательно. Возникшие заряды создают поле, которое будет тормозить дальнейший переход из одного металла в другой. В какой-то момент переход электронов прекратится, а в месте контакта установится некоторая разность потенциалов, называемая внутренней контактной разностью потенциалов.

Явление термоэлектричества. Эффект Зеебека.

Эффект Зеебека – возникновение ЭДС (термоЭДС) в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников M_1 и M_2, если места контактов (A, B) поддерживаются при разных температурах.

Если цепь замкнута, то в ней течет электрический ток (так называемый термоток I_T), причем изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления термотока (рис. 1).

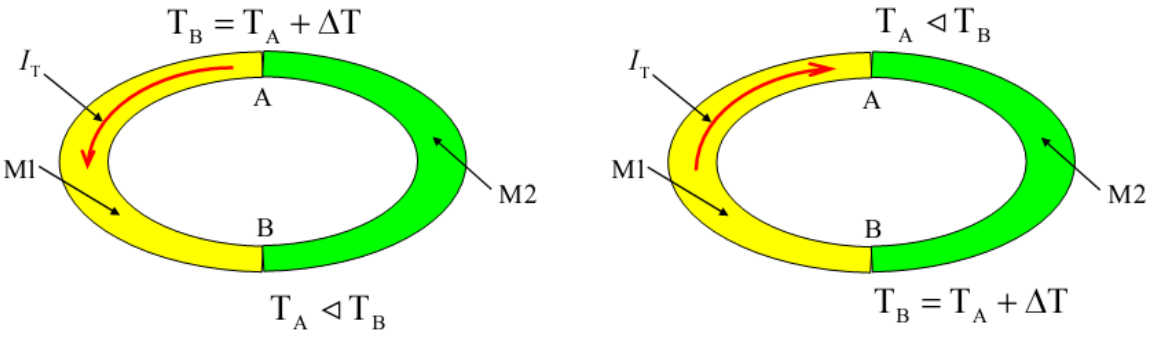


Рис. 1. Цепь для демонстрации эффекта Зеебка

Цепь, составленная из двух различных проводников (M_1, M_2 называется термоэлементом или термопарой, а ее ветви – термоэлектродами.

Величина термоЭДС зависит от абсолютных значений температур спаев (T_A, T_B), разности этих температур ΔT и от природы материалов, составляющих термоэлемент.

Как было сказано выше, одной из причин возникновения термоЭДС является наличие разности в плотностях электронного газа для различных металлов. Рассмотрим более подробно эту причину.

Исходя из классической модели электронного газа, оценим величину контактной разности двух проводящих материалов с различной концентрацией электронов.

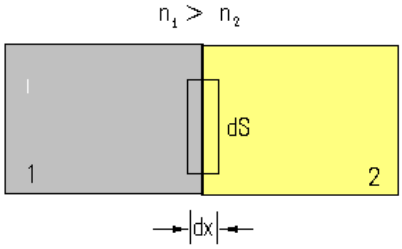


Рис. 2. К оценке величины контактной разности потенциалов

Возникновение внутренней контактной разности потенциалов связано с различием концентраций свободных электронов в металлах. Допустим, $n_1 > n_2$ (см. рис. 2). Будем рассматривать процессы, основываясь на представлениях классической электронной теории. При одинаковой температуре металлов (T) давление электронного газа в первом металле будет $P_1 = n_1 kT$, во втором $P_2 = n_2 kT$. В результате неуравновешенного диффузионного перехода электронов возникает внутренняя разность потенциалов, появляется электрическое поле, которое вызывает прекращение преимущественного перехода и установление динамического равновесия.

