Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по УР
А.М. Дигурова
«30» 10 2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Электричество и магнетизм (практикум)»

Направление 03.03.02 Физика

Профиль: " Физика конденсированного состояния "

Квалификация (степень) выпускника – бакалавр

Форма обучения – очная

(год начала подготовки 2017г.)

Владикавказ 2020

Программа составлена в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению **03.03.02 Физика,** утвержденным приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 07. 08. 2014 г. № 937, учебным планом подготовки бакалавра по направлению **03.03.02 Физика,** утвержденным Ученым советом ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова» от 30.04. 2020 г., протокол № 9.

Составитель: Елканова Т.М., доцент кафедры физики и астрономии

Рабочая программа обсуждена и утверждена на заседании кафедры физики и астрономии (протокол № 10 от 25 июня 2020 г.)

Зав.кафедрой_____А.М. Туриев

Одобрена Советом физико-технического факультета

(протокол №7 от «29» июня 2020 г.)

Председатель_____И.В. Тваури

1. Место дисциплины в структуре ОПОП.

Дисциплина «Электричество и магнетизм» (физпрактикум) относится к дисциплинам Блока 1 базовой части Б1.Б.8.3.

2. Объем дисциплины: 2 зачетные единицы.

3. Содержание дисциплины.

Задачи изучения дисциплины:

- применять теоретический материал курса общей физики к анализу конкретных физических ситуаций;
- экспериментально изучить основные физические закономерности, понимать границы их применимости;
- формировать умения самостоятельно приобретать и применять знания, объяснять физические явления; привить навыки самостоятельной работы
  по предмету;
- ознакомление с электроизмерительными приборами, научной аппаратурой,
  изучение принципов их работы;
- формирование экспериментальных умений;
- научить применять математические методы обработки результатов эксперимента (в том числе с применением ЭВМ), научить правильно представлять полученную экспериментальную информацию в виде графиков, таблиц.

Содержание дисциплины

Тема № 1. **Изучение электроизмерительных приборов**.

Лабораторная работа №1. Шунтирование гальванометра.

Лабораторная работа №2. Градуирование амперметра и вольтметра .

Лабораторная работа №3. Изучение электронного осциллографа

Тема №2. **Электростатика.**

Лабораторная работа № 5. Исследование электростатического поля.

Лабораторная работа №6. Определение емкости конденсатора с помощью моста Сотти.

Лабораторная работа №8. Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков

Тема №3. **Изучение электронных и ионных явлений в различных средах**.

Лабораторная работа №9. Экспериментальная проверка закона Ома.

Лабораторная работа №10. Изучение зависимости сопротивления металлов и электролитов от температуры.

Лабораторная работа №11. Изучение эффекта Пельтье.

Лабораторная работа №12. Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла

Лабораторная работа №13. Изучение вольтамперной характеристики газонаполненной лампы

Тема № 4. **Методы исследования магнитного поля и магнитных материалов**

Лабораторная работа №14. Изучение магнитного поля соленоида с помощью измерительной катушки.

Лабораторная работа №15. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

Лабораторная работа №16. Определение точки Кюри ферромагнетиков индукционным методом

Лабораторная работа №18. Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов

Тема №5. **Изучение электромагнитных колебаний**.

Лабораторная работа № 19. Изучение процессов заряда и разряда конденсатора

Лабораторная работа №20. Исследование затухающих колебаний в колебательном контуре

Лабораторная работа №21. Изучение вынужденных колебаний в колебательном контуре

Лабораторная работа №22. Изучение электрических колебаний в связанных контурах

Лабораторная работа №23. Изучение однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей

Тема №6. **Исследование цепей переменного тока**.

Лабораторная работа №24. Измерение коэффициента самоиндукции, емкости и проверка закона Ома для цепи переменного тока

Лабораторная работа №25. Измерение мощности переменного тока и сдвига фаз между током и напряжением

Лабораторная работа №26. Определение частоты переменного тока.

Лабораторная работа №27. Изучение электрических процессов в простых линейных цепях при действии гармонической электродвижущей силы.

Лабораторная работа №28. Изучение явления взаимной индукции.

4. Планируемые результаты обучения по дисциплине.

В результате освоения дисциплины студенты должны овладеть следующими **навыками:**

- при работе в лабораторном практикуме строго соблюдать правила охраны труда и технику безопасности;
- самостоятельно добывать необходимые знания, работая с учебной и справочной литературой;
- владеть основными приемами выполнения эксперимента в практикуме;
- четко и последовательно формулировать и решать поставленные перед ними задачи, как теоретического, так и прикладного характера.

5. Форма контроля: зачет.

Методические указания по подготовке к лабораторным работам

Переход российской системы образования к ГОС ВПО третьего поколения означает перестройку образовательной политики и практики работы учебных заведений профессионального образования в соответствии с компетентностным и студентоцентрированным подходами. Компетентностный подход означает создание условий для овладения комплексом компетенций, означающих потенциал, способность выпускника к выживанию и устойчивой жизнедеятельности в условиях современного многофакторного пространства. Такой подход выдвигает на первое место не информированность студента, а умение решать проблемы, возникающие в познании и

объяснении явлений действительности, и предполагает необходимость: развития способности решать задачи на основе знаний, опыта, мотивации и ценностных ориентаций, умения самостоятельно добывать необходимые знания; формирования навыков самостоятельной постановки целей деятельности и планирования способов их достижения, что подразумевает развитие творческой самостоятельности и познавательной активности студентов. Физический практикум может служить одним из средств формирования у студентов общепрофессиональных, специальных и гуманитарно-ориентированных компетенций, способствуя развитию навыков комплексного подхода к изучению физических процессов и явлений и формированию целостного и научного представления о процессах и явлениях, происходящих в мире природы и общества.

Подготовка студента к выполнению лабораторной работы начинается с

самостоятельного выполнения «**базис-конспекта**», который включает в себя:

1. Краткое описание цели работы, возможных способов достижения этой цели и опенку выбранного способа.
2. Описание физической сущности метода, лежащего в основе выполненного в лабораторной работе исследования.
3. Перечень измерительных приборов, необходимых для выполнения лабораторной работы, с указанием типа и пределов измерения приборов (составляется по условию и требованию экспериментальной задачи); правила техники безопасности при работе с выбранными приборами.
4. Очень краткие ответы на вопросы по теоретическому материалу, в обязательном порядке содержащие определения изучаемых в работе физических величин с указанием единиц измерения.
5. Указание областей науки, техники, окружающей действительности, в которых встречаются и применяются изучаемые в работе явления, краткий анализ их теоретического и практического значения с указанием важных в выбранной студентом профессии аспектов.
6. Описание математических методов обработки полученных в работе результатов, перечень таблиц (с указанием измеряемых и рассчитываемых по результатам измерений величин), графиков, расчетных формул.
7. Прогноз ожидаемых результатов, составленный на основе теоретического обоснования работы.

После выполнения лабораторной работы составляется письменный отчет в соответствии с приведенным ниже эвристическим предписанием**.**

Оформление отчета по лабораторной работе

1. Оформление результатов лабораторной работы начинается с записи даты проведения эксперимента и его названия.
2. Далее следует конкретизировать цель эксперимента.

3. Необходимо привести перечень использованных приборов и принадлежностей с указанием марок и технических характеристик (типа приборов, класса точности, пределов измерений и т. д.).
4. Перед тем, как приступить к опыту, необходимо подготовить таблицу для записи результатов измерений и вычислений.
5. Численные величины с точным указанием единиц измерения после их нахождения должны быть занесены в заранее подготовленную таблицу. Без единиц измерения результат бесцелен.
6. В записях, насколько это возможно, должны использоваться схемы установок, схематические рисунки приборов и установок в действии.
7. Где это целесообразно, результаты должны быть представлены в виде графиков. Ценность графического изображения состоит в том, что он уменьшает возможность появления грубой ошибки и позволяет лучше осмыслить физическую сущность полученных результатов в целом.
8. Необходимо привести в отчете пример расчета измеряемой величины, программы и результаты расчета погрешностей измерений.
9. Записи, вычисления, графики, таблицы, схемы должны выполняться так, чтобы другим было понятно, с какой целью это было сделано, как сделано и что из этого получилось.
10. Конечный результат с рассчитанной погрешностью необходимо проанализировать: правдоподобен ли он? Не противоречит ли он физическому смыслу? Правильны ли единицы измерения конечного результата? Нельзя ли конечный результат сравнить с какими-либо константами, справочными данными?
11. Последним пунктом отчета являются выводы. Выводы по работе должны содержать то новое, что студенты узнали во время выполнения работы; сопоставление теоретических предсказаний и экспериментальных результатов; анализ факторов, влияющих на расхождение между теоретическими и экспериментальными данными; критические замечания и предложения по методике работы, соображения по обоснованности применяемых методов и достоверности результатов.

При подготовке и выполнении лабораторных работ рекомендуем использовать приведенные ниже эвристические предписания общего и частного характера.

I. **Как правильно наблюдать и описывать наблюдаемые явления, процессы**

1. Осмыслите цель наблюдения, а для этого поставьте перед собой вопрос: для чего проводится наблюдение?
2. Уточните предмет наблюдения. В связи с этим поставьте перед собой вопрос: что будете наблюдать?
3. Наблюдение осуществляйте по заранее разработанному плану. Для этого представьте его мысленно или запишите предварительно в тетради.

4. До начала наблюдения определите, когда будете осуществлять фиксацию наблюдаемых явлений: в процессе наблюдения или сразу же после его окончания.
5. Выберите способ наблюдения; наблюдать можно прямым способом, т. е. визуально, или косвенным способом, т. е. при помощи приборов (фотоаппарата, магнитофона и т. д.).
6. Наблюдение, как и эксперимент, необходимо проводить несколько раз; это повышает его объективность.
7. При описании явлений, процессов обращайте внимание не только на то, как они протекали во времени, но и при каких условиях.
8. Помните, что цель описания — указать наиболее точно и полно признаки наблюдаемых явлений, предметов.
9. При описании результатов наблюдений обратите внимание на то, что существенно нового было обнаружено и что общего, сходного с ранее известным.
10. Описание наблюдаемых явлений, процессов может быть выражено в словесной форме, представлено аналитически — в виде формул и уравнений, графически — в виде рисунков, схем и т. д.

II. **Как составлять план проведения эксперимента**

1. Уточните и конкретизируйте конечную цель проведения эксперимента. Для этого еще раз осмыслите условие и требование задания. Поставьте перед собой вопросы: что дано? Что нужно экспериментально проверить, получить? Каковы возможные условия выполнения эксперимента?
2. Вычлените промежуточные цели проведения эксперимента. Для этого мысленно разбейте задачу на подзадачи.
3. Мысленно представьте все возможные варианты проведения эксперимента.
4. Выберите из всех возможных вариантов проведения эксперимента наиболее рациональные с точки зрения возможности получить наиболее точный результат при использовании минимума приборов и материалов, с точки зрения минимальной затраты времени.
5. Запись плана эксперимента должна быть по возможности краткой, отражающей лишь основные его этапы.
6. Предусмотрите, какие таблицы, рисунки, схемы вам необходимо будет выполнить в процессе эксперимента.
7. Продумайте, когда и что вам придется измерить в процессе эксперимента, а что можно вычислить после его выполнения.
8. Продумайте и предусмотрите в плане, какие приемы и средства могут быть вами использованы.
9. После составления плана проанализируйте его еще раз. Для этого представьте себе мысленно работу от начала до конца; от конца к началу.

10. Помните, что хорошо составленный план должен обладать и определенной гибкостью, т. е. возможностью определенной перестройки ваших действий в случае возникновения затруднения.

III. **Как подобрать приборы и материалы, необходимые для эксперимента**

1. Вначале, насколько это возможно, определите по условию и требованию экспериментальной задачи, какие приборы и материалы потребуются. Составьте их предварительный перечень.
2. Затем уточните этот перечень, проанализируйте схему установки и условия ее работы; уточните все этапы выполнения плана предстоящего эксперимента, все то, что предстоит наблюдать и измерять.
3. Для того, чтобы окончательно установить правильность выбранного прибора, необходимо с целями и условиями эксперимента соотнести: название прибора; назначение прибора; принцип действия прибора; предел измерения прибора; цену деления шкалы прибора; правила пользования прибором; условия эксплуатации прибора; правила техники безопасности при работе с прибором.
4. Для того, чтобы окончательно установить правильность выбранного материала, необходимо соотнести с целями и условиями эксперимента: название материала; назначение материала; основные физические и химические свойства материала; допустимые пределы изменения основных свойств материала; условия, в которых данным материал может быть использован; правила техники безопасности при работе с материалом.

IV. **Как собрать установку, схему для проведения эксперимента**

1. Приборы следую располагать так, чтобы ни один из них не перекрывал видимость и доступ к другому.
2. При расстановке приборов предусмотрите, чтобы одни приборы не влияли на работу других.
3. Учтите, что не все приборы могут быть установлены горизонтально, для некоторых рабочим состоянием является вертикальное положение.
4. Прежде чем приступить к сборке установки, схемы, проанализируйте и представьте ее мысленно в эксперименте, уточните, что необходимо наблюдать и измерять.
5. Шкала приборов и те участки установки, где вы проводите наблюдения за соответствующими физическими явлениями, должны находиться в поле лучшей видимости.
6. Используйте, где это возможно, вспомогательные приспособления: подставки, зажимы, прокладки, пинцеты, стрелки-указатели, фиксаторы и т. д.
7. После того, как приборы размещены, проверьте по возможности действие каждого прибора в отдельности.

8. После этого следует произвести настройку установки и проверить ее работу в целом
9. Все операции по сборке и использованию установки в работе должны проводиться в строгом соответствии с правилами техники безопасности.

V. **Как пользоваться измерительными приборами в процессе эксперимента**

1. Прежде чем использовать прибор в процессе эксперимента, познакомьтесь с его описанием, назначением и паспортными данными и по условным обозначениям на шкале определите систему прибора и его характеристики.
2. Непосредственно перед использованием прибора сравните допустимый предел измерения с максимально возможными значениями измеряемой величины.
3. Уточните цену деления шкалы прибора и убедитесь, что она соответствует точности измерения в проводимом измерении. Чтобы определить цену деления шкалы прибора, необходимо взять разность между двумя значениями шкалы и разделить ее на число делений, содержащихся между этими значениями.
4. Определите класс точности прибора и вычислите наибольшую погрешность, допускаемую прибором.
5. Расположите и установите прибор, учитывая особенности его конструкции и назначения, непосредственно перед его использованием в эксперименте.
6. При отсчете показаний прибора глаз располагайте против наблюдаемого деления, а луч зрения наблюдателя должен быть перпендикулярен плоскости шкалы прибора.
7. При записи результатов измерения сразу же запишите единицы измерения.
8. Проведите измерение одной и той же величины по возможности несколько раз.

VI. **На что следует обращать внимание при построении и чтении графиков**

1. Связь каких величин представляется на графике?
2. В каких единицах измерения указаны значения физических величин?
3. В каких пределах изменяются аргумент и функция?
4. Какой масштаб применен на осях координат?
5. Необходимо учитывать разброс экспериментальных точек, являющихся результатом приближенного характера данных, полученных в ходе измерения физических величин.
6. Каков характер функциональной зависимости, представленной графически?
7. Какие специфические особенности рассматриваемой функциональной зависимости вы можете отметить?
8. Можно ли подобрать аналитическое выражение, описывающее полученную функциональную зависимость?
9. Каков физический смысл как отдельных участков, так и всего графика в целом?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Калашников С. Г. Электричество: Учебное пособие. – М.: Физматлит, 2004. – 624 с.
2. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм: Учебное пособие. М.: Мир и образование, 2005. – 464 стр.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учебное пособие. Т. 3. Электричество. – Санкт-Петербург: Лань, М.: Физматлит, 2004. – 656 с.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 5. Электричество и магнетизм. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 304 с.
5. Иродов И. Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. - 320 с.
6. Бурсиан Э. В. Физические приборы: Учебное пособие. - М.: Просвещение, 1984.- 271 с.
7. Елканова Т. М. Практикум по курсу «Электричество и магнетизм»: Учебное пособие. Допущено УМО по классическому университетскому образованию РФ в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 010700.62 – Физика. - Владикавказ: СОГУ, 2010. – 252 с.
8. Елканова Т.М. Электростатика: задачи, тесты, вопросы: Учебное пособие. – Допущено УМО по классическому университетскому образованию РФ в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки ВО 03.03.02 – Физика. – Владикавказ: изд-во СОГУ, 2015. – 267 с.
9. Елканова Т.М. Практикум по курсу «Электричество и магнетизм» Учебное пособие. Изд-е 2-е, перер. и доп. – Допущено УМО по классическому университетскому образованию РФ в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 010700.62 – Физика. – Владикавказ: изд-во СОГУ, 2014. – 258 с.

Дополнительная

1. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат, 1978. – 231 с.
2. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. – М.: Мир, 1980. – 208 с.
3. Котур В. И. и др. Электрические измерения и электроизмерительные приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Парселл Э. Электричество и магнетизм: Учебное руководство/Пер. с англ. – Санкт-Петербург: Лань, 2005. (Берклеевский курс физики). – 416 с.

5. Савельев Н.В. Общий курс физики: Учебное пособие. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – Санкт-Петербург: Лань, 2007. – 496 с.
6. Сквайрс Дж. Практическая физика. – М.: Мир, 1971. – 246 с.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Физматлит, 1996. - 624 с.

Тема № 1.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Литература

[P1], §§24 – 34, 40.

[P3], §§ 70, 188.

[P7], [P9], [P10], [P14], [P15].

Вопросы по теоретическому материалу

1. Классификация электроизмерительных приборов по принципу действия. Условные обозначения систем приборов. Варианты оформления шкал и указателей, обозначения на шкалах.
2. Класс точности.
3. Принцип действия и устройство приборов магнитоэлектрической системы.
4. Принцип действия и устройство приборов электромагнитной системы.
5. Принцип действия и устройство приборов электродинамической системы.
6. Принцип действия и устройство ваттметра.
7. Принцип действия и устройство баллистического гальванометра.
8. Принцип действия и устройство электронного осциллографа.
9. Изменение пределов шкалы электроизмерительного прибора. Шунтирование амперметра. Изменение пределов шкалы вольтметра.
10. Принцип действия генератора развертки.
11. Фигуры Лиссажу.
12. Погрешности измерений и их типы. Систематические погрешности измерений.
13. Обработка результатов прямых измерений.
14. Расчет погрешностей при косвенных измерениях.
15. Способы учета систематических и случайных погрешностей измерений.