Рассмотрим тонкий слой dx вблизи границы раздела металлов. Перепад давлений на участке dx будет $dp = kTdn$. Выделим в рассматриваемом слое некоторый объем $dx\,dS$. Тогда сила $dF_{мех}$, действующая на электронный газ в этом объеме вследствие разности давлений будет равна:

$$dF_{мех} = dpdS = kT\,dn\,dS. \qquad (1.1)$$

Но электроны имеют электрический заряд и в возникшем внутреннем поле на них будет действовать $dF_{эл}$, равная и противоположно направленная $dF_{мех}$:

$$dF_{эл} = eEndxdS, \tag{1.2}$$

где $ndxdS$ – число электронов в рассматриваемом объеме, eE – сила, действующая на каждый электрон, E = $\frac{d\varphi}{dx}$. При достижении динамического равновесия $dF_{мех} = dF_{эл}$:

$$kT\,dn\,dS = e\frac{d\varphi}{dx}ndxdS \tag{1.3}$$

Сокращая в (1.3) на элемент площади dS, а в правой части ещё и на dx, получим дифференциальное уравнение:

$$kT\,dn = end\varphi \tag{1.4}$$

Разделив переменные, получаем дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{dn}{n} = \frac{e}{kT}d\varphi\,. \tag{1.5}$$

Интегрируя (1.5) в пределах всего слоя контакта, получим величину контактной разности потенциалов

$$\varphi = \frac{kT}{e}\int_{n_1}^{n_2}\frac{dn}{n} = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{1.6}$$

Если цепь, состоящую из разнородных проводников при одинаковой температуре, замкнуть, то в каждом из контактов возникнет разность потенциалов, но электрический ток в цепи не возникает, так как результирующая контактная разность потенциалов $\Delta\varphi$ равна:

$$\Delta\varphi = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) + \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_1}{n_2}\right) = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) - \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 0 \tag{1.7}$$

Однако, если контакты замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, поддерживать при различных температурах, то в цепи возникает электрический ток, направление которого изменяется при изменении знака разности температур. Результирующая контактная разность потенциалов в этом случае записывается аналогично (1.7):

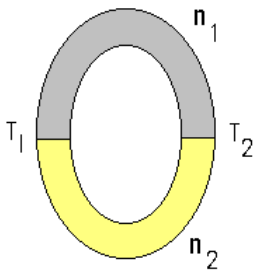


Рис. 3. Пояснение к формулам (1.7), (1.8)

$$\Delta\varphi = \frac{kT_1}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) - \frac{kT_2}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \frac{k\left(T_1 - T_2\right)}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.8)$$

Сумма контактных скачков потенциала равна термоэлектродвижущей силе $\varphi = \varepsilon$.

Обозначая $\frac{k}{e}\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \alpha$, получим следующее выражение для величины термоэлектродвижущей силы:

$$\varepsilon = \alpha\left(T_1 - T_2\right) \quad (1.9)$$

Величину α называют удельной термо ЭДС, коэффициентом термоэдс или коэффициентом Зеебека (α = 10^{-4} – 10^{-5} Вольт/К). Хотя ТЭДС прямо пропорциональна разности температур спаев, она зависит не только от нее. Особенно это заметно при большой разности температур. Поэтому для характеристики термоэлектрических свойств какой-либо пары проводников пользуются удельной термо-ЭДС, которая равна термоэлектродвижущей силе, возникающей при разности температур спаев в один градус:

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT} \quad (1.10)$$

Для металлов величина α порядка десятков мкВ· $К^{-1}$ и, как правило, слабо зависит от температуры. У полупроводников она на один-два порядка больше и сильно зависит от температуры. Поэтому в ограниченном интервале температур для металлов можно считать, что термоЭДС ε изменяется линейно в зависимости от разности температур $\Delta T = \left(T_1 - T_2\right)$, а $\alpha \approx$const.

Практическое применение эффекта Зеебека. Устройство термопары

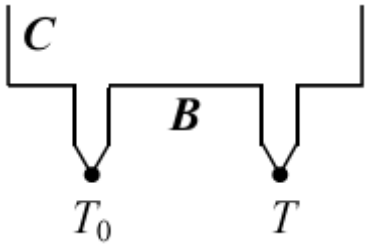


Рис. 4. Схема включения дифференциальной термопары

Замкнутая цепь, состоящая из двух разнородных металлов, места соединения которых поддерживаются при различных температурах, называется термопарой (рис. 4). Технически термопара представляет собой две проволоки из различных металлов, в месте контактов которые свариваются или спаиваются. Один из контактов помещается в термостатированную среду большой теплоемкости с известной и постоянной температурой T_0, а второй в область, температура которой измеряется Т.