Качественные вопросы

1. Какие свойства тока и для создания каких измерительных приборов используются?
2. Объясните выражение: «Вольтметр есть переградуированный амперметр».
3. Что изменилось в цепи, если включенный параллельно внешней цепи вольтметр показал уменьшение напряжения?
4. Что происходило бы со стрелкой электрометра, если бы ось вращения проходила через центр тяжести стрелки?
5. Почему подключение последовательно с вольтметром добавочного сопротивления снижает чувствительность вольтметра?
6. Могут ли изменения температуры влиять на показания амперметра и вольтметра?
7. Что такое гальванометр и чем он отличается от амперметра?
8. Верно ли утверждение, что вольтметр, подключенный к клеммам разомкнутого источника, показывает э.д.с.?
9. У очень чувствительного гальванометра при разомкнутой цепи обнаружен следующий эффект. Если поднести к одному из концов обмотки гальванометра заряженное тело, то гальванометр дает отброс. Если же подвести это тело к другому концу обмотки, то отброс получается в ту же сторону. Как объяснить это явление?
10. Во время работы с очень чувствительным гальванометром экспериментатор, сидящий на стуле у стола, обнаружил любопытное явление (гальванометр был прикреплен на стене, а концы его обмотки подведены к разомкнутому ключу, расположенному на столе). Привстав со стула и коснувшись стола рукой, экспериментатор наблюдал заметный отброс гальванометра. Если же экспериментатор касался стола, сидя на стуле, то отброса не наблюдалось. Точно так же зайчик гальванометра не смещался и в том случае, когда экспериментатор касался стола, не садясь предварительно на стул. Как можно объяснить это явление?
11. Амперметр постоянного тока и тепловой амперметр переменного тока включены в цепь последовательно. Когда по цепи пропускают постоянный ток, амперметр постоянного тока показывает I_1 = 6 А. Когда по цепи пропускают переменный синусоидальный ток, амперметр переменного тока показывает I_2 = 8 А. Что покажет каждый из амперметров, если по цепи одновременно пропускают и постоянный, и переменный токи?
12. Если к вольтметру присоединить некоторое добавочное сопротивление, пределы измерения прибора возрастают в m раз. Другое добавочное сопротивление увеличивает пределы измерения в n раз. Во сколько раз увеличится предел измерения вольтметра, если оба эти сопротивления соединить между собой параллельно и затем подключить к вольтметру последовательно?
13. Зачем корпус электрометра делают металлическим и заземляют?

14. Можно ли измерить потенциал проводника, соединив его с корпусом электрометра, установленного на изолирующей подставке, а стержень и стрелку электрометра – с землей?
15. Что покажет электрометр, если пробный шарик, соединенный длинным проводником с электрометром, перемещать по поверхности наэлектризованного проводника произвольной формы?
16. Что положено в основу устройства электростатической защиты?
17. С какой целью на корпусы некоторых радиоламп надевают металлические колпачки?
18. Всегда ли электрический ток производит тепловое действие?
19. Всегда ли электрический ток производит химическое действие?
20. Всегда ли электрический ток создает магнитное поле?
21. Гальвани в процессе своих экспериментов с лягушками пришел к идее использовать "физиологический препарат" - лапки лягушки - в качестве измерителя количества электричества. Некоторое время подобный физиологический индикатор использовался даже крупными физиками, в частности, Георгом Омом. А что служило мерой количества электричества в подобном приборе? Иначе говоря, какие измеряемые характеристики предлагалось считать пропорциональными величине электрического заряда и силе тока?

Как вы думаете

1. Какова роль приборов в изучении физических явлений?
2. С чем связан тот факт, что многие приборы, используемые в физических исследованиях, вносят искажения в изучаемые явления (например, амперметр, вольтметр)?
3. Можно ли в принципе сделать влияние измерительного прибора на исследуемый объект сколь угодно малым?
4. Какая разница между физическим экспериментом и техническим измерением?
5. Зависят ли физические процессы и явления от условий их наблюдения и измерения?
6. Для чего в науке необходима точность измерений?
7. Какие основные моменты включает в себя процесс измерения?
8. Определение массы, температуры, промежутков времени, длин и ряда других физических величин называют операциональным. Что это означает?
9. Не мешает ли возмущающая роль прибора правильно познавать мир?
10. Какие основные моменты включает в себя процесс измерения?
11. Какой характер имеет связь между измерительной аппаратурой и состоянием системы — статистический или динамический?
12. Чем обусловлено существование ошибок измерений?

13. Можно ли сказать, что каждому точно определенному состоянию измерительной аппаратуры соответствует одно строго фиксированное состояние исследуемой системы?
14. Можно ли считать измерение единственной основой научного познания?
15. Является ли существование погрешностей измерения электрических величин неизбежным?

Проверь себя!

1. Принцип действия приборов электромагнитной системы основан:
   a) на взаимодействии двух катушек с током (подвижной и неподвижной);
   b) на взаимодействии ферромагнитного сердечника с магнитным полем, создаваемым катушкой с током;
   c) на взаимодействии рамки, обтекаемой током, с магнитным полем постоянного магнита.

2. Проградуировать какой-либо измерительный прибор - это значит:
   a) установить соответствие между делениями его шкалы и значениями величины, отсчитываемой по этой шкале;
   b) определить цену деления школы прибора;
   c) определить класс точности прибора.

3. Основной приведенной погрешностью называется отношение:
   a) абсолютной погрешности к наибольшему для данного прибора значению измеряемой величины при нормальных внешних условиях;
   b) абсолютной погрешности к наибольшему для данного прибора значению измеряемой величины при максимально допустимой температуре:
   c) относительной погрешности к наибольшему для данного прибора значению измеряемой величины при нормальных внешних условиях.

4. Наиболее устойчивы к механическим перегрузкам и перегрузкам током приборы:
   a) электромагнитной системы;
   b) электродинамической системы;
   c) магнитоэлектрической системы.

5. Наименее чувствительны к влиянию внешних магнитных полей приборы:

a) магнитоэлектрической системы;
b) электромагнитной системы;
c) электродинамической системы.

6. Техника проверки технических приборов по контрольным заключается в непосредственном сравнении показаний проверяемых приборов с отсчетами по аналогичным приборам:
   a) такого же принципа действия и такого же класса точности;
   b) такого же класса точности, но имеющих другой принцип действия;
   c) более высокого класса точности, независимо от принципа действия.

7. Принцип действия ваттметра основан:
   a) на взаимодействии двух катушек с током (подвижной и неподвижной);
   b) на взаимодействии ферромагнитного сердечника с магнитным полем, создаваемым катушкой с током;
   c) на взаимодействии рамки, обтекаемой током, с магнитным полем постоянного магнита.

Лабораторная работа №1

ШУНТИРОВАНИЕ ГАЛЬВАНОМЕТРА

Цель работы: знакомство с одним из методов расширения пределов шкалы гальванометра.

Приборы и принадлежности: гальванометр; два магазина сопротивлений; два реостата; источник постоянного тока; ключи.

Описание экспериментальной установки

Пользуясь правилами расчета разветвленных цепей тока, можно показать, что для понижения чувствительности гальванометра в *n* раз нужно подключить к нему шунт с сопротивлением

$$R_ш = \frac{R_G}{n-1} \qquad (1)$$

где R_G — сопротивление гальванометра.

Соотношение (1) показывает, что для расчета шунта, понижающего чувствительность гальванометра в *n* раз, нужно знать сопротивление последнего. Измерить сопротивление гальванометра можно методом мостика сопротивлений при постоянном токе, с изменением расположения некоторых его частей.

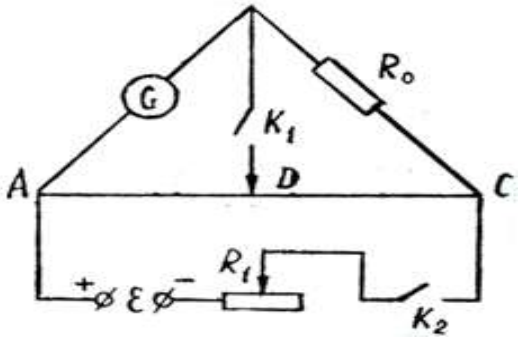

Рис. 1.

Собираем электрическую цепь по схеме рис. 1, где G — гальванометр, сопротивление которого нужно определить, R_0 — магазин сопротивлений, AB — реохорд, R_1 — реостат (1000 Ом), который вводится для предохранения гальванометра от больших токов, ε - источник тока, K_1 и K_2 -- ключи.

При равенстве потенциалов точек C и D замыкание ключа K_1 будет вызывать изменение показаний гальванометра. В этом случае для мостика при постоянном токе имеет место формула

$$R_G = R_0 \frac{l_1}{l_2} \qquad (2)$$

Проверить правильность расчета шунта можно по схеме, изображенной на рис. 2. Здесь в качестве $R_ш$ используется магазин сопротивлений. Сопротивление R_3 вводится для предохранения гальванометра от больших токов.

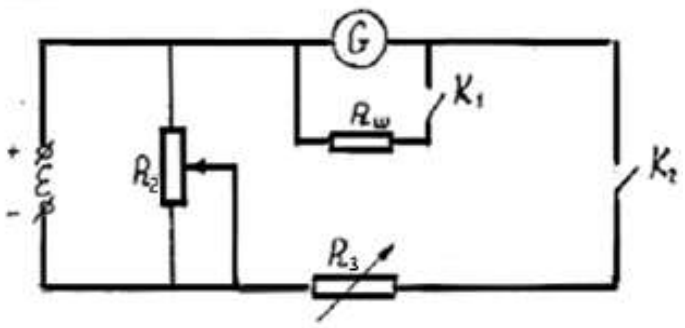

Рис. 2.

Измерения и их обработка

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 1.).
2. Полностью ввести сопротивление реостата R_1.
3. Включить магазин сопротивлений R_0.
4. Движок мостика D поставить на середину струны.
5. Замкнуть ключ K_2 и изменить введенное сопротивление реостата настолько, чтобы стрелка гальванометра отклонилась на середину шкалы.
6. Замкнуть ключ K_1 и, постепенно изменяя сопротивление магазина R_0, добиться возможно малого изменения отклонения стрелки гальванометра при замыкании ключа K_1.
7. Так как сопротивление магазина изменяется скачками, то при сопротивлении магазина, давшем наименьшее отклонение стрелки гальванометра от первоначального положения, передвигать движок на реохорде до тех пор, пока ток в гальванометре перестанет зависеть от замыкания и размыкания ключа K_1.
8. Отсчитать длину плеч l_1 и l_2, подсчитать по формуле (2) сопротивление гальванометра.
9. Изменить (увеличить, уменьшить) сопротивление магазина R_0 на 3—5 Ом и, перемещая движок D, добиваться постоянства тока в гальванометре при замыкании и размыкании ключа K_1.
10. Повторить измерения п.п. 5-9 10 раз.
11. Из 10 измерений найти среднее значение измеряемого сопротивления R_G.
12. Рассчитать величину сопротивления шунта $R_ш$ по формуле (1), приняв n = 2.
13. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 2).
14. Замкнуть ключ K_2 и установить ток в цепи, допустимый нешунтированным гальванометром.
15. Подключить к гальванометру G шунт.
16. Сравнить показания гальванометра без шунта и с шунтом.
17. Повторить измерения п.п. 14—16 несколько раз при разных токах через гальванометр.
18. Повторить измерения п.п. 12—17 при других значениях n.

19. Произвести математическую обработку результатов измерений. Результаты измерений и расчетов занести в таблицы.

Лабораторная работа № 2.

ГРАДУИРОВАНИЕ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Цель работы: ознакомление с методикой проверки амперметра и вольтметра, измерение их сопротивления и потребляемой мощности.

Приборы и принадлежности: ЛАТР; проверяемый и контрольный вольтметры; проверяемый и контрольный амперметры; миллиамперметр; милливольтметр; ключи.

При проверке обычно определяются: абсолютные погрешности, поправки к показаниям приборов, приведенная погрешность и собственное потребление мощности приборов при полном отклонении стрелки. Техника проверки технических приборов по контрольным заключается в непосредственном сравнении показаний проверяемых приборов с отсчетами по аналогичным приборам более высокого класса точности (не менее 0,5), принимаемым в качестве образцовых. При производстве проверки следует регулировать измеряемую приборами величину (напряжение или ток), чтобы стрелка проверяемого прибора в момент измерения находилась строго против деления шкалы. Число проверяемых точек берут от 5 до 10 в зависимости от степени равномерности шкалы приборов. При проверке при постоянном токе в качестве образцовых приборов используются приборы магнитоэлектрической или электромагнитной системы. Сопротивление обмотки проверяемого вольтметра и потребляемая мощность при полном отклонении находятся из соотношений:

$$R_V = U_V/I_V; \quad P_V = U_m I_{Vm};$$

где U_m - наибольшее напряжение, измеряемое проверяемым вольтметром, с учетом поправки к его показанию при полном отклонении стрелки, I_{Vm} - ток, потребляемый обметкой вольтметра при полном отклонении стрелки.

Аналогичные величины для проверяемого амперметра определяются по формулам:

$$R_A = U_A/I_A; \quad P_A = U_{Am} I_m;$$

где I_m - наибольший ток, измеренный проверяемым амперметром с учетом поправки к его показанию при полном отклонении стрелки.

Упражнение 1. **Проверка вольтметра**

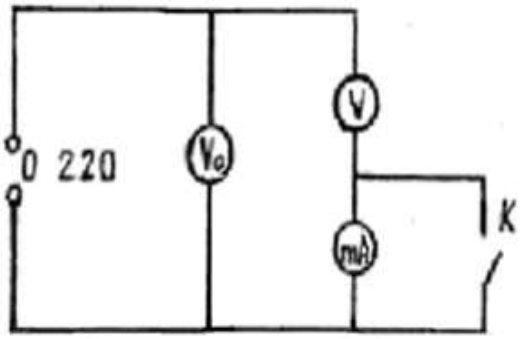

Рис. 3.

1. Собрать цепь по схеме (рис. 3), замкнуть ключ К**,** поставить ползунок делителя (потенциометра) в положение, отвечающее наименьшему значению напряжения U*,* подводимого к вольтметру, и после проверки схемы руководителем включить источник питания.
2. Передвигая ползунок делителя напряжения, добиться полного отклонения стрелки проверяемого вольтметра, затем при этом режиме прогреть приборы током в течение 15 мин.
3. После прогрева выключить установку, регулировочными винтами установить обе стрелки приборов на нулевое деление шкал и приступить к проверке вольтметра, как описано выше.
4. При проверке постоянно повышать напряжение от нуля до значения, соответствующего полному отклонению стрелки проверяемого прибора, а затем производить измерения при непрерывном понижении напряжения до нуля.
5. При производстве опыта следует, чтобы к моменту отсчета, который нужно производить одновременно по обоим приборам, стрелка проверяемого прибора находилась строго против деления шкалы.
6. Взять десять проверяемых точек. Результаты измерений занести в таблицу.
7. Разомкнуть ключ, установить ползунком делителя такое напряжение, при котором стрелка проверяемого вольтметра устанавливается на конечном делении шкалы, и записать показания приборов.
8. Рассчитать сопротивление обмотки проверяемого вольтметра и потребляемую мощность при полном отклонении.
9. Составить перечень аппаратуры, использованной при опыте, с приведением всех технических данных.

Упражнение 2. **Проверка амперметра**

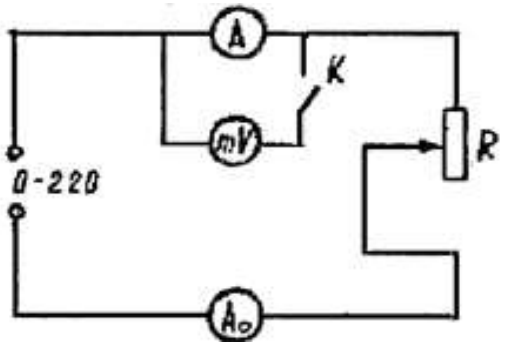

Рис. 4.

1. Собрать схему (рис. 4), выключить ключ К, поставить ползунок регулировочного реостата R в положение, отвечающее его наибольшему сопротивлению, и после проверки схемы руководителем включить источник питания.
2. Постепенно уменьшая сопротивление регулировочного ползункового реостата, добиться полного отклонения стрелки проверяемого амперметра А, а затем в течение 15 минут прогреть приборы током.
3. После прогрева установки регулировочными винтами установить обе стрелки на нулевое деление шкалы и приступить к проверке амперметра. Отсчеты при этом берутся так же, как и в случае проверки вольтметра.
4. При производстве опыта следует, чтобы к моменту отсчета, который нужно производить одновременно по обоим приборам, стрелка проверяемого прибора находилась строго против деления шкалы.
5. Взять десять проверяемых точек. Результаты измерений занести в таблицу
6. Замкнуть ключ К, установить реостатами ток, при котором стрелка проверяемого амперметра А установилась бы на конечном делении шкалы, и записать показания приборов.
7. Составить перечень аппаратуры, использованной при проверке амперметра, с приведением всех ее технических данных.

Обработка результатов испытаний

1. Рассчитать для всех произведенных опытов абсолютные погрешности ΔU и ΔI и поправки к показаниям приборов; результаты объединить с данными наблюдений в таблицы.
2. Построить в одной координатной системе зависимости $U_0 = f(U)$ и $\Delta U = f(U)$, а в другой $I_0 = f(I)$ и $\Delta I = f(I)$ и по ним найти истинные значении напряжения U_{Vm} и силы тока I_{Am} проверяемых приборов при полном отклонении стрелок.
3. Определить наибольшие приведенные погрешности γ_V и γ_A проверяемых приборов и дать заключение о возможности их дальнейшей эксплуатации.
4. Вычислить величины сопротивлений обмоток r_V, r_A проверяемых вольтметра и амперметра.
5. Вычислить собственное потребление мощности P_V и P_A при полном отклонении стрелок

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА [35]

Цель работы: ознакомление с устройством и работой электронного осциллографа.

Приборы и принадлежности: электронный осциллограф PO; звуковой генератор PQ; преобразователь импульсов ПИ (модуль ФПЭ-08); источник питания ИП; выпрямитель, собранный на мостовой схеме на плоскостных диодах.

Описание экспериментальной установки

Для изучения электронного осциллографа используется звуковой генератор PQ , а также преобразователь импульсов ПИ. Напряжение питания на преобразователь импульсов поступает от источника питания ИП (рис. 5). Преобразователь импульсов преобразует синусоидальное напряжение звукового генератора в прямоугольные импульсы той же частоты.

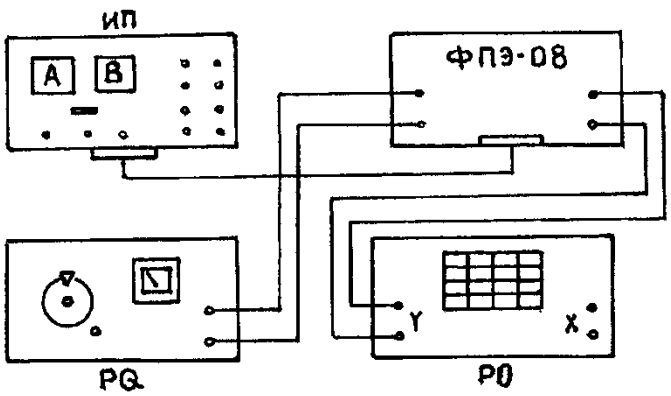

Рис. 5.

Скважность импульсов регулируется кнопкой "скважность - грубо" и ручкой "скважность-точно". Для надежной работы ПИ напряжение, поступающее на ПИ с звукового генератора, должно составлять 2-3 В.

Измерения и их обработка

Упражнение 1. **Исследование синусоидального сигнала звукового генератора.**

1. Ознакомиться с описанием используемых приборов.
2. Включить осциллограф в сеть и настроить его.
3. Подать напряжение от звукового генератора на вход Y осциллографа и получить на экране устойчивое изображение нескольких периодов сигнала.
4. Измерить период сигнала и рассчитать его частоту.
5. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1.

№ п/п	Период сигнала в делениях	Период сигнала в секундах	Частота сигнала	Показания PQ

6. Повторить измерение частоты сигнала звукового генератора на трех-четырех различных частотах.
7. При любой частоте сигнала звукового генератора установить его наибольший вертикальный размер в пределах рабочей части экрана.
8. Измерить амплитуду сигнала.
9. Сравнить полученный результат с показанием вольтметра звукового генератора (учтите, что показания вольтметра генератора соответствует эффективному значению).