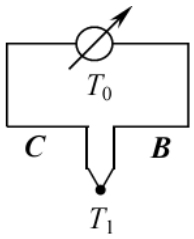


Рис. 5. Схема включения термопары

Для измерения возникающей термоэдс в цепь необходимо включить гальванометр. Для подключения этого прибора разрыв цепи производится по проводнику, приобретающему положительный потенциал в контакте с другим. Так, в термопаре медь–константан разрыв осуществляется по меди.

Зависимость термоэдс от температуры для данной пары металлов, составляющей термопару, обычно заранее известна (в виде градуировочного графика $\varepsilon = \alpha\left(T_1 - T_2\right)$ где α– угол наклона этого графика к оси температур). Такая термопара называется дифференциальной, т.к. с ее помощью можно измерять разность температур.

Оценить температуру какой-то среды можно и с помощью термопары, схема измерения которой представлена на рис. 5. В этом случае показания термопары в значительной степени будут зависеть от колебаний температуры окружающей среды T_0 (роль второго спая играет контакт с гальванометром).

Погрешность определения температуры с помощью термопар определяется в основном неоднородностью термопарной проволоки и составляет как правило, несколько градусов, и лишь у некоторых особо однородных сплавов достигает 0.1 К. ЭДС темопары генерируется на тех участках проволоки, где есть градиент температуры. Если градиент температуры в разных измерениях будет падать на разных участках проволоки, отличающихся по своим свойствам, то и термо-ЭДС будет немного отличаться. Проволоки большего диаметра, как правило, более однородны. Проволоки из чистых металлов, как правило, демонстрируют большую однородность, чем из сплавов.

При высоких температурах зависимость ЭДС термопары ε от температуры T близка к линейной, соответственно чувствительность $d\varepsilon / dT$ слабо зависит от температуры. При низких температурах чувствительность большинства термопар (за исключением специальных низкотемпературных) падает при приближении к абсолютному нулю температуры. Например у медь-константановой термопары при комнатной температуре чувствительность порядка 40 мкВ/К, а при температуре жидкого азота (T=77К) чувствительность уже 10 мкВ/К.

Следует отметить, что полуметаллы (висмут, сурьма) и особенно полупроводниковые материалы позволяют получить значительно более высокую чувствительность, чем металлы – до 1000 мкВ/К, но они не годятся для термометрии вследствие плохой воспроизводимости (свойства полупроводников определяются небольшим количеством легирующих примесей и поэтому воспроизводимость их свойств всегда хуже, чем у металлов

и металлических сплавов) и невозможности изготовить из них гибкую проволоку. Полупроводниковые элементы применяются в прямом преобразовании энергии из тепловой формы в электрическую и наоборот.

Термопара платина – сплав (платина+10% родий) имеет стандартную градуировку от 0°С до 1600°С, а в области температур 630°С – 1064°С является *эталонным интерполяционным прибором* для установления практической температурной шкалы по реперным точкам затвердевания сурьмы, серебра и золота. Однако она содержит драгметалл, что несколько мешает ее широкому использованию.

Для точной работы необходима индивидуальная градуировка того сорта проволоки, из которой изготовлена термопара, причем градуировку часто представляют в виде поправок к стандартной таблице. Константан из различных партий может иметь существенно отличающиеся (до 5%) термометрические характеристики, что не позволяют создать стандартные таблицы для константановых термопар.

Конструктивное исполнение термопар различно для работы в области низких и высоких температур. Использование термопар при высоких температурах ограничивается термостойкостью (плавлением и окислением) самих проводов термопары. Обычно диаметр проволок термопары составляет 0.2–0.5 мм (более толстая проволока, как правило, более однородна). Высокотемпературные термопары изготавливают сваркой голых проволок, электроизоляция выполняется керамической соломкой (есть специальная двухканальная), иногда термопара заключается в металлический чехол с герметизацией на холодном конце. В низкотемпературных (ниже 100°С) термопарах можно применять простые электроизолированные провода ПЭЛ или ПЭЛШО, а измерительный спай можно спаять обычным припоем.