Упражнение 2. **Исследование импульсного сигнала**

1. Собрать схему, изображенную на рис. 5.
2. Подобрав достаточное усиление и частоту развертки на осциллографе, получить устойчивую картину прямоугольных импульсов на экране и зарисовать ее.
3. Измерить период T и длительность τ прямоугольного импульса скважность импульса Q=T/ τ (рис.6).
4. Результаты занести в таблицу.
5. Повторить измерение периода импульса, его длительности и скважности при других частотах звукового генератора.

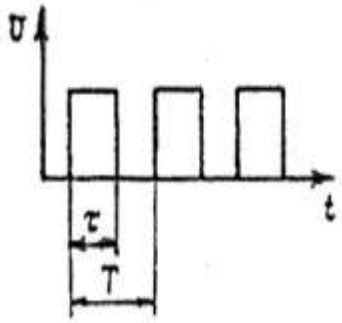

Рис. 6.

Упражнение 3. **Наблюдение фигур Лиссажу при сложении колебаний, происходящих в двух взаимно перпендикулярных направлениях.**

При подаче синусоидальных напряжений одновременно на горизонтальные и вертикальные пластины трубки осциллографа луч будет находиться под действием двух взаимно перпендикулярных отклоняющих сил. В зависимости от амплитуды, частоты и фазы подаваемых напряжений на экране осциллографа будут получаться различные фигуры Лиссажу.

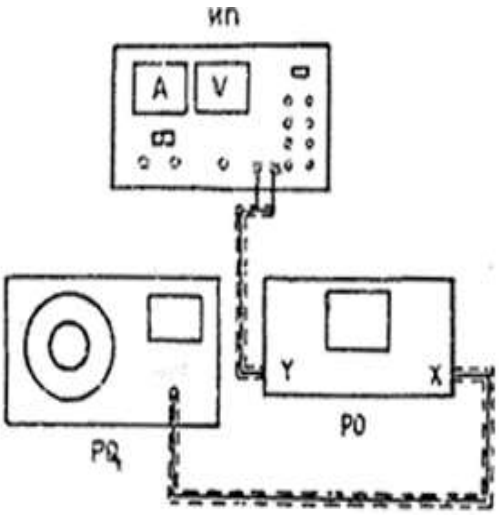

Рис.7.

1. Собрать схему, изображенную на рис.7.
2. Изменяя частоту сигнала звукового генератора, получить и зарисовать фигуру Лиссажу при соотношении частот 1:1; 1:2; 1:3; 1:4.
3. Соотношение частот можно определить как по шкале генератора, так и по виду фигуры. Отношение частот колебаний равно отношению числа касаний фигуры с прямой параллельной оси X и с прямой, параллельной оси Y.
4. Результаты измерений и рисунки поместить в таблицу.2.

Таблица 2.

Частота	Соотношение частот, определенное по виду фигуры	Вид фигуры

Упражнение 4. **Наблюдение кривой изменения тока в одно- и двухполупериодном выпрямителе**

Для получения одно- и двухполупериодного выпрямления тока используется выпрямитель, собранный по мостовой схеме (рис. 8).

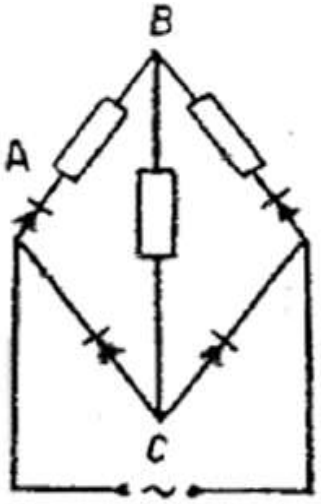

Рис. 8.

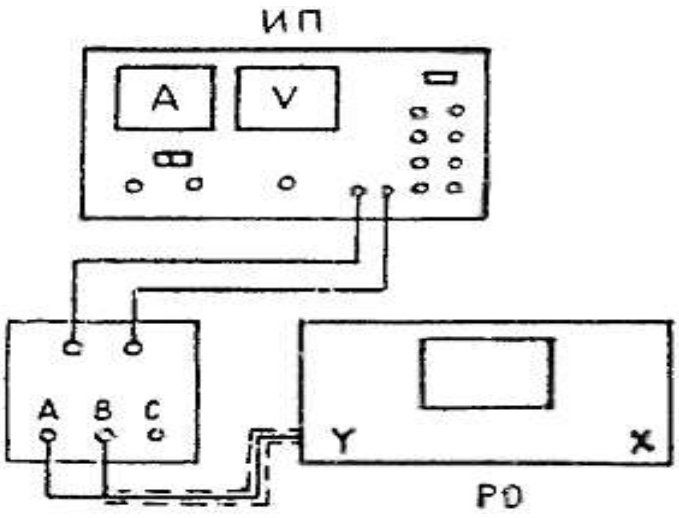

Рис. 9.

1. Собрать схему, изображенную на рис. 9.
2. Вход Y осциллографа соединить с клеммами A и B на панели моста.
3. На выпрямитель подать напряжение 6,3 В от источника питания.
4. Включить генератор развертки осциллографа и получить на экране осциллографа устойчивую картину изменения тока от времени при однополупериодном выпрямлении. Зарисовать картину в тетрадь.
5. Вход Y осциллографа соединить с клеммами C и B на панели моста и получить на экране осциллографа устойчивую картину изменения тока от времени при двухполупериодном выпрямлении. Зарисовать картину в тетрадь.

<u>Рекомендации по проведению работы.</u>

1. Перед тем, как начать работу, внимательно изучите устройства приборов. Для этого воспользуйтесь ***инструкциями по эксплуатации приборов***.
2. В ходе работы могут возникнуть трудности при сборке цепи, поэтому разберитесь, что означает каждая надпись на приборе, и только потом соберите цепь. Например: заземление (знак «⊥») на одном приборе нужно соединять с заземлением на другом, а не с чем-либо другим.
3. В данной работе при выполнении третьего задания воспользуйтесь справочником или какой-либо другой литературой, в которой показаны *фигуры Лиссажу*. Это поможет получить более точные фигуры на экране осциллографа.

Лабораторная работа № 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН [45]

Цель работы: ознакомление с некоторыми видами датчиков и изучение принципа их работы на моделях.

Приборы и принадлежности: катушка индуктивности с выдвижным сердечником, источник переменного напряжения, миллиамперметр, модель тензодатчика, измерительный мост, микрометр, набор грузов.

Современные физиологические и диагностические исследования, разработка новых приборов и аппаратов требуют измерения многочисленных физических величин. При этом большинство величин, подлежащих измерению, являются неэлектрическими, т. е. механическими, тепловыми, акустическими, оптическими и т. п. В частности, такие характеристики деятельности организма,, как давление крови, температура, тоны сердца не сопровождаются генерацией биоэлектрических сигналов и поэтому не могут быть сняты с помощью электродов. В настоящее время широко применяются электрические методы измерения неэлектрических величин. Их основные преимущества: исключительно высокая чувствительность и малая инерционность электрической аппаратуры; возможность проводить измерения на расстоянии; удобство регистрации и обработки данных измерения на ЭВМ.

Структурная схема электрического измерения неэлектрических величин состоит из трех основных частей: 1) первичного преобразователя неэлектрической величины в электрическую — датчика; 2) усилителя электрических сигналов; 3) регистрирующего устройства. Все эти узлы могут размещаться отдельно друг от друга и соединяться лишь кабелем или другой линией связи. Датчиком называется устройство, преобразующее измеряемую или контролируемую величину в сигнал, удобный для передачи и регистрации.

Преобразуемая величина x называется входной, а измеряемый сигнал α — выходной величиной. Функциональная зависимость выходной величины α от входной x описывается аналитическим выражением или графиком и называется характеристикой датчика. Обычно стремятся иметь датчик с линейной характеристикой $\alpha = kx$. Величина $\Delta\alpha/\Delta x$ является чувствительностью датчика. Максимальное значение входной величины, которое может быть воспринято датчиком без искажения и без повреждения датчика, называется пределом датчика. Минимальное изменение входной величины, которое можно обнаружить датчиком, называется порогом чувствительности.

Датчики делят на два класса: генераторные и параметрические. Гёнераторными называют такие, которые под воздействием входного сигнала генерируют напряжение или ток (например, индукционные датчики, пьезоэлектрические, фотоэлектрические и т. п.). Параметрическими называют датчики, в которых под воздействием входного сигнала изменяется какой-либо параметр (например, тензометрические датчики, емкостные, индуктивные, реостатные и т. п.).

Рассмотрим некоторые типы датчиков:

1. ***Реостатный датчик.*** В качестве реостатного датчика используется реостат, движок которого перемещается в зависимости от значения измеряемой величины. Таким образом, входной величиной реостатного датчика является перемещение движка, а выходной — активное сопротивление.

2. ***Тензодатчик.*** В основе работы тензодатчика лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации. Характеристикой тензоматериала является коэффициент относительной тензочувствительности

$$k_{от} = \varepsilon_R / \varepsilon_l \qquad (1)$$

где $\varepsilon_l = \Delta l / l$ — относительное удлинение проводника; $\varepsilon_R = \Delta R / R_0$ - относительное изменение сопротивления проводника. По закону Гука $\varepsilon_l = \sigma / E$, где E — модуль Юнга для данного материала; $\sigma = P/S$ — механическое напряжение в образце; P — нагрузка; S —площадь поперечного сечения образца.

Подставляя выражение для ε_l в (1), получаем

$$k_{отн} = \Delta RSE / (R_0 P). \qquad (2)$$

Основным требованием к материалу тензодатчика является возможно большее значение коэффициента относительной тензочувствительности. Наиболее широкое распространение в настоящее время находят проволочные тензодатчики (рис. 10).

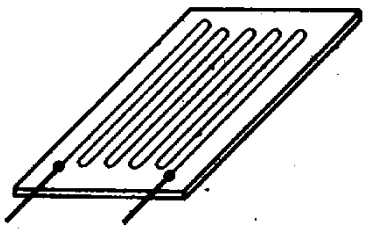

Рис. 10.

На полоску бумаги или лаковую пленку наклеивается зигзагообразно тонкая проволока. К ее концам присоединяются выводные проводники. Сверху датчики покрываются тонким слоем лака, а иногда закрываются бумагой или фетром. Такой датчик, будучи наклеенным на испытываемую деталь, воспринимает деформацию ее поверхностного слоя. Таким образом, входной величиной наклеиваемого датчика является деформация поверхностного слоя детали, а выходной — изменение сопротивления датчика.

В медицинской технике при регистрации пневмограммы, характеризующей изменение периметра грудной клетки, частоту дыхания, используются тензодатчики, располагаемые на грудной клетке пациента. Датчик выполнен в виде жилета, изготовленного из эластичной ткани. Чувствительный элемент образован двумя резиновыми трубками с угольно-графитным наполнением, сопротивление которых изменяется при деформации.

3. ***Емкостный датчик***. Примером такого датчика может служить конденсатор переменной емкости. Емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$$

У этих датчиков измеряемая величина может быть функцией *d,* S, ε. В последнем случае датчик применяется для анализа состава вещества. В большинстве же случаев использования емкостных датчиков их входной величиной является перемещение обкладок относительно друг друга.

В медицинской технике применяется емкостный измеритель легочной вентиляции. Его чувствительный элемент образован тремя лепестками из тонкой синтетической пленки, на наружную поверхность которой нанесен слой алюминия толщиной около 10 мкм. Под действием воздуха подвижный лепесток в зависимости от вдоха или выдоха приближается к тому или иному неподвижному лепестку, что приводит к изменению емкости системы.

4. ***Индуктивный датчик***. На рис. 11,*а* изображен наиболее распространенный датчик с малым воздушным зазором δ, изменяющимся под действием силы *F.* В результате изменяются индуктивность катушки и полное сопротивление Z цепи. Таким образом, возникает функциональная зависимость между F и Z: Z = *f(F).*

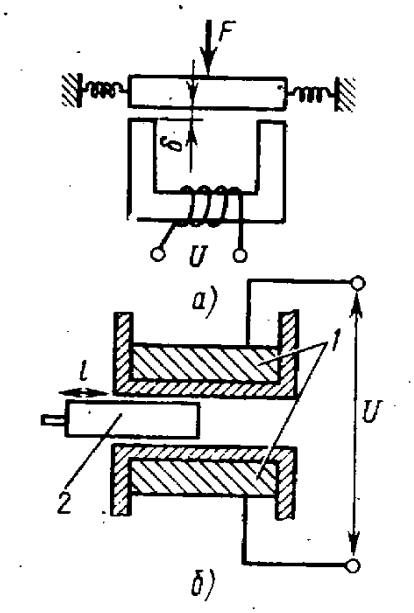

Рис. 11.

На рис. 11,*б* показан датчик, представляющий собой катушку 1, внутри которой перемещается стальной сердечник *2.* Индуктивность L катушки, а следовательно, и ее полное сопротивление Z являются функциями перемещения сердечника: Z = *f(l).*

5. ***Пьезоэлектрический датчик.*** Принцип его действия основан на пьезоэлектрическом эффекте — явлении поляризации кристаллических диэлектриков при деформации. Входной величиной в этих датчиках может быть давление, механическое напряжение, перемещение, а выходной — электрическое напряжение. В медицине пьезодатчики нашли широкое применение в приборах для автоматического измерения артериального давления, для записи пульса лучевой артерии и т. д.

6. ***Индукционный датчик.*** Принцип его работы заключается в наведении э.д.с. индукции при относительном перемещении катушки и постоянного магнита. У индукционных датчиков входной величиной является скорость механического перемещения, и поэтому они используются только в приборах, предназначенных для измерения скоростей, например, крыльчатый датчик (рис. 12), применяемый в аппарате для импульсной регистрации легочной вентиляции. Определение легочной вентиляции производится путем регистрации объема выдыхаемого и вдыхаемого воздуха.

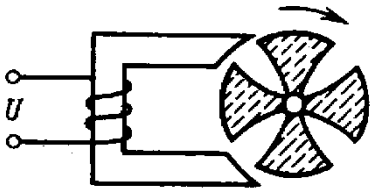

Рис. 12.

Датчик представляет собой двухканальный расходомер воздуха с малоинерционной крыльчаткой. Каналы входа и выхода воздуха выполнены раздельно с целью обеспечения надежного разделения сигналов входа и выхода. Крыльчатки датчиков установлены в проходящих потоках выдыхаемого и вдыхаемого воздуха. Каждая крыльчатка изготавливается из магнитного материала и намагничена. При вращении крыльчатки периодически меняется магнитный поток, пронизывающий катушку, в результате в ней возникает э.д.с. индукции ε, зависящая от скорости вращения. Скорость вращения крыльчатки датчика пропорциональна расходу *V* воздуха. Таким образом, $\varepsilon = (V)$.

Описание экспериментальной установки

1. Измерения коэффициента относительной тензочувствительности проводятся на модели тензодатчика, изготовленной из константановой проволоки 1, укрепленной на каркасе 2 роликами 3 (рис. 13). При подвешивании грузов проволока растягивается и ее сопротивление изменяется. Измерение сопротивления производится с помощью измерительного моста постоянного тока 4.

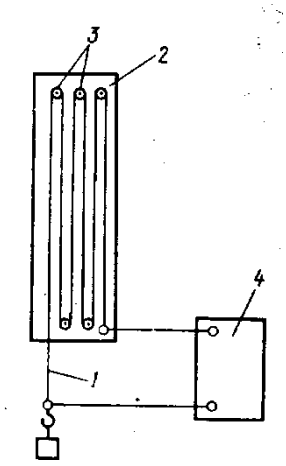

Рис. 13.

2. Модель индуктивного датчика изображена на рис. 14. Датчик представляет собой катушку 1 с перемещающимся сердечником 2. При перемещении сердечника индуктивность катушки изменяется. Об изменении индуктивности можно судить по изменению силы тока в катушке. График зависимости силы тока I от перемещения *l* сердечника является характеристикой датчика. Питание катушки производится от сети через понижающий трансформатор.

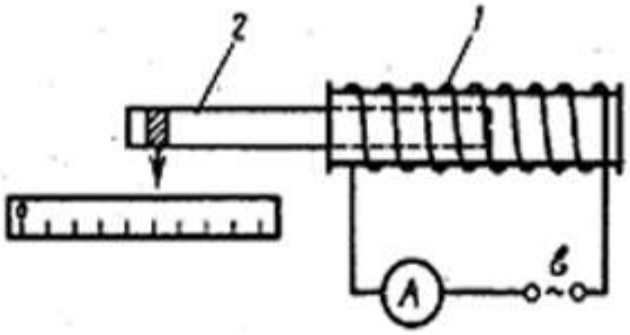

Рис. 14.

Измерения и их обработка

Упражнение 1. **Определение коэффициента относительной тензочувствительности датчика.**

1. Измерить с помощью моста постоянного тока начальное сопротивление R_0 модели тензодатчика.
2. Измерить сопротивление *R* датчика, последовательно нагружая его грузами массой m.
3. Измерить микрометром диаметр *d* проволоки.
4. Учитывая, что P = mg, $\Delta R = R - R_0$, $S = \pi d^2/4$, из (2) получаем

$$k_{от} = \frac{(R - R_0)E\pi d^2}{4R_0 mg}$$

5. Рассчитать коэффициент относительной тензочувствительности датчика при каждой нагрузке.
6. Вычислить $\langle k_{от} \rangle$ и найти погрешность $\Delta k_{от}$ измерения коэффициента относительной тензочувствительности датчика с доверительной вероятностью α = 0,95.
7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Упражнение 2. **Снятие характеристики индуктивного датчика.**

1. Включить трансформатор в сеть и установить сердечник датчика так, чтобы его указатель совпадал с нулевым делением шкалы.

2. Записать показание *I* миллиамперметра.
3. Вдвигая сердечник в катушку, снять показания миллиамперметра через каждый сантиметр перемещения *l* сердечника. Результаты измерений занести в таблицу.
4. Построить график $I = f(l)$ зависимости силы тока в катушке от перемещения сердечника.
5. Определить по графику чувствительность датчика $k = \Delta I/\Delta l$.

ЭТО ИНТЕРЕСНО [30, 34]

Диапазоны изменения параметров деталей, устройств и систем на практике могут быть весьма значительны, и тем более существенно могут различаться параметры объектов различного назначения. Рассмотрим единицы измерения и диапазоны изменения некоторых электрических величин.

Кулон в качестве единицы количества электричества (электрического заряда) принят в числе первых электротехнических единиц на I Международном конгрессе электриков в 1881 г. Он определяется как количество электричества, проходящее через поперечное сечение проводника за 1 с при силе тока, равной 1 А. Единица количества электричества названа в честь французского инженера и исследователя Шарля Огюстена Кулона.

В большинстве случаев накапливаемая величина заряда на конденсаторах, установленных в различной радиоэлектронной аппаратуре, составляет малые доли кулона. Максимальная емкость электролитических конденсаторов широкого применения (например, К50-32) достигает 10^5 мкФ при рабочем напряжении 25 В. Масса такого конденсатора 1300 г, диаметр 80 мм и высота 142 мм. При этом полный заряд такого конденсатора составляет 2,5 Кл. Для сравнения отметим, что величина заряда электрона оценивается в $1{,}6\ 10^{-19}$ Кл.

Вольт - единица электрического напряжения, разности электрических потенциалов, электродвижущей силы, получила наименование в честь А. Вольта в 1881 г. на I Международном конгрессе электриков. По определению, вольт—электрическое напряжение на участке электрической цепи с постоянным током силой 1 А, в котором затрачивается мощность 1 Вт. В честь А. Вольта назван прибор для измерения напряжения — вольтметр. Из всех электроизмерительных приборов вольтметр наиболее часто применяется специалистами в процессе настройки аппаратуры и при поиске неисправностей. Причина? Идеальный вольтметр обладает бесконечно большим входным сопротивлением и, следовательно, при его подключении режим работы аппаратуры не меняется. Второе достоинство—при использовании вольтметра нет нужды производить какие-либо перепайки в схемах, что необходимо при включении амперметра или омметра.

Единица электрической емкости - фарад, т. е. емкость конденсатора, между обкладками которого при заряде 1 Кл возникает электрическое напряжение 1 В. Названа и принята единица по имени знаменитого английского физика и химика М. Фарадея на I Международном конгрессе электриков (1881). На практике в большей части случаев используются конденсаторы емкостью от нескольких пикофарад до нескольких тысяч микрофарад. Емкость 1 Ф - это очень большая емкость. Например, такова емкость уединенного шара с радиусом $9 \cdot 10^9$ м, что примерно в 1500 раз больше радиуса Земли, или плоского конденсатора с расстоянием между пластинами 10 мм и площадью каждой пластины 1100 км^2 (больше площади Москвы!). И тем не менее, начиная с 1983 г., некоторые фирмы приступили к серийному выпуску электролитических конденсаторов с пористым диэлектриком емкостью 1,2 Ф на рабочее напряжение 5В. Пока это самое емкое хранилище заряда - 6 Кл.

Единица индуктивности генри названа в честь американского физика Дж. Генри и принята на II Международном конгрессе электриков в 1889 г. Дроссели индуктивностью от единиц до сотен микрогенри выпускаются серийно. В США начался серийный выпуск миниатюрных катушек для интегральных микросхем с индуктивностью 0,06 - 7 мкГн. Они выполняются в виде куба с гранью около 2 мм. Большой индуктивностью обладают силовые трансформаторы

Единица измерения электрического тока, получившая название по имени основателя электродинамики А.-М. Ампера, принята на I Международном конгрессе электриков в 1881 г. В современной редакции ампер—это сила постоянного тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводам бесконечной длины и ничтожно малого сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывал бы между ними силу взаимодействия, равную $2 \bullet 10^{-7}$ Н на каждый метр длины. Реальные эталоны силы тока создаются по принципу измерения силы притяжения двух стандартных катушек с помощью специальных токовых весов.

Единица сопротивления названа в честь немецкого ученого Г. Ома на I Международном конгрессе электриков. Ом—сопротивление проводника, между концами которого при силе тока 1 А возникает напряжение 1 В. Резисторы, используемые в различных приборах и устройствах, различаются в основном по конструктивному исполнению, допустимой мощности рассеяния, номинальному сопротивлению и его допустимому отклонению в процентах. Проволочные резисторы изготовляются путем навивки проволоки на фарфоровую трубку или цилиндр с укрепленными на его концах токосъемниками. Они рассчитаны на мощность рассеяния 0,125—100 Вт при номинальном сопротивлении от долей ома до единиц мегаом. Более широкое распространение получили непроволочные резисторы. Их мощность рассеяния колеблется от 0,125 до 5 Вт, а номинальное сопротивление лежит в пределах от единиц ом до десятков мегаом. Есть резисторы, сопротивление которых измеряется гигаомами. Непроволочные резисторы

изготавливаются подобно проволочным, только в качестве проводящего вещества на фарфоровый стержень наносится слой окиси углерода, окиси металлов и т. д. Большинство резисторов указанных типов выпускаются с допустимыми отклонениями от номинального сопротивления на ±2, ±5, ±10 и ±20%. Сверху на резисторы наносятся защитные покрытия.

Наряду с электрическим сопротивлением существует понятие электрической проводимости. Это — величина, обратная сопротивлению. Она используется для теоретического анализа электронных схем, входит в ряд практических расчетов. Обозначение $Ом^{-1}$ не прижилось. Стали использовать название «обратный Ом» и обозначение «мо». На Международной электротехнической комиссии в 1936 г. впервые было предложено назвать единицу электрической проводимости сименсом. Официальное название единица проводимости получила только на XIV Генеральной конференции по мерам и весам (1971).

Единица электрической проводимости названа в честь немецкого изобретателя и промышленника Эрнста Вернера Сименса (1816—1892), основателя знаменитых фирм «Сименс и Гальске» и «Сименс и Шуккерт». В настоящее время концерн «Сименс» (ФРГ) является крупнейшим электротехническим объединением Европы и одним из крупнейших в мире.

В заключение отметим, что единицы измерения физических величин обозначаются буквами русского либо латинского алфавита, за исключением греческой омеги Ω — единицы сопротивления.

Смешанные обозначения запрещены. Без числовых значений единицы физических величин обозначаются в тексте полным названием. Когда и какими алфавитами пользоваться? Обозначение единиц буквами русского алфавита обязательно для применения в технической документации, книгах и справочниках и т. д. Однако если какая-либо продукция может рассматриваться в качестве предмета экспорта, то обязательно использование букв латинского алфавита, т. е. международных обозначений. По указанной причине международные обозначения физических величин наносятся на лицевые панели генераторов стандартных сигналов, амперметров, вольтметров, ваттметров и другой измерительной аппаратуры.

Тема №2

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Литература

[Р3]. Гл. II, III, IV, V. §§ 56, 62.

[Р8]. §§ 6, *7,* 13 - 24, 48.

[Р11]. Гл. I, II, §§ 3.5 - 3.7; 8.1 - 8.3.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Закон взаимодействия электрических зарядов. Закон Кулона.
2. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции полей.
3. Теорема Остроградского — Гаусса и ее применение для расчета электрических полей.
4. Уравнение Пуассона.
5. Диполь в электрическом поле.
6. Работа в электростатическом поле.
7. Потенциал. Неоднозначность потенциала. Нормировка. Разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности.
8. Условия равновесия зарядов в проводниках.
9. Связь между вектором напряженности поля и потенциалом. Потенциал в простейших электрических полях.
10. Электрическое поле диполя. Разность потенциалов двух точек электрического поля диполя.
11. Емкость уединенного проводника. Конденсаторы. Типы конденсаторов. Соединение конденсаторов. Сложные конденсаторы. Емкость простых конденсаторов
12. Энергия заряженного конденсатора. Энергия электрического поля. Локализация энергии.
13. Поляризация диэлектриков. Поляризованность.
14. Сегнетоэлектричество.
15. Пьезоэлектричество.

Качественные вопросы

1. Почему окраска небольших предметов методом разбрызгивания краски экономически выгодна, а также безвредна для здоровья работающего, если между пульверизатором и предметом создать высокое напряжение?

2. В музеях нередко возникает надобность читать древние свитки. Они бывают настолько ветхие, что они ломаются и рвутся. При осторожной попытке отделить один слой рукописи от соседнего. Как разъединить такие документы?
3. Можно ли, имея в своем распоряжении одно заряженное тело, зарядить с его помощью другое тело зарядом, во много раз превышающим заряд первого тела?
4. Всегда ли одинаковы емкости двух одинаковых по форме и размерам проводников?
5. Зачем при промышленном изготовлении пороха его обволакивают порошком графита?
6. Почему электролитические конденсаторы обладают большой емкостью?
7. Почему птицы слетают с провода высокого напряжения, когда включают напряжение?
8. Почему вещество, распределённое в пространстве между электрическими зарядами, изменяет электрические свойства среды?
9. Силовые линии электрического поля в проводниках совпадают с линиями тока. Как это согласовать с тем фактом, что в тонком слое электролита (например, в плоской кюветке) линии тока от двух электродов в виде маленьких шариков расположены в этом слое, тогда как силовые линии двух разноименных зарядов располагаются по всем направлениям?
10. Шел XVIII век. Соборный настоятель небольшого померанского городка, некто Эвальд Георг фон Клейст, потихоньку от прихожан занимался электрическими опытами. ...Однажды в счастливые часы занятий электрическими исследованиями фон Клейст решил попробовать зарядить электричеством гвоздь... Он вставил железный стержень в бутылочку из-под микстуры и поднес к кондуктору машины. Несколько оборотов стеклянного шара, и электричество должно было родиться и перейти на гвоздь. Далее его следовало вынуть из бутылочки. Клейст взялся за головку гвоздя и тут же получил весьма ощутимый электрический удар. Но откуда? Его машина неспособна была давать и десятой доли таких зарядов. Он решил повторить опыт... Еще и еще... Каждый раз накопившаяся сила исправно и довольно ощутимо щелкает настоятеля собора по пальцу. А что будет, если налить в склянку спирт или ртуть? Как изменится сила ударов? Почему?
11. Как изменяется поверхностная плотность заряда, если проводник, имеющий форму плоского листа, свернуть в цилиндр?
12. Чем можно объяснить, что при сильной электризации проводника, имеющего острые концы, около них образуется «электрический ветер», который можно обнаружить по отклонению пламени свечи?
13. Каким образом расположены силовые линии внутри изогнутой стеклянной трубки с электролитом, по которому идет ток? Как идут силовые линии в проводе, завязанном узлом?
14. Может ли существовать в вакууме электростатическое поле, вектор напряженности которого **E** во всем объеме поля одинаково направлен, но по величине изменяется, например, по

линейному, квадратичному или экспоненциальному закону, если переходить от точки к точке по нормальному к полю направлению?

15. Электрон, влетевший в конденсатор с некоторой скоростью, по выходе из него имеет большую скорость. Как объяснить это явление с точки зрения закона сохранения энергии?
16. Из заряженного и отключенного от источника напряжения конденсатора удален диэлектрик, ранее заполнявший все пространство между пластинами. Как надо изменить расстояние между пластинами, чтобы энергия конденсатора оставалась неизменной? Как объяснить происшедшее изменение энергии конденсатора?
17. Как изменится емкость плоского конденсатора, если его поместить в металлическую коробку, стенки которой удалены от пластин на расстояние, равное расстоянию между ними (рис. 15)? Влиянием краев пренебречь.

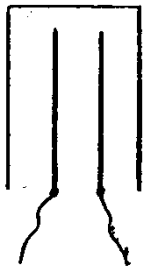

Рис. 15.

18. Диэлектрические проницаемости веществ заметно изменяются при повышении температуры (обычно убывают). Предположим, что заряженный конденсатор охлаждается, вследствие чего его электрическая энергия изменяется (например, убывает). Куда исчезает энергия?
19. Два конденсатора с разными расстояниями между пластинами соединены параллельно и присоединены к источнику напряжения (рис. 16). Из конденсатора C_1 из точки 1, расположенной посередине между пластинами, переносится точечный положительный заряд в конденсатор C_2 в точку 2, находящуюся от отрицательной пластины на расстоянии, равном половине расстояния между пластинами конденсатора C_1. Совершается ли при этом работа?

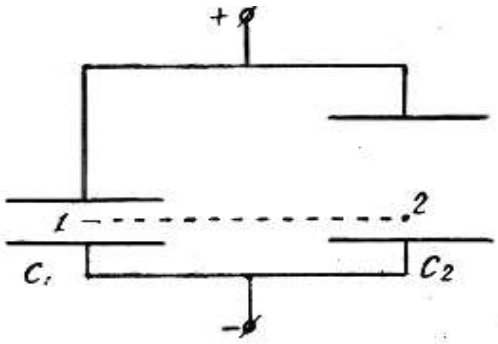

Рис. 16.

20. В какой из точек, 1 или 2 (рис. 17), заряженного конденсатора с непараллельными пластинами поверхностная плотность заряда больше?

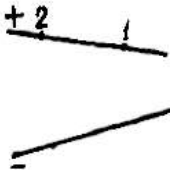

Рис. 17.

21. Пластины заряженного конденсатора соединены тонким изогнутым проводником (рис. 18). Как направлен ток между точками А и В? Как это согласовать с направлением поля в конденсаторе?

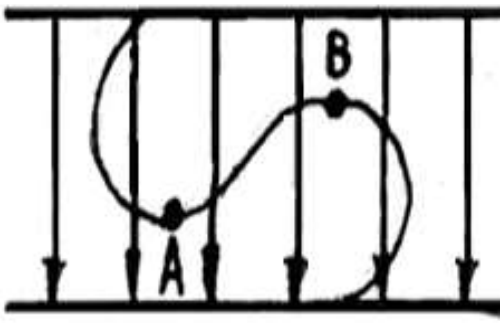

Рис. 18.

Как вы думаете

1. Каковы черты сходства и различия поля и вещества?
2. Имеет ли потенциальность электростатического поля абсолютный характер?
3. Имеет ли принцип суперпозиции пределы применимости?
4. Как можно доказать материальность электростатического поля?
5. Можно ли считать напряженность электростатического поля непрерывной величиной, плавно изменяющейся в пространстве и во времени?
6. Какой физической реальности соответствует положение о том, что силовые линии электростатического поля начинаются и кончаются на зарядах?
7. Существуют ли в природе однородные электростатические поля?
8. Существуют ли в природе неподвижные заряды?
9. В рамках какой структуры условий действует закон Кулона?
10. Связаны ли законы электростатики со свойствами пространства—времени?
11. Зависит ли наличие у проводника такого свойства, как емкость, от того, в какой системе отсчета он рассматривается?

12. От каких свойств конденсаторов можно абстрагироваться при исследовании их емкости?
13. Какова идеализированная модель конденсатора?
14. Чем определяется смысл понятия «емкость» - теорией или экспериментом?
15. Как и в чем проявляется причинно-следственная связь, выражаемая формулой $q=CU$?

Проверь себя!

1. Величина пробного заряда в экспериментах по проверке принципа суперпозиции
   a) может быть любой, так как справедливость принципа суперпозиции не зависит от величины пробного заряда;
   b) должна быть достаточно малой, чтобы обеспечить соблюдение условий, при которой напряженность исследуемого поля существенно не изменяется самим актом измерения;
   c) должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить необходимую точность измерений: чем больше пробный заряд, тем больше величина силы, действующей на него, и с тем большей точностью эту силу можно измерить.

2. В модели постоянных полей идеализацией является
   a) неподвижность порождающих его зарядов;
   b) постоянство во времени электрического поля;
   c) отсутствие флуктуаций среднего значения напряженности поля.

3. Наличие краевых эффектов приводит к тому, что емкость реального плоского конденсатора
   a) чуть выше, чем рассчитанная по теоретической формуле;
   b) чуть ниже, чем рассчитанная по теоретической формуле;
   c) может существенно отличаться от рассчитанной по теоретической формуле.

4. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями **E** возникает в основном
   a) из-за неучета краевых эффектов;
   b) из-за неточности измерений;
   c) в основном за счет искажений поля у электродов и зонда.

5. Используемый в работе метод исследования электростатического поля основан на том, что
   a) в слабо проводящей среде малые токи незначительно искажают существующее электростатическое поле;
   b) в однородной проводящей среде линии напряженности электростатического поля совпадают с линиями тока;
   c) характер силовых линий электростатического поля не зависит от свойств среды.

6. Для исследования электростатического поля используют раствор медного купороса вместо воды, чтобы
   a) увеличить напряженность поля между электродами;
   b) увеличить силу тока через измерительный прибор;
   c) обеспечить однородность электрического поля.

7. Плотность зарядов на обкладках реального плоского конденсатора
   a) постоянна по всей площади обкладок;
   b) возле края пластин возрастает;
   c) возле края пластин уменьшается из-за рассеяния поля.

Лабораторная работа № 5.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: экспериментальное исследование электростатического поля в простейших случаях.

Приборы и принадлежности: источник питания, вольтметр, нулевой гальванометр, набор электродов, реостат, установка для исследования электростатического поля.

В лабораторной работе используется метод изучения электростатических полей путем искусственного воспроизведения их структуры в проводящих средах, по которым пропускается постоянный ток (сущность метода смотри, например, [Р3], § 62). При этом прямое изучение электростатического поля заменяется изучением его точной, но более удобной модели.

Описание экспериментальной установки

В ванну, сделанную из материала с хорошими электроизолирующими свойствами, помещают электроды, поле между которыми хотят изучить. Ванна заполняется жидким электролитом, проводимость которого мала по сравнению с проводимостью металла (например, водой). Электроды опираются на дно ванны и возвышаются над поверхностью налитого в ванну электролита.

В электрической схеме экспериментальной установки (рис. 19) зонд подсоединен непосредственно к вольтметру. Для нахождения формы эквипотенциальной поверхности фиксируется ряд положений (7—9) зонда, соответствующих одному и тому же показанию вольтметра. Кривая, соединяющая зафиксированные точки, дает форму следа эквипотенциальной поверхности па горизонтальной плоскости.

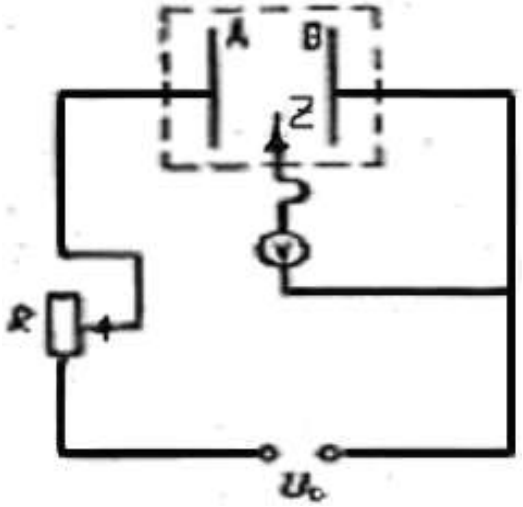

Рис. 19.

Регистрация точек равного потенциала может осуществляться различными способами. Наиболее удобной является графическая фиксация эквипотенциальных поверхностей с помощью специального устройства, называющегося пантографом. Если пантограф в лаборатории отсутствует, то координаты точек равного потенциала, измеренные с помощью координатной сетки на дне ванны, заносятся в таблицы, по которым в дальнейшем строятся графики эквипотенциальных поверхностей.

В лабораторной работе исследуются электростатические поля для нескольких различных конфигураций электродов (рис. 20): поле плоских электродов (I), поле плоских электродов при наличии между ними металлического цилиндра (II), поле цилиндрических электродов (III), поле коаксиальных электродов (IV).

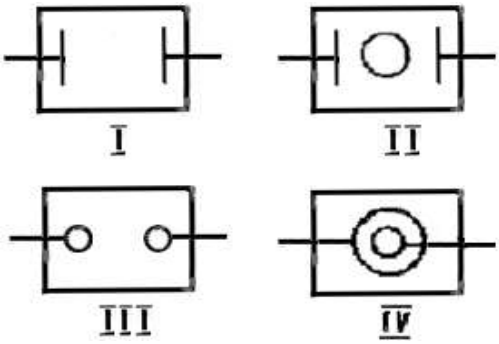

Рис. 20.

Измерения и их обработка

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 19.
2. Поместить зонд вблизи одного из электродов, показания вольтметра, соответствующие потенциалу данной точки, занести в таблицу.
3. Передвигая зонд, найти точки (7—9), имеющие такой же потенциал, и занести их координаты в таблицу.
4. Построить на графике эквипотенциальную линию в соответствии с данными таблицы.

   Примечание: При использовании пантографа данные, измеряемые в п.п. 3, 4, в таблицу не заносятся.

5. Построить еще 4—5 эквипотенциальных линий, расположенных через равные интервалы напряжения друг от друга. Около каждой линии на графике должен быть указан соответствующий ей потенциал.
6. При всех измерениях особенно подробно обследовать зондом все участки сильных неоднородностей в поле, где эквипотенциальные поверхности, построенные через равные интервалы напряжения, располагаются особенно густо.
7. По полученной системе эквипотенциальных линий построить картину силовых линий электрического поля.
8. Найти градиенты в нескольких наиболее характерных точках поля.