Достоинствами термопары являются:

- простота изготовления;
- воспроизводимость;
- малая теплоемкость и поэтому малая инерционность показаний;
- удобство измерения именно разности температур;
- нулевая рассеиваемая мощность на термопаре;
- простота регистрирующей аппаратуры – не нужен источник питания;
- малое выходное сопротивление;

Неудобствами являются:

- необходимость термостатирования опорного спая;
- часто недостаточная чувствительность *(dε/dT),* особенно в области низких температур;
- относительно большой теплоподвод к измеряемому объекту теплопроводностью по проволокам термопары;
- проблема вывода электродов из герметичного объема.

Выполнение работы

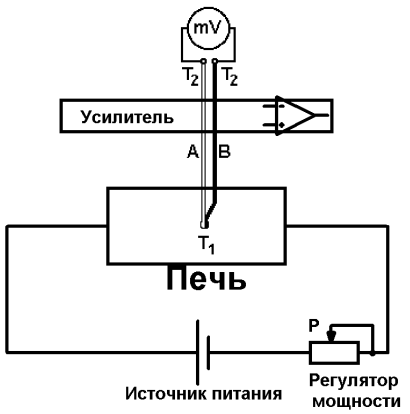


Рис. 6. Принципиальная упрощенная электрическая блок-схема учебной установки ФЭЛ-17 для наблюдения термоэлектрического эффекта

Принципиальная схема для изучения эффекта Зеебека приведена на рис. 6. Конструктивно установка состоит из узкой и длинной электропечи (для равномерного нагрева) с регулируемой мощностью нагрева, в которую помещаются концы термопары A и B. Другие концы подключены через специальный усилитель к высокоточному цифровому вольтметру mV и находятся при температуре окружающей среды T_2. Термо-ЭДС ввиду малой величины (порядка нескольких милливольт) не может быть зарегистрирована непосредственно вольтметром, поэтому сигнал с термопары усиливается операционным усилителем. Для уменьшения погрешности применяется специально сконструированный цифровой вольтметр с высоким (около 100 МОм) входным сопротивлением, поэтому с достаточной степенью точности можно считать, что термо-ЭДС ε равна напряжению на клеммах вольтметра mV. Температура T_1 горячего спая измеряется высокоточным цифровым термодатчиком, также введенным в полость электропечи. Точность измерения температуры термодатчика составляет ±0,2 ^{0}C. Все измеренные и контролируемые параметры (мощность нагрева P, температура T_1 а также термоЭДС выводятся на LCD ЖКД дисплей). Температура T_2 окружающей среды измеряется либо комнатным термометром, либо принимается равной показанию цифрового датчика температуры T до начала нагрева.

В начале работы необходимо осуществить установку начала отсчета (установку «нуля») термо-ЭДС с помощью ручки «УСТАНОВКА НУЛЯ» на передней панели учебной установки. Технически это необходимо сделать следующим образом. Перед началом нагрева, очень плавно вращая ручку «УСТАНОВКА НУЛЯ» добиться некоторого небольшого положительного значения показания вольтметра порядка 0,1-0,3 мВ. Принять это значение за ε_0 – начало отсчета термо-ЭДС, т. е. истинное значение $\varepsilon_{ист}$ термоэдс будет определяться по формуле:

$$\varepsilon_{ист} = \varepsilon_{mV} - \varepsilon_0 \qquad (2.1)$$

где ε_{mV} – показания милливольтметра, ε_0 – установленный вами начальный уровень отсчета. Это обстоятельство связано исключительно с техническими особенностями эксплуатации усилителя, применяемого в данной работе.

Скорость нагрева регулируется с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ». Удержание кнопок приводит к плавному возрастанию мощности печи. Для охлаждения предусмотрена возможность включения кулера нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Отключение кулера осуществляется нажатием одной из кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ». При перегревании электропечи свыше 100^0C срабатывает автоматическое включение охлаждения, а электропечь отключается.