9. Произвести измерения п.п. 2—8 для всех систем электродов, изображенных на рис. 20.
10. Рассчитать по теоретическим формулам напряженность поля для плоского и цилиндрического конденсаторов и двухпроводной линии с параметрами, соответствующими исследуемым в работе.
11. Проверить формулы, выражающие напряженность поля для плоского и цилиндрического конденсаторов и двухпроводной линии, сравнив экспериментальные и теоретические результаты.

Лабораторная работа № 6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ МОСТА СОТТИ

Цель работы: определение емкости методом моста переменного тока.

Приборы и принадлежности: источник переменного тока, набор конденсаторов, реохорд, электронно-оптический индикатор нуля.

Описание экспериментальной установки

Для определения емкости конденсаторов можно воспользоваться мостовой схемой (рис. 7). Здесь C - известный и C_x — исследуемый конденсаторы. Напряжение 10—20 В подается на реохорд AB от вторичной обмотки понижающего трансформатора. Принцип измерения основан на нахождении такого положения движка реохорда D, при котором ток через индикатор отсутствует. Условие равновесия моста (вывести самостоятельно):

$$C_x = C\frac{l - l_1}{l}$$

В качестве индикатора нуля используется электронный осциллограф. Передвигая ползунок реохорда D, добиваются того, чтобы отклонение луча в вертикальном направлении было минимальным.

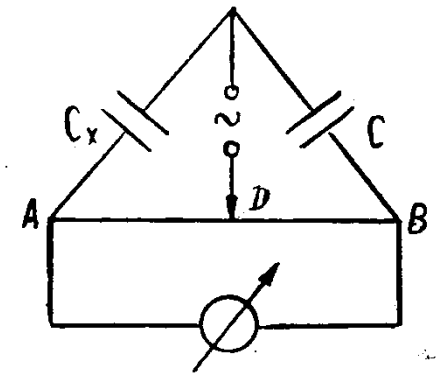

Рис. 21.

Измерения и их обработка

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 21. В качестве известной емкости С включают магазин конденсаторов.
2. Перемещая ползунок реохорда, добиться того, чтобы отклонение луча на экране осциллографа было минимальным.
3. Записать значения длин плеч реохорда l и l_1, и, зная С, вычислить C_x.
4. Изменяя емкость конденсатора С, повторить измерения пунктов 2, 3. Вычисление емкости C_x провести при пяти различных значениях С.
5. Повторить измерения пунктов 2-4 для других конденсаторов C_x.
6. Повторить измерения пунктов 2-4 при параллельном и последовательном соединении исследованных в п. п. 2-5 конденсаторов, а так же комбинации этих соединений (рис. 22). Экспериментально полученные значения C_x сравнить с теоретически рассчитанными.
7. Произвести полную математическую обработку результатов экспериментов. Результаты измерений и расчетов занести в таблицы.

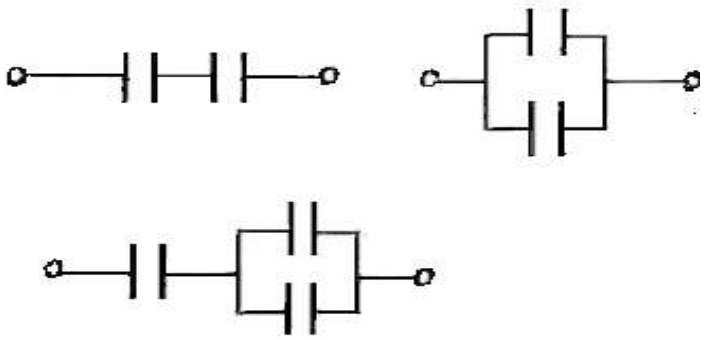

Рис. 22.

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ [45]

Цель работы: изучение топографии поля электрического диполя.

Приборы и принадлежности: вольтметр со щупами, амперметр, реостат, модель диполя, ванна с водой, источник постоянного напряжения (15 В), миллиметровая сетка.

Электрическим диполем называется система, состоящая из двух равных по величине, по противоположных по знаку точечных зарядов, жестко связанных между собой и смещенных на расстояние ***l*** друг от друга. В вакууме или в идеальном изоляторе электрический диполь может сохраняться сколь угодно долго. В проводящей среде под действием электрического поля диполя возникает движение свободных зарядов и диполь либо экранируется, либо нейтрализуется. При подключении к диполю источника постоянного напряжения диполь будет сохраняться, несмотря на наличие тока в проводящей среде. Такая двухполюсная система называется дипольным электрическим генератором или токовым диполем. (Интересно, что в электрическом отношении сердце можно рассматривать как токовый диполь).

Между токовым диполем и электрическим диполем имеется аналогия, основанная на общей аналогии электрического поля в проводящей среде с электростатическим полем, которая сводится к следующему:

1) линии тока в проводящей среде совпадают с линиями напряженности электростатического поля при одинаковой форме электродов;

2) многие формулы, описывающие поля, имеют тождественный вид..

Например, если аналогично электрическому моменту диполя ***p*** = *q**l*** ввести дипольный момент токового диполя p_I = I*l* (I — сила тока, *l* - расстояние между электродами), то потенциал поля токового диполя в безграничной среде выражается, аналогично потенциалу электрического диполя, формулой:

$$\varphi = \frac{p_I \cos\alpha}{4\pi\sigma r^2} \qquad (1)$$

где σ — удельная электрическая проводимость.

Пусть диполь находится в точке О, расстояние между его зарядами мало (рис. 23).

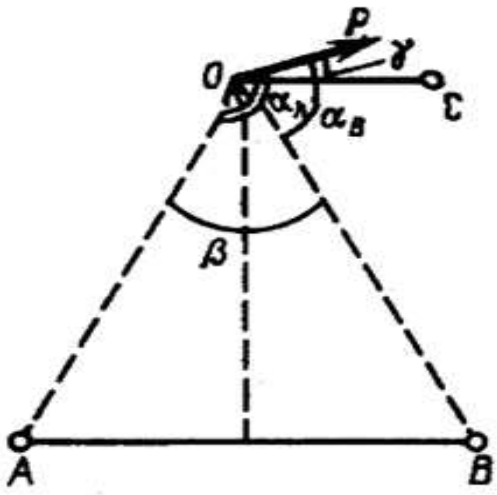

Рис. 23.

Запишем, пользуясь формулой (1), разность потенциалов в двух точках А и *В,* равноотстоящих от диполя:

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{p_I}{4\pi\sigma r^2}(\cos\alpha_B - \cos\alpha_A)$$

или

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{\sin(\beta/2)}{2\pi\sigma r^2}\, p_I \cos\gamma$$

Из полученного выражения видно, что разность потенциалов в двух точках поля диполя (при данном σ и r) зависит от синуса половины угла, под которым видны эти точки от диполя, и зависит от проекции электрического момента диполя на прямую, соединяющую точки.

Если диполь находится в центре равностороннего треугольника (рис. 24),

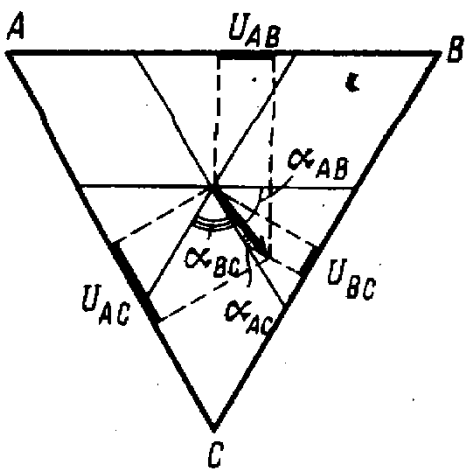

Рис. 24.

то $\beta_{AC} = \beta_{BC} = \beta_{AB}$ и соотношения между напряжениями на сторонах этого треугольника могут быть получены как соотношения проекций вектора **p** на стороны треугольника:

$$U_{AB} : U_{BC} : U_{AC} = p \cos \alpha_{AB} : p \cos \alpha_{BC} : p \cos \alpha_{AC} \qquad (2)$$

где α — угол между диполем и соответствующей стороной треугольника.

Так как p является постоянной величиной, то выражение (2) можно переписать в виде

$$U_{AB} : U_{BC} : U_{AC} = |\cos \alpha_{AB}| : |\cos \alpha_{BC}| : |\cos \alpha_{AC}| \qquad (3)$$

Зная напряжения U_{AB},, U_{AC} и U_{BC},, можно определить, как ориентирован диполь относительно сторон треугольника. Из соотношения (3) следует, что

$$U_{AB} = k \cos \alpha_{AB}; \quad U_{BC} = k \cos \alpha_{BC}; \quad U_{AC} = k \cos \alpha_{AC}$$

где *k* — коэффициент пропорциональности, зависящей от свойств среды, дипольного момента и размеров треугольника. Используя соотношения (3) и проделав тригонометрические преобразования, получаем:

$$tg\alpha_{AB} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_{AC} + U_{BC}}{U_{AC} - U_{BC}} \qquad (4)$$

В электрическом отношении сердце можно рассматривать как токовый диполь. За время сердечного цикла изменяется положение диполя в пространстве и дипольный момент. В соответствии с теорией Эйнтховена сердце — диполь — расположено в центре равностороннего треугольника, вершины которого условно можно считать находящимися в правой руке, левой руке и левой ноге. В соответствии с формулой (2) измерение разности потенциалов между вершинами этого треугольника позволяет определить соотношение между проекциями дипольного момента сердца на стороны треугольника. Теория Эйнтховена лежит в основе электрокардиографии.

Описание экспериментальной установки

Установка для проведения эксперимента представляет собой две плоские ванны, заполненные недистиллированной водой (проводящая среда).

Одна ванна открыта, и на дно ее положена измерительная сетка (если сетка отсутствует, то под ванну подкладывается лист миллиметровки с предварительно нанесенными осями координат). Напряжение от источника постоянного тока подается на небольшие металлические шарики-электроды, помещенные в ванну. Эта система представляет собой модель токового диполя. Шарики укреплены на тонких стержнях и могут перемещаться в двух взаимно

перпендикулярных направлениях. Измерения разности потенциалов производятся вольтметром, снабженным специальными щупами или зондом. Реостат предохраняет схему от короткого замыкания (рис. 25).

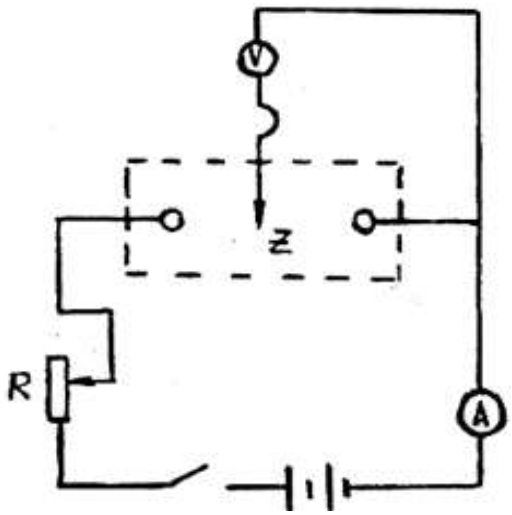

Рис. 25.

Вторая ванна закрыта непрозрачной крышкой, диполь закреплен в ней неподвижно в центре равностороннего треугольника. Клеммы для подачи напряжения на диполь и для измерения разности потенциалов между вершинами треугольника расположены на крышке ванны.

Измерения и их обработка

Упражнение 1. **Построение эквипотенциальных линий поля токового диполя.**

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 25.
2. Поместить зонд в точку, лежащую посередине между электродами, показания вольтметра занести в таблицу.
3. Передвигая зонд, найти точки (7—9), имеющие такой же потенциал, и занести их координаты в таблицу.
4. Построить на графике эквипотенциальную линию, в соответствии с данными таблицы.
5. Построить еще четыре эквипотенциальные линии других значений потенциалов (по две с каждой стороны от центральной). Около каждой линии на графике должен быть указан соответствующий ей потенциал.
6. По полученной системе эквипотенциальных поверхностей построить картину силовых линий электрического поля. Для этого отметьте на рисунке положение полюсов диполя и проведите

линии напряженности от положительного заряда к отрицательному перпендикулярно эквипотенциальным линиям.

7. Проверить справедливость формулы (1), рассчитать σ по результатам эксперимента (см. § 68, [P3]).
8. Проверить формулы, выражающие напряженность поля электрического диполя.
9. Повторить измерения п.п. 2—8 при нескольких (3—5) значениях I и *l.*

Упражнение 2. **Определение разности потенциалов на сторонах равностороннего треугольника.**

1. Поместить электроды диполя в центре равностороннего треугольника *ABC,* нарисованного на измерительной сетке, вдоль линии, параллельной одной из его сторон, на расстоянии 4—6 см друг от друга.
2. Измерить разности потенциалов U_{AB},, U_{AC} и U_{BC} между вершинами треугольника.
3. Определить косинусы углов cos α_{AB} , cos α_{BC} и cos α_{AC} между диполем и соответствующими сторонами треугольника.
4. Результаты измерений занести в таблицу.
5. Проверить, выполняется ли соотношение (3).
6. Расположить электроды диполя вдоль одной из высот треугольника ABC и повторите измерения п.п. 1-5.

Упражнение 3. **Определение положения диполя**

1. Подать напряжение от источника тока на диполь, помещенный в закрытой ванне.
2. Измерить разности потенциалов U_{AC} и U_{BC} между вершинами треугольника.
3. Вычислить угол между плечом диполя и стороной AB треугольника по формуле (4).
4. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Лабораторная работа № 8.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ [35]

Цель работы: изучение поляризации сегнетоэлектриков в зависимости от напряженности электрического поля E, получение кривой ε = f(E), изучение диэлектрического гистерезиса, определение диэлектрических потерь в сегнетоэлектриках.

Приборы и оборудование: модуль ФПЭ-02; 2. цифровой вольтметр PV; 3. осциллограф PO.

Описание экспериментальной установки

На рис. 26 приведена структурная схема, а на рис. 27 - принципиальная электрическая схема, с помощью которой изучаются свойства сегнетоэлектриков.

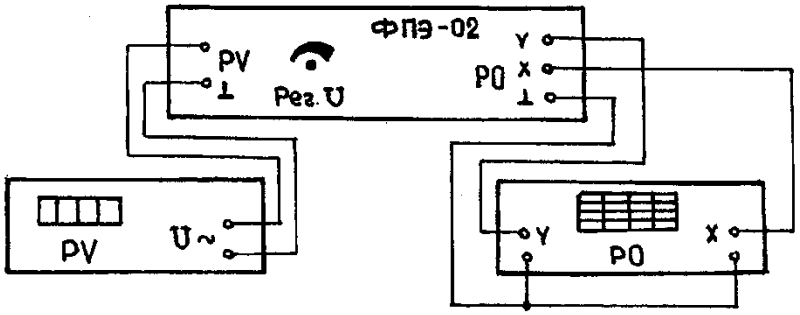

Рис. 26.

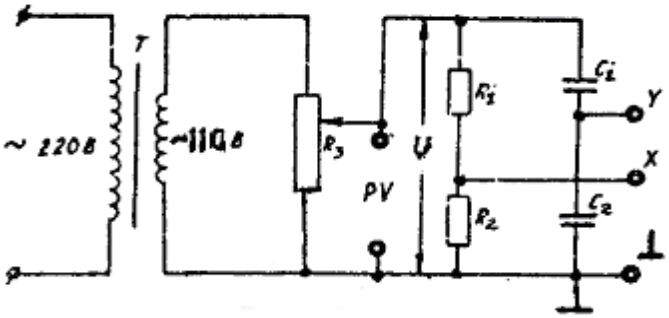

Рис. 27.

Схема, изображенная на рис. 27, собрана в модуле ФПЭ-02. На передней панели модуля имеются:

1) ручка «Рег V» потенциометра R_3;

2) гнезда «PV» - для подключения вольтметра;

3) гнезда «PO» («Y», «X», «⊥») – для подключения осциллографа.

От источника на схему поступает напряжение сети 220 В, 50 Гц.

Напряжение, снимаемое со вторичной цепи понижающего трансформатора Т (220/110), через потенциометр R подается на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R_1 и R_2. Параллельно делителю R_1, R_2 включены последовательно два конденсатора, образующие емкостной делитель: исследуемый керамический сегнетоэлектрический конденсатор C_1 и эталонный конденсатор C_2. Вольтметр PV обеспечивает измерение величина напряжения, подаваемого на делители R_1, R_2 и C_1, C_2. Осциллограф PO служит для наблюдения и изучения поляризации сегнетоэлектрического конденсатора C_1 при подаче на него переменного гармонического напряжения.

Метод измерения

На вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение V_y с эталонного конденсатора

$$V_y = \frac{q}{C_2} \tag{1}$$

Так как C_1 и C_2 соединены последовательно, то они имеют одинаковый заряд q на обкладках. Величина этого заряда может быть выражена через электрическое смещение D поля в исследуемом конденсаторе C_1:

$$D = \sigma = \frac{q}{S},$$

откуда:

$$q = DS \tag{2}$$

где σ - поверхностная плотность заряда на обкладке конденсатора C_1; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ - площадь, d – диаметр обкладок конденсатора C_1.

С учетом (2) напряжение

$$V_y = \frac{S}{C_2} D \tag{3}$$

На горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение V_x, снимаемое с сопротивления R_2:

$$V_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V. \qquad (4)$$

Это напряжение, как видим, составляет часть полного напряжения V, подаваемого на делитель напряжения R_1, R_2, а значит, и на емкостной делитель C_1, C_2. Емкости C_1 и C_2 подобраны таким образом, что $C_1 < C_2$. Поэтому с достаточной степенью точности $(\sim \frac{C_1}{C_2})$ можно считать, что практически все напряжение V, отнимаемое с потенциометра R_3, на емкостном делителе приложено к сегнетоэлектрическому конденсатору C_1. Действительно, так как $\frac{V_{C1}}{V_{C2}} = \frac{C_1}{C_2}$ >>I, то $V = V_{C1} + V_{C2} \approx V_{C1}$. Тогда, полагая электрическое поле внутри конденсатора C_1 однородным, имеем:

$$V = Eh, \qquad (5)$$

где E – напряженность электрического поля в пластине сегнетоэлектрика; h – толщина пластины сегнетоэлектрика.

С учетом (5) напряжение V_x можно представить в виде:

$$V_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} Eh \qquad (6)$$

Таким образом, в данной электрической схеме на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины осциллографа одновременно подаются периодически изменяющиеся напряжения, пропорциональные, соответственно, электрическому смещению D и напряженности поля E в исследуемом сегнетоэлектрике, в результате чего на экране осциллографа получается петля гистерезиса (рис. 28).

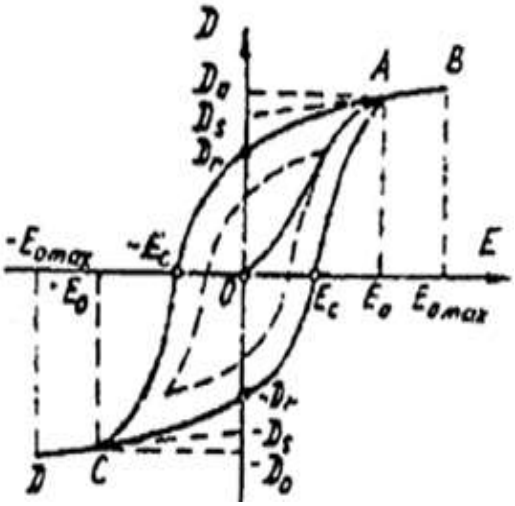

Рис. 28.

Выражения (3), (5) и (6) позволяет найти смещение D и напряженность E электрического поля в сегнетоэлектрике, если предварительно определены величины V_y, V_x и V. Напряжение V определяется по показанию вольтметра PV. Напряжения V_y и V_x измеряются с помощью осциллографа и рассчитываются по формулам:

$$V_y = K_y y \tag{7}$$

$$V_x = K_x x \tag{8}$$

где y, x – отклонение электронного луча на экране осциллографа по осям Y и X соответственно; K_y, K_x – коэффициенты отклонения каналов Y и X осциллографа.

Учитывая (7) и (8), из выражений (3) и (6) получим:

$$D = \frac{C_2 K_y}{S} y \tag{9}$$

$$E = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{K_x}{h} x \tag{10}$$

Кроме того, из выражения (5) следует:

$$E_0 = \frac{V_0}{h} = \frac{\sqrt{2}}{h} V \tag{11}$$

где V – эффективное значение напряжения, измеряемое вольтметром PV.

Для напряженности поля получили две формулы. Формула (10) используется для определения текущего, а формула (11) – для определения амплитудного значения напряженности поля в сегнетоэлектрике.

Применим полученные соотношения для нахождения тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике и исследования зависимости $E = f(E)$.

Диэлектрические потери в конденсаторах оцениваются тангенсом угла потерь

$$tg\delta = \frac{R}{X} = \frac{1}{2\pi}\frac{w_R}{w_0}, \qquad (12)$$

где w_R – потери энергии переменного электрического поля на диэлектрический гистерезис в единице объема сегнетоэлектрика за время одного периода; w_0 – максимальная плотность энергии электрического поля в кристалле сегнетоэлектрика. Учитывая, что $w_R = \oint EdD$ и численно равна площади петли гистерезиса в координатах D, E, а $w_0 = \frac{E_0 D_0}{2}$, где E_0, D_0 – амплитуды векторов напряженности и смещения электрического поля, получим:

$$tg\delta = \frac{1}{\pi}\frac{\oint EdD}{E_0 D_0} = \frac{1}{\pi}\frac{\oint xdy}{x_0 y_0} = \frac{1}{\pi}\frac{S_n}{x_0 y_0} \qquad (13)$$

где S_n – площадь петли гистерезиса в координатах x, y; x_0, y_0 – координаты вершины петли гистерезиса.

Для измерения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика E используем тот факт, что основная кривая поляризации (кривая 0AB на рис. 24) является геометрическим местом точек вершин циклов переполяризации, полученных при различных максимальных значениях E_0 напряженности поля в образце. Для каждой ее точки можем записать соотношение $D = \varepsilon\varepsilon_0 E_0$, где D_0, E_0 – координаты вершин циклов переполяризации. Тогда, определив с помощью формул (9) - (11) значение D_0 и E_0 вершин нескольких циклов, можно найти значения ε при различных значениях E_0 согласно выражению:

$$\varepsilon = \frac{D_0}{\varepsilon_0 E_0} = \frac{C_2 h}{\sqrt{2}\varepsilon_0 S}\frac{K_y y_0}{V} \qquad (14)$$

и изучить зависимость ε = f(E).

Измерения и их обработка

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с описанием приборов, используемых в данной установке.

Подготовка установки к работе

1. Установить ручку «Per V» на панель модуля ФПЭ-02 в среднее положение.

2. Установить органы управления на панелях осциллографа PO в положение, обеспечивающее наблюдение фигур Лиссажу, измерение величины переменного напряжения и исследование зависимости между двумя внешними сигналами.
3. Подготовить к работе вольтметр PV.
4. Собрать схему согласно рис. 26.
5. После проверки схемы преподавателем или лаборантом присоединить все приборы к сети ~ 200 В, 50 Гц и включить тумблер «Сеть» на панелях всех приборов. На экране осциллографа должна появиться петля гистерезиса. Установить петлю гистерезиса на центральную часть экрана осциллографа.

Упражнение 1. **Определение тангенса угла диэлектрических потерь**

1. Получить петлю гистерезиса предельного цикла. Для этого повернуть в крайнее правое положение ручку «Per V» на панели модуля и подобрать, если это необходимо, такой коэффициент отклонения K_y осциллографа, чтобы кривая гистерезиса предельного цикла целиком размещалась в пределах экрана, занимая не меньше половины экрана (по вертикали).
2. Измерить координаты x_0 и y_0 вершины петли гистерезиса. Для этого, подводя каждую из вершин петли (точки A и C на рис.28) сначала к оси X, а затем к оси Y (центральным, градуированным линиям сетки экрана), определить их координаты $+x_0$ и $-x_0$, $+y_0$ и $-y_0$ и взять среднее арифметическое из модулей полученных значений. Записать значение коэффициента отклонения K_y при измерении y_0 .
3. Установить кривую гистерезиса симметрично относительно осей X и Y и перерисовать ее с экрана осциллографа на миллиметровую бумагу по точкам, снятым с помощью сетки экрана.
4. Определить площадь петли гистерезиса, используя рисунок, выполненный на миллиметровой бумаге.
5. Вычислить $tg\delta$ по формуле (14).

Упражнение2. **Определение остаточного смещения D_r, коэрцитивного поля E_c и спонтанной поляризации насыщения P_{smax}**

1. Установить петлю гистерезиса предельного цикла, полученную в упражнении 1, симметрично относительно оси Y. Измерить значение y_0 как половину высоты петли при x=0. Записать значение K_y, соответствующее этому измерению.

2. Установить петлю гистерезиса симметрично относительно оси X. Измерить значение x_0 как половину ширины петли при y=0 .
3. Продолжить линейные участки петли предельного цикла (AB и CD на рис.28) до пересечения с осью Y, используя рисунок петли, выполненный в упражнении 1, п.3. Измерить значение y_s как половину расстояния между точками пересечения экстраполированных участков с осью Y.
4. По формулам (9) и (10) рассчитать значения D_r; $P_{smax} \approx D_s$ и E_c.
5. Оценить погрешности измерения остаточного смещения D_r и коэрцитивного поля E_c

Указание. Значение параметров, необходимые для расчетов, и точность их задания указаны в паспорте установки.

Упражнение 3. **Получение основной кривой поляризации и изучение зависимости**

$$\varepsilon = f(E)$$

1. Для кривой гистерезиса предельного цикла, полученной в задании 1, п.1, измерить значения координат x_{0max} и y_{0max} вершины цикла (точки B на рис.28) по методике, описанной в том же упражнении 1, п.2. Записать значение коэффициента K_y при измерении y_{0max} .Определить по показанию вольтметра PV напряжение V.
2. Уменьшить напряжение V с помощью ручки «Per V» на панели модуля и получить петлю предельного цикла, соответствующую такому амплитудному значению E_0 напряженности поля, ниже которого предельный цикл исчезает (т.е. начинают изменяться площадь петли и координаты ее вершин). Для этой петли: а) определить по показанию вольтметра PV напряжение V; б) взять из упражнения 1, п. 2. значения x_0, y_0 и K_y.
3. Получить несколько частных циклов, уменьшая напряжение V ручкой «Per V» и изменяя значения коэффициента K_y осциллографа таким образом, чтобы каждая петля гистерезиса занимала не меньше половины экрана (по вертикали). Число частных циклов должно быть не менее пяти при различных значения коэффициента K_y.
4. Для каждого частного цикла: а) измерить координаты x_0 и y_0 его вершины; б) записать значения коэффициента K_y, при котором выполнено измерение y_0; в) снять показание V с вольтметра PV.
5. Построить основную кривую поляризации в координатах x, y.
6. По формулам (11) и (14) рассчитать значения E_0 и ε для всех исследованных циклов переполяризации.
7. Результаты всех измерений и расчетов занести в таблицу.
8. Оценить погрешности изменения ε.

9. Построить график зависимости ε = f (E).

V, В	x_0, дел	y_0, дел	K_y, В/дел	$\frac{K_y y_0}{V}$	E_0, 10^4 В/м	ε, 10^3	Δε, 10^3	(ε±Δε), 10^3

Это интересно

В 1600 году вышла первая научная книга по магнетизму и электричеству “О магните, магнитных телах и о большом магните - Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов”, написанная придворным лейб-медиком английской королевы Вильямом Гильбертом. Именно в этой книге впервые встречается слово “электрический”. Вот первое в истории употребление слова “электрический”: “электрические тела те, которые притягивают таким же образом, как янтарь”. В своей знаменитой книге Вильям Гильберт описывает некоторые исследования электризации трением. Его интересовал вопрос о зависимости электризации от природы тела. Гильберту удалось обнаружить, что электризуется не только янтарь, но и многие другие тела. При этом он разделил все тела на два класса — “электрики” и “неэлектрики”. К “электрикам”, т. е. к электризующимся телам, оказались отнесенными, помимо янтаря, алмаз, канифоль, смола, стекло, т. е., по современным представлениям, плохие проводники — диэлектрики. К классу “неэлектриков оказались отнесенными все металлы, т. е. "хорошие проводники”, что вполне естественно, поскольку Гильберт, натирая предметы, держал их в руке и таким образом уводил полученный ими заряд в землю.

Величие идей Гильберта и его заслугу перед своим временем сейчас даже трудно вообразить. Впервые в истории, задолго до Фрэнсиса Бэкона, считавшегося родоначальником “индуктивного” метода в науке, он провозгласил опыт критерием истины, и все положения проверял в процессе специально поставленных экспериментов. Галилео Галилей в следующих замечательных выражениях характеризует историческую роль Гильберта: “Воздаю хвалу, дивлюсь, завидую Гильберту. Он развил достойные удивления, идеи о предмете, о котором трактовало столько гениальных людей, но который ни одним из них не был изучен внимательно. Высочайшей похвалы заслуживает он, по мнению моему, за то, что произвел такое количество новых и точных наблюдений... От простейших вещей восходить к великим открытиям и под первыми ребяческими очертаниями предчувствовать скрытое удивительное искусство не дело дюжинных людей: такие прозрения и мысли принадлежат гениям сверхчеловеческой силы”.

Примерно около 1727 года начинаются экспериментальные исследования ''электричества”, предпринятые англичанином Стивеном Греем (1670—1735), вероятно, для заполнения своего досуга в те последние годы, когда он уже отошел от дел. Грей заинтересовался вопросом о

передаче “электричества” от одного предмета к другому. Заметим, что под “электричеством” в ту эпоху понимали не что иное, как “способность притяжения легких тел”. Грей обнаружил, что эта способность действительно передается по деревянному стержню или по металлической проволоке, но только в том случае, если эти линии передачи подвешивались на шелковых нитях, а не обычных веревках. Таким образом, Грею удалось передать “электричество” на расстояние 765 футов. Из этих опытов впервые было установлено существование различных тел, не передающих электричества и могущих служить для изоляции наэлектризованных предметов.

Французский физик Шарль Франсуа Дюфе (1698—1739) повторил и подтвердил результаты исследований Грея и установил принцип: “...Тела, наименее склонные сами становиться электрическими, легче всего притягиваются и переносят наиболее далеко и в наибольшей степени электрическую материю, между тем как тела, наиболее склонные сами становиться электрическими, наименее приспособлены воспринимать электричество от других и передавать его на значительные расстояния”. Дюфе рассматривает электричество как “способность притягивать легкие тела”, но, по-видимому, полагает, что эта способность обусловлена присутствием некой материи. Таким образом, он впервые делит все тела на проводники “электрической материи” (по Гильберту, “не электрические” тела) и на непроводники (по Гильберту, “электрические тела). Термины “проводник” и “изолятор” вводятся в науку несколькими годами позже (в 1739 г.) Жаном Теофилем Дезагюлье (1683—1744). В заключение отметим, что большое впечатление на современников ученого произвел эксперимент, который сам Грей описал так:

“8 апреля 1730 г. я произвел следующий опыт над мальчиком лет восьми-девяти... Я подвесил его горизонтально при помощи двух волосяных веревок, служащих для сушки белья. В балку моей комнаты, толщиною в один фут, были вбиты один против другого два крюка, а на расстоянии двух футов — другая пара их. Веревки эти я повесил на эти крючки за петли, так, что получилось нечто вроде качелей, которые отстояли *от* пола комнаты примерно на 2 фута. Мальчика положили на эти веревки лицом вниз, одна веревка охватывала его грудь, а другая его бедра. Фольгу положили на подставку, представлявшую собой круглую доску диаметром в 1 фут и с наклеенной белой бумагой; пьедестал ее имел в вышину 1 фут. Когда трубку потерли и подержали около ног мальчика, не прикасаясь к ним, то фольга притягивалась лицом мальчика настолько сильно, что поднималась на высоту 9, а иногда и 10 дюймов”.

В этом опыте как мы видим, был продемонстрирован эффект электризации через влияние и, кроме того, доказано, что человеческое тело обладает заметной проводимостью. Но главное, эксперимент Грея послужил как бы сигналом к исследованиям воздействия электричества на человека, особенно широко развернувшимся в XVIII в., после открытия конденсатора. Это направление электрических опытов привлекло очень широкое общественное внимание, электричество стало модным. В 40-е гг. об опытах Грея были написаны такие строки:

Безумный Грей, что знал ты, в самом деле,

О свойствах силы той, неведомой доселе?

Разрешено ль тебе, безумец, рисковать,

И человека с электричеством связать?

(Г. Бозе “Электричество в его возникновении
и открытиях, поэтическим пером описанное”)

ТЕМА №3.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Литература

[Р3]. Гл. XIV - XVI, XVIII, XIX.

[Р8]. §§ 31-33.

[Р12]. Гл. XI – XII.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Природа электрического тока в металлах. Причины электрического сопротивления.
2. Законы постоянного электрического тока.
3. Классическая электронная теория металлов. Пределы ее применимости. Основные положения квантовой теории металлов.
4. Эффект Холла.
5. Зонная теория твердых тел. Энергетические зоны металлов, полупроводников, диэлектриков.
6. Температурная зависимость проводимости металлов, полупроводников и электролитов.
7. Сверхпроводимость. Эффекты сверхпроводимости.
8. Объяснение сверхпроводимости на основании микроскопических моделей. Теория Бардина-Купера-Шриффера.
9. Высокотемпературная сверхпроводимость.

10. Электронная эмиссия. Работа выхода. Уравнение Богуславского-Лэнгмюра. Уравнение Ричардсона-Дэшмана.
11. Электропроводность газов. Основные виды газового разряда. Самостоятельный и несамостоятельный разряд. Теория Таунсенда.
12. Понятие о различных типах газового разряда. Тлеющий разряд. Искровой разряд. Коронный разряд. Молнии. Дуговой разряд. Плазма.
13. Контактная разность потенциалов. Выпрямляющее действие контактов.
14. Электропроводность электролитов. Температурная зависимость электропроводности электролитов.
15. Термоэлектрические эффекты: эффект Зеебека, эффект Пельтье, эффект Томсона.

Качественные вопросы

1. Где больше средняя скорость упорядоченного движения электронов: в нити горящей лампы или в проводах, подводящих к ней ток?
2. В полупроводниках концентрация заряженных частиц много меньше, чем в металлах. За счет чего же в случае последовательного соединения полупроводника с металлическим проводником сила тока в них одинакова?
3. Провода подключены к однородному металлическому шару в диаметрально противоположных точках. В каком сечении шара при пропускании через него электрического тока выделяется больше тепла?
4. Электролиз воды ведется с помощью двух тонких пластинчатых электродов, покрытых с одной стороны лаком. Через некоторое время катод начинает изгибаться. Почему?
5. Почему пусковой ток в лампочке накаливания больше рабочего?
6. Как отразится на работе плитки небольшое укорочение перегоревшей спирали при ремонте плитки?
7. Почему пространственный заряд в электронной лампе при разомкнутой анодной цепи и раскаленном катоде остается постоянным, хотя испарение электронов с катода происходит непрерывно?
8. Если взять проводник, состоящий из отдельных медных и железных проволок одинакового диаметра, соединенных последовательно, и пропустить через него ток (проводник подключить к сети через какой – либо реостат), то при этом одни участки нагреваются до красного каления, другие едва теплые. Как объяснить это явление и где оно используется на практике?
9. Спираль подсоединена к сети, вследствие чего она раскалена. Как изменится накал спирали, если на часть ее попадет вода?

10. На что расходуется энергия источников тока, если все элементы цепи неподвижны?
11. Почему электрические лампы чаще перегорают в момент замыкания тока и очень редко - в момент размыкания?
12. Почему плавкий предохранитель выходит из строя раньше, чем какой либо другой участок электрической цепи?
13. Елочная гирлянда спаяна из лампочек для карманного фонаря. При включении этой гирлянды в сеть на каждую из лампочек приходится напряжение 3 В. Почему же опасно, выкрутив одну из лампочек, сунуть в патрон палец?
14. Если на волоске электрической лампочки образовался изъян, то место изъяна накаливается сильнее остальной части волоска. Почему?
15. Какими физическими явлениями сопровождается протекание электрического тока по проводнику?
16. Наиболее вероятен удар молнии в те места, где поверхностный слой почвы лучше проводит электричество (например, болотистые места). Почему?
17. Почему дуга гаснет, если к ее пламени поднести сильный магнит?
18. Почему в разреженном газе возникает самостоятельный разряд при меньшем напряжении, чем в том же газе при нормальном давлении?
19. Искровой разряд может иметь форму тонкого шнура (особенно при большой силе тока). Какие же силы удерживают от расширения заполняющую канал искры горячую плазму?
20. В странах, где часто бывают грозы, было замечено, что сильный дождь часто начинается только после того, как первая молния «проскочит» между облаком и землей. Объясните, почему это так.
21. Пропустим ток одинаковой силы через провода равного сечения, но один провод «голый», а другой — «одетый» в изоляцию. Какой из проводов окажется более нагретым?

Как вы думаете

1. Какую роль сыграли философские взгляды Гальвани и Вольта в интерпретации знаменитых опытов Гальвани с лягушками?
2. Зависит ли свойство электропроводности тела от системы отчета, в которой тело рассматривается?
3. Является ли утверждение «медь - проводник» абсолютной истиной?
4. Следует ли из закона Ома, что материя существует в пространстве и во времени?
5. Является ли движение электрона в проводнике необходимым или случайным?

6. Наэлектризованность — статическое состояние, электрический ток — процесс. В чем связь и различие между состоянием и процессом? Как осуществляется переход от состояния к процессу? Является ли этот переход обратимым?
7. Каковы причинно-следственные связи, вызывающие движение электронов при включении в электрическую цепь источника питания?
8. Какую роль сыграл метод аналогий при выводе Омом носящего его имя закона?
9. От каких свойств проводников мы абстрагируемся, определяя их сопротивление?
10. В чем заключаются качественные и количественные различия между металлами и полупроводниками? Полупроводниками и диэлектриками?
11. Как использованы методы идеализации и моделирования при разработке классической электронной теории металлов?
12. Каковы границы применимости закона Ома и чем они обусловлены?
13. В чем заключается плодотворность модели «электронного газа»? В чем ее ограниченность?
14. Почему классические понятия, с помощью которых рассматривается сверхпроводимость, не совсем точно соответствует описываемым объектам?
15. В чем заключаются сущность и форма проявления эффекта Пельтье?

Проверь себя!

1. Электролитическая диссоциация в электролитах происходит
   a) под влиянием процессов, происходящих в самом электролите;
   b) под влиянием процессов, происходящих на электродах;
   c) под действием внешнего электрического поля.

2. Увеличение проводимости полупроводников с ростом температуры объясняется возрастанием
   a) концентрации носителей зарядов;
   b) подвижности носителей зарядов;
   c) концентрации и подвижности носителей зарядов.