Порядок выполнения

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой учебной установки рис. 6, разобраться в назначении ручек и измерительного прибора. Проверить целостность сетевого провода;
2. Включить установку в сеть ~220 В. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор.
3. Дать установке прогреться в течении трех минут.
4. Плавным вращением ручки «УСТАНОВКА НУЛЯ» на панели учебного модуля установить начальное значение ε_0 – начало отсчета термоЭДС в пределах 0,1–0,3 мВ.
5. Измерить значение комнатной температуры T_2 с помощью комнатного термометра либо принять это значение показанию цифрового термодатчика.
6. Подготовить таблицу 1 для записи результатов измерения зависимости термоЭДС от температуры. Во время нагрева в таблицу следует записывать показания вольтметра ε_{mV} и температуру горячего спая T_1, ^{0}C, остальные расчеты проводить после включения охлаждения.

Таблица 1

	ε_0= … мВ, T_2= … ^{0}C – окруж. среда			
ε_{mV}, мВ				
$\varepsilon_{ист}= \varepsilon_{mV}- \varepsilon_0$, мВ				
T_1, ^{0}C				
$\Delta T = (T_1 - T_2)$, ^{0}C				

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT} = \ldots \text{ мВ}/^0\text{C}$$

7. Установив мощность электропечи равную 30% с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГЕРВАТЕЛЯ», приступить к снятию зависимости термоэдс ε_{mV} от температуры горячего спая T_1, записывая через один градус значение показаний вольтметра и температуры.

8. При достижении температуры 45^0C мощность нагрева рекомендуется повысить до 60–70%.

9. Нагрев производить до температуры 60–65^0C, после чего включить систему охлаждения нажатием кнопки «РЕЖИМ РАБОТЫ». Охлаждать нагреватель следует в течение получаса до достижения практически комнатной темературы ≈30^0C

10. Заполнить таблицу 1, рассчитав истинное значение термо-ЭДС с поправкой на начальный уровень по формуле (2.1) и разность температур $\Delta T = (T_1 - T_2)$ для каждого значения T_1.

11. Построить график зависимость термо-ЭДС от разности температуры $\varepsilon_{ист}(\Delta T)$. Выбрав линейный участок на графике, определить значение удельной термоЭДС $\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} = tg\gamma$ как тангенс наклона линейного участка графика к оси абсцисс (оси ΔT). В качестве $\Delta\varepsilon$ и ΔT для повышения точности рекомендуется брать максимально возможные приращения. Рекомендуется также воспользоваться методом наименьших квадратов (см. приложение).

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм возникновения контактной разности потенциалов.

2. От чего зависит величина внутренней контактной разности потенциалов?

3. Выведите формулу для величины контактной разности потенциалов, основываясь на представлениях классической электронной теории.

4. При каком условии появляется термоЭДС в цепи, состоящей из разнородных материалов? Что такое удельная термоЭДС?

5. Обоснуйте точность метода измерения ЭДС источника с помощью вольтметра.

6. Объясните применение термопар для измерения температуры. Приведите схемы включения термопар.

7. Объясните принцип работы экспериментальной учебной установки согласно схеме рис. 6.

Литература

1. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика / Д.В. Сивухин. – М., Наука, 1979. (§§ 5–6 – Виды термометров. Практическая температурная шкала. – С. 28–35.)

2. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М., Наука, 1976. (§ 19 – Измерение параметров состояния – С. 83–94)

3. Руководство к лабораторным занятиям по физике. (ред. Л.Л. Гольдин) – М., Наука, 1973. (Работа 6 – Градуирование термопары – стр. 65–71).

4. Физический практикум. (ред. В.И. Иверонова) – М., Гос. издательство физико-математической литературы, 1962. (Задача 25 – Изготовление и градуировка термопар – С. 142–145).

5. Практикум по общей физике, (ред. В.Ф. Ноздрев), М., Просвещение, 1971. (Работа 9 – Определение температуры кристаллизации сплава Вуда – С. 128–131).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА

Цель работы: изучение законов электролиза, экспериментальное определение электрохимического эквивалента, числа Фарадея, числа Авогадро.