3. Основным источником погрешностей при определении температурного коэффициента сопротивления является:
   a) погрешность измерительных приборов;
   b) конечная скорость теплообмена исследуемого образца с окружающей средой;
   c) изменение сопротивления образца в процессе измерений.

4. Сетка в тиратроне
   a) служит для регулирования силы анодного тока;
   b) предназначена для управления потенциалом зажигания тиратрона;
   c) не влияет на величину потенциала гашения тиратрона.

5. Термометр сопротивления можно использовать
   a) только при низких температурах;
   b) как при низких, так и при высоких температурах;
   c) только при высоких температурах.

6. Постоянная Холла
   a) не зависит от рода вещества и является универсальной константой;
   b) зависит от рода металла, температуры и знака носителей заряда;
   c) определяется только концентрацией электронов в данном металле.

7. Зависимость сопротивления электролитов от температуры объясняется:
   a) только зависимостью концентрации ионов от температуры, так как подвижность ионов от температуры не зависит;
   b) зависимостью коэффициента диссоциации и подвижности ионов от температуры;
   c) только зависимостью подвижности ионов и вязкости электролита от температуры.

Лабораторная работа №9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА

Цель работы: ознакомление с работой моста Уитстона и экспериментальная проверка с его помощью закона Ома.

Приборы и принадлежности: индикаторы нуля; магазины сопротивлений; вольтметры; амперметры; реостат-потенциометр; источник постоянного питания; ЛАТР; коммутатор.

Описание экспериментальной установки

Из закона Ома следует, что удельное сопротивление - величина постоянная, не зависящая ни от величины тока, ни от напряжения. В противном случае закон Ома не выполняется, т. е. функция I=f(U) носит нелинейный характер. Закон Ома выполняется для таких веществ, как металлы, электролиты, и нарушается при прохождении тока через контакт двух твердых тел с носителями зарядов разного знака (запирающий слой), а также для газов в широком диапазоне напряжений.

Справедливость закона Ома должна быть проверена опытным путем. Предположим, что закон Ома не выполняется, т. е. сопротивление данного проводника является функцией величины тока. Как известно, любую функцию можно представить в виде разложения в ряд по степеням аргумента. Для удельного сопротивления

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha j + \beta j^2 + \ldots) \qquad (1)$$

где α, β - коэффициенты, которые должны быть равны нулю если сопротивление не зависит от силы тока.

Слабое нарушение закона Ома проявилось бы в малом отклонении от линейной зависимости (в противном случае не было бы проблемы проверки закона), поэтому в разложении (1) можно ограничиться одним членом — линейным для асимметричного к направлению тока проводника и квадратичным в случае симметрии. Члены разложения (1) более высоких порядков можно не учитывать, потому что коэффициенты ряда (1) убывают тем быстрее, чем более гладкой является раскладываемая в ряд функция, разрывные же функции являются исключением, а не правилом в рассматриваемом круге явлений.

Рассмотрим два проводника, через которые протекает одинаковый ток (последовательное включение). Отношение их сопротивлений с учетом известных формул таково:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{\rho_{01} l_1 S_2}{\rho_{02} l_2 S_1}\left[1 + \alpha I f(l_{1,2}, S_{1,2}) + \beta I^2 f_2(l_{1,2}, S_{1,2}) + \ldots\right] = f(I) \qquad (2)$$

где l_1, l_2 — длины, S_1, S_2 — площади сечения проводников.

Из (2) видно, что отношение сопротивлений зависит от величины тока, если коэффициенты α и β отличны от нуля. Отношение сопротивлений можно измерить с несравненно более высокой степенью точности, чем сами сопротивления. Это измерение производится с помощью мостовой схемы (моста Уитстона), представленной на рис. 29 и используемой обычно для определения неизвестного сопротивления r_2 по известному эталонному r_3 в условиях равновесия моста. Если измерения покажут, что отношение r_1/r_2 не зависит от тока, значит, закон Омы выполняется.

Схемы экспериментальных установок представлены на рис. 29 и 30. Это обычные мостовые схемы с переменными сопротивлениями в трех плечах, а в одно плечо включается исследуемое

сопротивление. Одним исследуемым сопротивлением является катушка из металлической проволоки, другим — электролит в колбе с двумя электродами. При проверке справедливости закона Ома для металлического провода используется мост постоянного тока, а для электролита (во избежание поляризации электродов) — мост переменного тока промышленной частоты. В качестве индикатора нуля в мосте постоянного тока используется гальванометр, а для переменного тока — прибор типа «нуль-индикатор».

Измерения и их обработка

Упражнение 1. **Проверка закона Ома для металлических проводников.**

1. Собрать мост Уитстона согласно рис 29.
2. Вместо сопротивления r_2 включить исследуемую катушку с металлическим проводником.
3. Подать на мост наибольшее питающее напряжение при помощи реостата r (по указанию преподавателя).
4. Сбалансировать мост подбором сопротивлений r_1, r_2, r_4, т. е. добиться отсутствия тока в гальванометре Г.
5. Медленно понижая при помощи реостата напряжение питания, убедиться в сохранении равновесия моста (отсутствии тока в гальванометре).
6. Повторить п. 3 и 4 при других значениях напряжения.
7. Убедиться в сохранении равновесия моста при изменении направления тока.

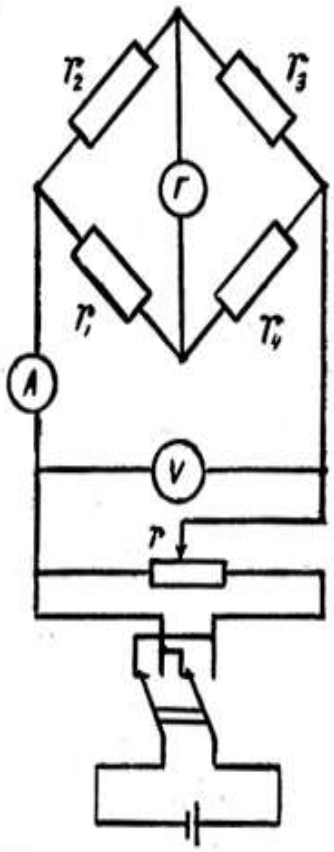

Рис. 29.

Упражнение 2**. Проверка закона Ома для электролитов.**

1. Собрать мост переменного тока согласно рис. 29.
2. Вместо сопротивления r_2 включить колбу с электролитом.
3. Повторить п. 3—5 задания 1, изменяя питающее напряжение при помощи автотрансформатора ЛАТР.

Упражнение 3**. Анализ работы мостовой схемы.**

1. Используя правила Кирхгофа, вывести из условия равновесия моста формулу связи между элементами, включенными в плечи моста.
2. Проанализировать возможные источники погрешностей при измерении неизвестного сопротивления с использованием моста и показать, что при прочих равных условиях погрешность минимальна, когда сопротивления соседних плеч равны.
3. Сделать вывод по заданиям 1, 2 о выполнимости закона Ома.

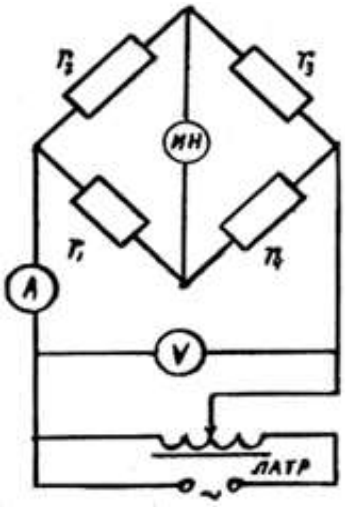

Рис. 30.

Лабораторная работа № 10.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ЭЛЕКТРОЛИТОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: исследование температурной зависимости сопротивления металлов и электролитов и определение температурного коэффициента сопротивления.

Приборы и принадлежности: исследуемые образцы металла и электролита, укрепленные на специальном держателе; водяная ванна; нагреватель; термометр, измерительный мост Уитстона; двойной ключ.

Описание экспериментальной установки

Электрическая схема экспериментальной установки изображена на рис. 31 Сопротивление определяется с помощью многофункционального универсального цифрового вольтметра, переключатель которого установлен в положение измерения сопротивлений.

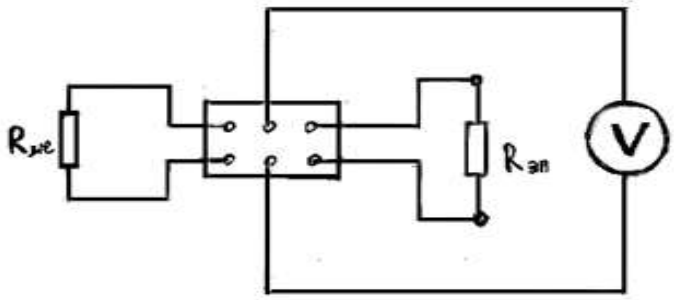

Рис. 31.

Исследуемые образцы металла и электролита заключены в специальные сосуды. Сосуд для электролита представляет собой U-образную стеклянную трубку, в которую вводятся не окисляющиеся металлические электроды, и заливается электролит. Спираль из изучаемого металла помещается в стеклянную пробирку или U-образную трубку. Сосуды с исследуемыми образцами монтируются на специальном держателе. Термостат для нагревания исследуемых сопротивлений представляет собой водяную ванну, в которую погружены сосуды с образцами, электрический нагреватель и мешалка. Измерение температуры осуществляется термометром.

Необходимо учитывать, что ввиду конечной скорости теплообмена исследуемые образцы принимают температуру окружающей среды не мгновенно, а с некоторым запаздыванием. С целью уменьшения погрешностей измерений нагрев производится достаточно медленно.

В процессе измерений определяется зависимость сопротивлений металла и электролита от температуры, а температурный коэффициент сопротивления рассчитывается по известной формуле:

$$\alpha = \frac{R_1 - R_0}{tR_0}$$

Измерения и их обработка

1. Залить в термостат охлажденную в холодильнике воду и бросить в нее несколько кусочков льда.
2. Собрать электрическую схему установки согласно рис.31
3. После того, как вода охладится до 0°С, измерить при этой температуре сопротивления металла и электролита
4. Включить электрический нагреватель и провести измерения сопротивлений металла и электролита через каждые 5 °С до 90 °С.
5. Выключить нагреватель термостата и произвести те же измерения в обратном порядке.
6. Окончив измерения, найти средние значения сопротивлений и α при каждой данной температуре, используя при этом результаты измерений, произведенных при восходящем и нисходящем ходах температуры в термостате.
7. Произвести математическую обработку результатов экспериментов.
8. Результаты измерений и расчетов занести в таблицы
9. Результаты экспериментов изобразить графически.

Лабораторная работа № 11.

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ

Цель работы: ознакомление с эффектом Пельтье и снятие зависимости величины перепада температур в спаях от силы тока и времени его протекания.

Приборы и принадлежности: исследуемая термопара; теплоизолированные сосуды; гальванометр; амперметр; выпрямитель; мензурка; секундомер; две проградуированные термопары.

Описание экспериментальной установки

Схема измерительной установки представлена на рис. 32. Все приборы и термопары подключаются к клеммам, выведенным на щит установки. Для проведения измерений концы исследуемой медь-константановой термопары выведены на клеммы (7, 8), на которые ключом $К_3$ подается напряжение от сети через систему ЛАТР-выпрямитель. Для измерения тока в цепи используется амперметр. Спаи термопар помещены в теплоизолированные сосуды I и II. Для измерения температуры воды в них используются предварительно проградуированные медь-константановые термопары. Переключение термопар на измерительный прибор (гальванометр) производится переключателем $К_2$.

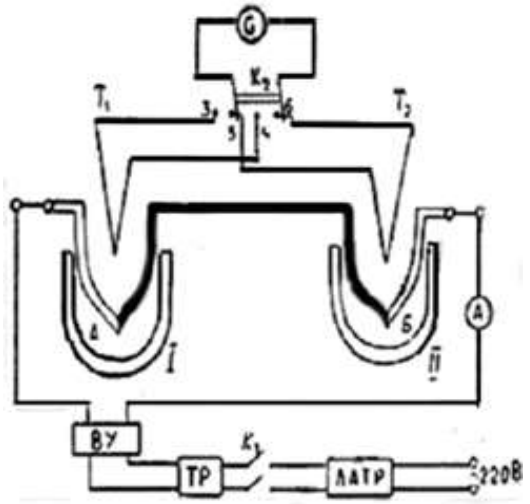

Рис. 32.

Эффект Пельтье состоит в том, что при пропускании тока через спай двух разнородных металлов в зависимости от направления тока в нем выделяется или поглощается тепло, которое пропорционально полному заряду, прошедшему в электрической цепи:

$$Q_П = ПIt \qquad (1)$$

Если тепло Джоуля—Ленца, выделяемое в обоих калориметрах, одинаково и

количества калориметрических жидкостей равны ($m_1 = m_2 = m$ и $P_1 = P_2 = P$), то (вывести самостоятельно)

$$Q_П = (cm + P) \cdot \Delta T / 2 \qquad (2)$$

т. е. тепло Пельтье пропорционально разности приращений температур $\Delta T = \Delta T_1 - \Delta T_2$ в обоих калориметрах.

Используя уравнения (1) и (2), можно написать:

$$\Delta T = 2\,ПIt/(cm + P) \qquad (3)$$

Полагая при небольших изменениях температур величину

$$2П/(cm + P) = k$$

постоянной, перепишем соотношение (3) в виде:

$$\Delta T = kIt \qquad (4)$$

Суть лабораторной работы заключается в проверке соотношения (4).

Измерения и их обработка

1. В теплоизолированные сосуды I и II налить с помощью мензурки одинаковое количество воды (указано на установке). Концы исследуемой термопары вывести на клеммы (7, 8), а измерительные термопары T_1 и T_2 подключить соответственно к клеммам (3, 4) и (5, 6). Спаи термопар опустить в сосуды с водой I и II.
2. Собрать электрическую схему установки согласно рис. 32.
3. Измерить начальные температуры T_1 и T_2 в сосудах. Для этого переключатель K_2 поставить сначала в левое, затем в правое положение и записать соответствующие показания гальванометра.
4. Если при этом гальванометр зашкаливает, то полярность подключения термопары можно изменить с помощью ключа K_4.
5. Пользуясь градуировочными графиками термопар, определить температуры T_1 и T_2.
6. Включить ключ K_3 и автотрансформатором установить в исследуемой термопаре ток 1 А. Одновременно включить секундомер.
7. Через каждые две минуты измерять новые значения температур в сосудах I и II.
8. Ток 1 А пропускать через термопару в течение 10 минут.
9. Из сосудов воду вылить, сосуды охладить до комнатной температуры, а затем снова налить в них воды.
10. Измерения п.п. 3—10 повторить, увеличивая каждый раз силу тока на 0,5 - 1 А.
11. Довести значение силы тока до 5 - 6 А.

12. По полученным данным построить графики зависимости ΔT = f(t) для всех значений тока и графики зависимости ΔT = f(I) при фиксированных значениях времени.
13. Определить тангенсы угла наклона соответствующих прямых и по формуле (4) определить k.
14. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.
15. Для обработки экспериментальных данных использовать ЭВМ.

Лабораторная работа № 12

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА [35]

Цель работы: познакомиться с холловским методом измерения индукции магнитного поля.

Приборы и принадлежности: ИП – источник питания; PV – цифровой вольтметр; ФПЭ-04 – модуль; С – соленоид; Ш – шток с нанесенной шкалой и закрепленным на торце датчиком Холла.

Метод измерения

Для экспериментального исследования напряженности магнитного поля на оси соленоида в настоящей работе используют метод, основанный на явлении Холла. Если через проводящую пластинку поперечным сечением $a \cdot h_д$ пропустить ток плотностью ***j*** и поместить ее в поперечное магнитное поле с индукцией ***B***, то перпендикулярно векторам $\vec{j}$ и $\vec{B}$ создается электрическое поля напряженностью $\vec{E}$ (рис. 33). Возникающая при этом разность потенциалов $\Delta\varphi_x$ (ЭДС Холла) пропорциональна величине тока и индукции магнитного поля:

$$\Delta\varphi_x = R_x jBa = R_x \frac{i_д B}{h_д}, \qquad (1)$$

где $i_д = jah_д$.

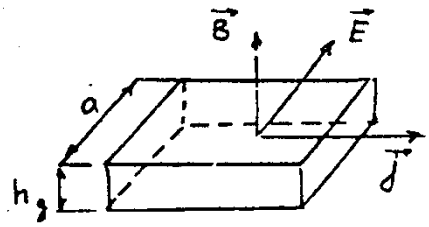

Рис. 33.

Коэффициент пропорциональности R_x называется постоянной Холла. В работе используется полупроводниковый датчик Холла марки X50I с управляющим током $i_д$=90 мА, поскольку постоянная Холла для полупроводников значительно больше, чем для проводников.

Силовые линии магнитного поля на оси соленоида направлены вдоль оси, поэтому датчик Холла должен располагаться на торце специального штока, вставляемого в соленоид. Толщина датчика $h_д$ в направлении магнитного поля равна 0,2 мм. Для измерения положения датчика внутри соленоида на боковой грани штока нанесена миллиметровая шкала.

При отсутствии магнитного поля ЭДС Холла должна быть равна нулю. Однако вследствие различных побочных явлений, например, недостаточно точной установки выходных электродов датчика, измерительный прибор может показать некоторую разность потенциалов даже при отсутствии тока в соленоиде. Для исключения погрешностей измерения проводят дважды при двух противоположных направлениях тока в соленоиде. Тогда $\Delta\varphi_x = \frac{1}{2}(\Delta\varphi_{x1} + \Delta\varphi_{x2})$. Однако в данной работе изменение направления тока в соленоиде не предусмотрено. Поэтому погрешность в определении $\delta\varphi_x$ указана в паспорте ФПЭ-04.

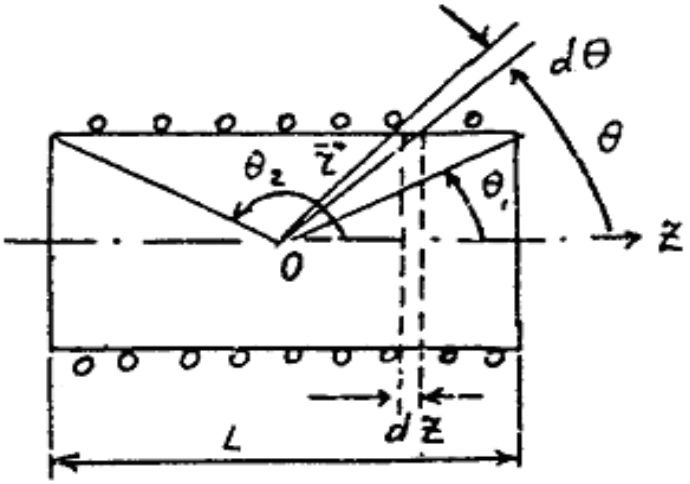

Рис. 34.

Рассмотрим вычисление напряженности магнитного поля соленоида, изображенного на рис. 34. Пусть на единицу длины соленоида, по которому течет ток I_c, приходится n витков, тогда на участке dz будет ndz витков, которые в точке O соленоида создадут напряженность (вычислить самостоятельно):

$$H_z = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{2} I_c n \sin\theta d\theta = \frac{1}{2} I_c n (\cos\theta_1 - \cos\theta_2). \qquad (2)$$

Для облегчения расчетов на рис. 35 отдельно изображен элемент dz, радиус-вектор $\vec{r}$ и углы θ и dθ.