В работе используются: сосуд с электролитом, реостат на 30 Ом, ключ, амперметр с пределом измерения 2А, источник напряжения 24 В.

Теоретическая часть

В одном моле любого вещества содержится одно и то же число частиц (молекул или атомов для веществ, состоящих из атомов), которое называется числом Авогадро.

Химический эквивалент A/z – безразмерная величина, численно равная массе данного элемента (в граммах), замещающей в химических соединениях 1,0078 г водорода (или, что-то же самое, 1/12 часть углерода).

Для одновалентного элемента химический эквивалент равен его атомному весу (безразмерно).

Атомный вес A – атомное число, выраженное в граммах или, иначе, это масса N_A частиц, содержащихся в одном моле данного вещества.

Валентность Z – число атомов водорода, которое замещает в химических соединениях один атом данного элемента.

Количество элемента, масса которого, выраженная в граммах, численно равна химическому эквиваленту A/z, называется грамм- эквивалентом.

Вещества, в которых при прохождении тока происходят химические превращения, называются электролитами. Носителями тока в электролитах служат ионы, на которые расщепляются молекулы растворенного вещества в растворителе (например, $NaCl$ в воде на ионы Na^+ и Cl^-). Этот процесс называется диссоциацией. Одновременно происходит обратный процесс объединения ионов в молекулы, называемый рекомбинацией. При пропускании тока через электролит происходит выделение на электродах составных частей электролита – это явление называется электролизом.

Например, медные электроды погружены в водный раствор медного купороса. Диссоциация протекает по схеме:

$$CuSO_4 \leftrightarrow Cu^{++} + SO_4^{--}$$

Ионы меди вступают в реакцию с материалом электрода, восстанавливаются до нейтрального атома Cu и осаждаются на электроде (каком?)

Первый закон Фарадея для электролиза был установлен экспериментально и утверждает, что количество выделившегося на электроде вещества пропорционально заряду, прошедшему через электролит:

$$M = K \cdot q \qquad (1)$$

где K – коэффициент, зависящий от природы вещества и называемый его электрохимическим эквивалентом. При $q = 1$ M – численно равна K. Следовательно, электрохимический эквивалент представляет собой массу ве-

щества, выделяющуюся на электроде при прохождении через электролит заряда, равного единице.

Второй закон Фарадея, так же экспериментальный, связывает электрохимический эквивалент вещества с его химическим эквивалентом. Второй закон гласит, что электрохимические эквиваленты всех веществ пропорциональны их химическим эквивалентам:

$$K = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{Z} \tag{2}$$

где $\frac{1}{F}$ – коэффициент пропорциональности, величина F – называется числом Фарадея, $\frac{A}{Z}$ – химический эквивалент.

Опытным путем установлено, что F = 96497 Кл/гр.экв. Подставив (2) в (1), мы объединим оба закона:

$$M = \frac{A \cdot q}{Z \cdot F} \tag{3}$$

При q, численно равном F, масса M – численно совпадает с величиной $\frac{A}{Z}$, заряд одного иона: $q = Z \cdot e$ e – заряд электрона.

Заряд всех одноименных ионов будет (n – число ионов в растворе):

$$q = n \cdot Z \cdot e \tag{4}$$

Масса вещества, переносимая ионами на электрод будет $M = m \cdot n$ (m – масса одного иона). Массу одного иона можно найти, зная атомную массу данного элемента A и число Авогадро N_A; $m = \frac{A}{N_A}$, тогда

$$M = n \cdot \frac{A}{N_A} \tag{5}$$

Воспользуемся формулой (3) для нахождения числа Фарадея

$$F = \frac{A \cdot q}{Z \cdot M} \tag{6}$$

Подставим вместо q выражение (4) и вместо M – выражение (5). Тогда:

$$F = e \cdot N_A \tag{7}$$

Законы Фарадея позволили найти число Авогадро. При этом было взято значение F, найденное из опытов по электролизу и значение заряда электрона, полученное из опытов Милликена:

$$N_A = \frac{F}{e}$$

Современное значение числа Авогадро: $N_A = 6{,}0220943 \cdot 10^{23}$ 1/моль, заряда электрона: $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Выполнение работы

1. Один из электродов очистить наждачной бумагой, чисто вытереть, взвесить, измерить площадь погружаемой части электрода.

2. Зарисовать схему последовательного включения электролитической ванны, амперметра, ключа и источника напряжения; показать схему преподавателю или лаборанту.

3. Поместить пластину-электрод в раствор, собрать цепь.

4. Рассчитать какой ток необходимо установить в цепи, если наилучшая плотность тока для покрытия пластины $j = 0{,}03 A/см^2$, а размеры пластины известны. К какому полюсу источника тока надо подключить взвешенную пластину?

5. Включить цепь, установить с помощью реостата ток, вычисленный Вами, пропускать ток 15 минут. Следить за постоянством тока.

6. Отключить схему, вынуть пластину, высушить, взвесить, найти приращение массы электрода: $M = M_2 - M_1$

7. Вычислить по формуле (1) электрохимический эквивалент, учитывая формулу, связывающую заряд и плотность тока.

8. По формуле (6) найти число Фарадея. Сравнить с табличным значением, найти погрешность измерения.

Контрольные вопросы

1. Объяснить механизм электропроводности электролитов.
2. Что такое диссоциация? Электролиз?
3. Закон Ома для электролитов.
4. Каков физический смысл электрохимического эквивалента?
5. Законы Фарадея. Химический эквивалент.
6. Физический смысл числа Фарадея.
7. Можно ли определить электрохимический эквивалент, если через электролит пропускать переменный ток?
8. Применение электролиза.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение……..……. 3
Лабораторная работа №1. Измерение токов. Изготовление шунта…… 15
Лабораторная работа №2. Резистор, конденсатор
и индуктивность в цепи переменного тока…… 18
Лабораторная работа №3. Изучение зависимости
сопротивления от температуры…….. 25
Лабораторная работа №4. Исследование сдвига фаз
в цепи переменного тока…….…… 29
Лабораторная работа №5. Измерение импеданса
электрической цепи переменного тока.
Проверка закона Ома для цепи переменного тока……..…… 39
Лабораторная работа №6. Изучение полупроводниковых
выпрямителей……...…… 55
Лабораторная работа №7. Изучение эффекта
холла и измерение индукции магнитного поля
с помощью датчика холла…….……..… 70
Лабораторная работа №8. Определение удельного
заряда электрона при помощи вольт-амперной
характеристики ненасыщенного вакуумного диода…… 76
Лабораторная работа №9. Измерение сопротивлений
при помощи моста постоянного тока……... 87
Лабораторная работа №10. Изучение электростатического поля.
Эквипотенциальные поверхности……. 91
Лабораторная работа №11. Градуировка термопары
и определение термо-эдс…….…….…….. 97
Лабораторная работа №12. Термоэлектричество
и эффект Зеебека…….……..…….. 106
Лабораторная работа №13. Определение электрохимического
эквивалента…….…. 116

Учебное издание

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Электричество

Методические указания
к лабораторным работам для студентов II–III курсов
физико-математического факультета

Авторы:
КОНЧАКОВ Роман Анатольевич, ХОНИК Виталий Александрович,
ГОЛЬДФАРБ Михаил Владимирович,
ПОМЕРАНЦЕВ Юрий Александрович, ШЕВЦОВ Сергей Васильевич,
ЕРЕМИН Владимир Сергеевич, НАСОНОВ Алексей Альбертович,
МОЧАЛОВА Валентина Ивановна

Изготовление оригинала-макета: *Ю.С. Топоркова*

Подписано в печать 15.03.2012. Формат $60\times84^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л.7,5.
Уч.-изд. л.7. Заказ 58. Тираж 80 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Воронежский государственный педагогический университет».

Отпечатано в типографии университета.
394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 86. Тел. (473) 2-55-58-32, 2-55-61-83.