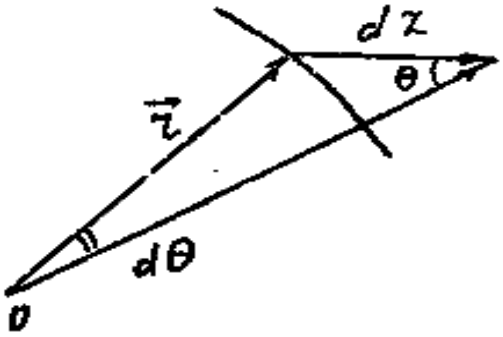

Рис. 35.

В случае бесконечного соленоида

$$\theta_1 = 0,\ \theta_2 = \pi,\ H_z = nI_c \qquad (3)$$

Измерения и их обработка

Упражнение 1**. Определение зависимости магнитной индукции в средней точке на оси соленоида и тарировка датчика Холла.**

1. Собрать схему, изображенную на рис. 36 и 37.
2. Поставить шток с датчиком Холла в среднее положение на оси соленоида («0» по шкале).
3. Включить источник питания и цифровой вольтметр в сеть 220 В.
4. Измерить ЭДС Холла в центре соленоида для токов 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 А, при этом из измеренного значения необходимо вычесть поправку $\delta\varphi_x$, указанную в паспорте. Данные занести в таблицу 1.
5. Вычислить индукцию магнитного поля для заданных значений силы тока I_c. Данные занести в табл. 1.
6. Вычислить значения постоянной Холла R_x для каждого измерения, используя формулу (1); данные занести в таблицу. Найти среднее значение R_x.
7. Построить графики зависимости $B = f(I_c)$ и $\Delta\phi_x = f(I_c)$ по данным табл. 1.

Таблица 1

№ измерения	Ток соленоида I_c, А	ЭДС датчика Холла $\Delta\varphi_x$, В	Индукция В, Тл	Постоянная Холла R_x, Вм/ТлА

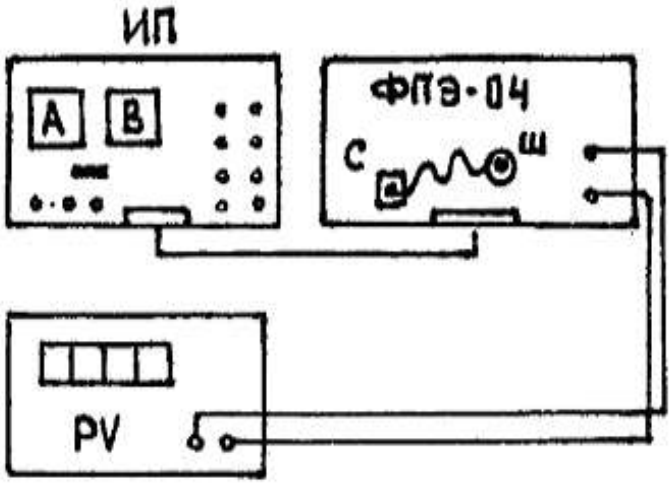

Рис.36.

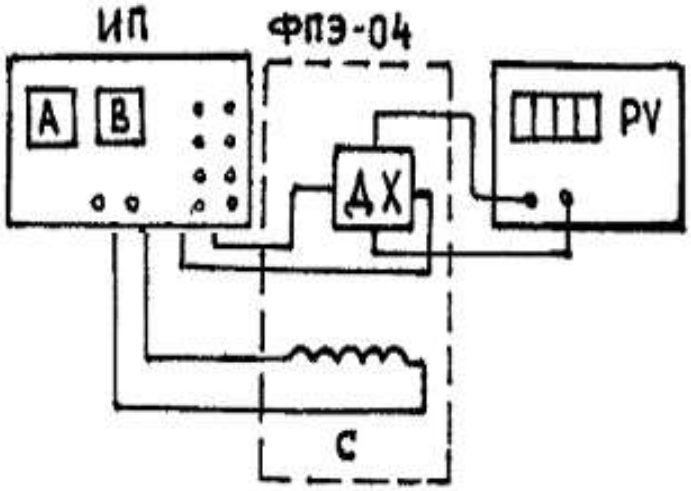

Рис. 37.

Упражнение 2. **Исследование зависимости индукции магнитного поля от координаты z, отсчитываемой от средней точки**

1. Установить величину тока в катушке соленоида по указанию преподавателя.

2. Перемещая шток с датчиком Холла вдоль оси соленоида с интервалом $\Delta z = 1$ см, измерить ЭДС Холла.
3. Полученные данные занести в таблицу 2.
4. Вычислить индукцию поля B для каждого положения датчика Холла по формуле (1). При расчете использовать значение R_x, полученное в упражнении 1. Данные занести в табл. 2.
5. Построить график зависимости B = f(z) по данным табл. 2.
6. Повторить измерения и расчеты по п.п. 2-5 для нового значения I_c (по заданию преподавателя).
7. Для одного из полученных значений B рассчитать абсолютную и относительную погрешность измерения.

Таблица 2

Положение датчика z, мм	110	100	90	80	…
ЭДС датчика Холла $\Delta\varphi_x$, В					
Индукция B, Тл					

Лабораторная работа № 13

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОНАПОЛНЕННОЙ ЛАМПЫ [35]

Цель работы: снятие вольтамперной характеристики газонаполненной лампы и изучение релаксационных колебаний.

Приборы и принадлежности: источник питания ИП; электронный осциллограф PO; звуковой генератор PQ, амперметр PA; магазин сопротивлений MC; магазин емкостей ME; модуль ФПЭ-12.

Описание экспериментальной установки

Электрическая схема установки собрана в модуле ФПЭ-12, включающем газонаполненную лампу (рис. 38, 39).

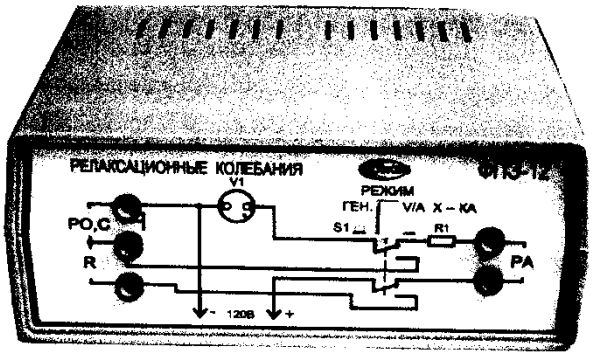

Рис. 38.

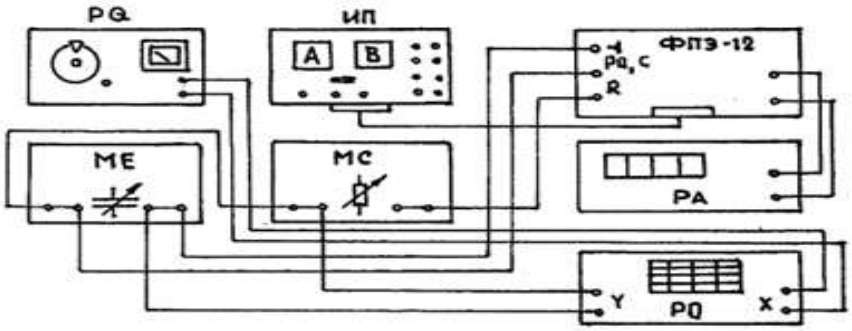

Рис. 39.

При отжатой кнопке "режим" реализуется схема получения вольтамперной характеристики газонаполненной лампы. При нажатой кнопке "режим" получается схема генератора релаксационных колебаний (рис. 40). Магазины емкостей МЕ и сопротивлений МС выполняют роль емкости С и сопротивления R генератора.

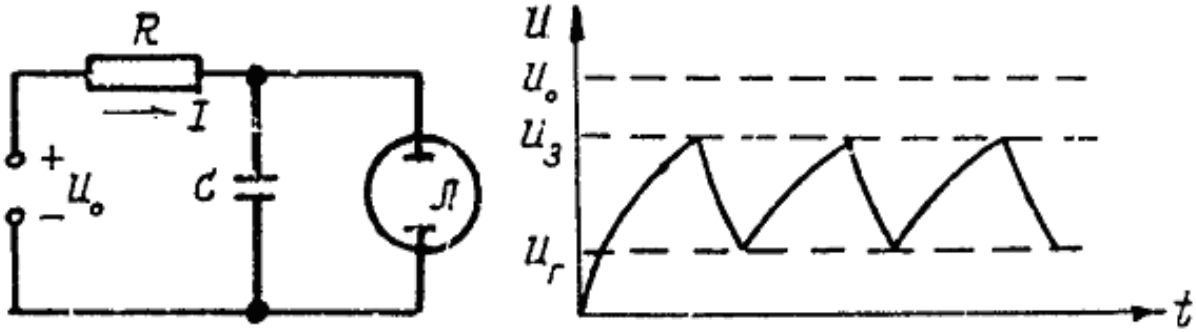

Рис. 40.

В работе определяется период релаксационных колебаний двумя способами. Первнй способ заключается в том, что сигнал от полученных в цепи релаксационных колебаний поступает на вход осциллографа и на экране последнего можно наблюдать изображение этих колебаний. Период можно измерить непосредственно с экрана при работе осциллографа в режиме измерения длительности сигнала.

Второй способ, более точный, заключается в том, что дополнительно на второй вход осциллографа поступает сигнал определенной частоты. В электронно-лучевой трубке происходит сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний: релаксационных колебаний лампы и синусоидальных колебаний, подаваемых на второй вход осциллографа. В результате на экране появятся фигура Лиссажу. Если частоты складываемых колебаний относятся как целые числа, то картина на экране неподвижна. Зная частоту подаваемого сигнала, по виду фигуры Лиссажу можно определить соотношение частот и частоту релаксационных колебаний.

В отличие от сложных гармонических колебаний фигура Лиссажу при соотношении частот 1:1 не имеет вид эллипса.

Измерения и их обработка

Собрать электрическую схему (рис. 39).

Упражнение I. **Снятие вольтамперной характеристики газонаполненной лампы**

1. Подготовить приборы к работе:
   Кнопку "режим" модуля ФПЭ-12 отжать. Ручку регулировки напряжения 120 В источника питания установить в крайнее левое положение. Измерительный прибор PA подготовить к работе в режиме, обеспечивающем измерение силы тока до 10 мА.
2. Включить лабораторный стенд, источник питания ИП и измерительный прибор PA.
3. Ручкой регулировки напряжения источника питания изменять напряжение от 40 до 120 В через 10 В и измерять силу тока $I_{пр}$. Записать во вторую строку табл. 1 значения силы тока $I_{пр}$.
4. Уменьшая напряжение от 120 до 40 В, замерить силу тока $I_{обр}$. Результаты занести в третью строчку табл. 1.
5. Определить напряжение зажигания и гашения лампы. Для этого выбрать из табл. 1 интервал напряжений, в котором лампа зажглась (погасла). В выбранном интервале, постепенно увеличивая (уменьшая) напряжение на 1-2 В, зафиксировать такое напряжение, при котором ток в лампе скачком увеличится от нуля до конечной величины (либо уменьшится до нуля). Это и будет напряжение зажигания (гашения).

6. Выключить измерительный прибор.
7. Построить график зависимости тока I от напряжения V.

Таблица 1

V, В	40	50	60	70	80	90	100	110	…
$I_{пр}$, мА									
$I_{обр}$, мА									

Упражнение 2. **Изучение работы генератора релаксационных колебаний**

1. Подготовить приборы к работе:

   Нажать на кнопку "режим" модуля ФПЭ-12. Установить на магазине сопротивлений R = $1 \cdot 10^6$ Ом. На магазине емкостей установить емкость C = $3 \cdot 10^{-3}$ мкФ. На источнике питания ручку регулирования выходного напряжения 120 В установить в крайнее левое положение. Осциллограф подготовить к работе в режиме измерения длительности сигнала.

2. Включить лабораторный стенд, источник питания и осциллограф. Установить ручкой регулировки напряжения источника питания 110 В, которое в дальнейшем поддерживать постоянным. Усиление по оси Y осциллографа установить таким, чтобы можно было измерять переменное напряжение до 1 В. Включить генератор развертки осциллографа и установить такую частоту развертки, чтобы на экране были видны одно-два релаксационных колебания.
3. Измерить с экрана осциллографа период релаксационных колебаний.
4. Измерить период релаксационных колебаний с помощью генератора сигналов PQ. Подготовить осциллограф к работе в режиме наблюдения фигур Лиссажу. Включить генератор PQ и установить выходное напряжение ~ I В и частоту ~200 Гц.
5. Выключить генератор развертки осциллографа. Плавно изменяя на генераторе PQ частоту выходного сигнала, получить на экране осциллографа фигуру Лиссажу, соответствугоисто соотношению частот 1:1. Записать значение частоты генератора PQ . Постепенно увеличивая частоту сигнала, получить фигуры Лиссажу, соответствующие отношениям частот 1:2 и 1:3. Записать значения этих частот. Рассчитать частоту релаксационных колебаний по формуле $f = f_n/n$, где f_n - частота сигнала генератора PQ, измеренная в первом, втором и третьем случаях; n=1,2,3 - отношение частоты сигнала генератора PQ к частоте релаксационных колебаний. Найти среднее значение f и рассчитать период релаксационных колебании: $T = 1/f$.
6. Выключить осциллограф, генератор сигналов, источник питания и лабораторный стенд.

7. Рассчитать погрешность определения периода релаксационных колебаний, полученных по п.п. 4-5, задаваясь погрешностью генератора сигналов из его паспортных данных (~1%).

Это интересно

Открытие, сделанное около двухсот лет назад анатомом из Болоньи Луиджи Гальвани (1737—1798), предшествовало целой серии замечательных экспериментов, проделанных сначала в Италии, а потом в других странах. Эти эксперименты, в конечном счете, изменили образ жизни человечества. Никакая другая область физики не оказала такого влияния на жизнь людей. Эксперименты, о которых идет речь, возвестили появление электрической промышленности — наиболее характерной черты современной цивилизации.

Итак, в конце 1780 года профессор анатомии Гальвани занимался в своей лаборатории изучением нервной системы отпрепарированных лягушек. Совершенно случайно, по рассеянности, одну из препарированных лягушек Гальвани положил на стол электрической машины. В это время в комнату вошла жена Гальвани. Ее взору предстала жуткая картина: при искрах в электрической машине лапки мертвой лягушки, прикасавшиеся к скальпелю, дергались. Жена Гальвани с ужасом указала на это мужу. Галантные болонцы всегда с удовольствием подчеркивают: не Гальвани, а его жена - автор столь важного открытия. Ей был даже посвящен сонет:

Ее открытьем кто не восхищался,

Умерших лягушачьих лапок жизнью быстрой,

Когда исторглись из машины искры,

А скальпель к нежным нервам прикасался.

А вот как сам Гальвани описывает историю своего открытия: “Я.. препарировал лягушку и положил ее на стол, на котором стенда электрическая машина. Как только один из моих помощников коснулся, совершенно случайно, кончиком скальпеля бедренных нервов лягушки, мышцы ее стали сокращаться. Другой помощник уверял, что эта произошло тогда, когда из кондуктора электрической машины была извлечена искра. У меня явилось страстное желание проверить это явление и выяснить, что за ним скрывается”.

Последовали многочисленные эксперименты, результаты которых Гальвани обобщил в опубликованном в 1791 году “Трактате о силах электричества при мышечном движении”. Гальвани провел, по сути дела, все эксперименты для того, чтобы сделать правильные выводы: он

показал, что для эффекта необходимы металлы; он показал, что при телах, не являющихся проводниками электричества, никакого эффекта нет; наконец, он показал даже, что разные металлы дают разный эффект. Все это должно было направить мысль Гальвани на размышления о роли двух разнородных металлов в наблюдаемом эффекте, и тогда эффект получил бы правильное истолкование. Десятки раз ведь он убеждался, что мышца сокращается, когда два разнородных металла вступают в соприкосновение с ней и одновременно друг с другом. Именно в этом и была суть его второго открытия. Гальвани же пришел к заключению, что источником электричества является сама лягушка, и решил, что открыл новый вид электричества, назвав его “животным”. Как-то он сказал, что “легко ошибиться в исследовании, если считать виденным и найденным то, что мы желали увидеть и найти”. Судьбе было угодно, чтобы он сам и совершил эту ошибку.

Простой и гениальный вывод из опытов Гальвани суждено было сделать его соотечественнику Алессандро Вольта (1745— 1827). Вольта относился с недоверием к так называемому “животному электричеству” и принадлежал к той группе физиков, которая считала, что такого электричества вообще не существует. И вот ему попадается на глаза трактат Гальвани. Трактат потрясает его. Вольта начинает сам ставить опыты и 3 апреля 1792 г. в письме к Гальвани пишет: “Признаюсь, я с неверием и очень малой надеждой на успех приступил к первым опытам: такими невероятными они казались мне, такими далекими от всего, что нам известно было об электричестве... Ныне я обратился, сам был очевидцем, сам производил чудное действие, и от неверия перешел, может быть, к фанатизму”. К фанатизму, но к благоразумному: в публичной лекции в университете Вольта рассказывает об опытах Гальвани, превозносит их, поет хвалу важности этого открытия и возможностям дальнейшего его развития, но вместе с тем начинает выдвигать требования количественной строгости при исследовании явления, ибо “что хорошего можно сделать с вещами", не приведенными к степени и мере, .особенно в физике? Как можно определить причину, если те определить не только качестве; но и количество и интенсивность явлений?”. От себя он замечает, что лягушка может представлять собой “электрометр в десятки раз более чувствительный, чем даже самый чувствительный электрометр с золотыми листочками”. Вольта заменяет лягушку собственным языком и ощущает, как он пишет, вкус электричества. На середину языка он кладет золотую монету или серебряную ложку, а к кончику языка прикладывает чистую оловянную пластинку и приводит ее в соприкосновение с монетой или ложкой. При этом он ощущает “такой же «кисловатый» вкус, что при приближении языка к кончику искусственно наэлектризованного проводника”. В июле 1792 года, через три месяца после того, как Вольта начал повторять опыты Гальвани, у него уже не оставалось былых сомнений: “Таким образом, металлы не только прекрасные проводники, но и двигатели электричества; они не только представляют легчайший путь прохождения электрического флюида, но сами же вызывают такое нарушение равновесия тем, что извлекают этот флюид и вводят его...”

Это известный закон контактных напряжений; два разнородных металла вызывают “нарушение равновесия” (сейчас говорят - создают контактную разность потенциалов) между обоими металлами. Установив этот закон, Вольта в результате длительной серии опытов располагает металлы в ряд (“ряд напряжений”), построенный так, что больший эффект соответствует металлам, более удаленным друг от друга в этом ряду.

Против этого чисто физического объяснения явлений, наблюдаемых в опытах с лягушками, возражал Гальвани. В последующем Гальвани пытался исключить из опытов металлические проводники, т. е. добиться сокращения мышц лягушки без применения физических средств. Вольта же искал способы исключить лягушку, т. е. найти физический метод обнаружения контактного электричества. Интересно, что оба они достигли цели, и поэтому каждый считал себя победителем в споре.

Годы жизни и открытий Л.Гальвани и А.Вольта приходятся на чрезвычайно интересную в историческом и культурном смысле эпоху. Вспомним основные события эпохи. 1775-1783 годы - война североамериканских колоний Англии за независимость; 1776 год - провозглашение Декларации независимости. В России правит Екатерина II; в 1773 - 1775 годах - крестьянская война под предводительством Емельяна Пугачева. I789 год - взятие Бастилии, начало Великой Французской буржуазной революции и революция в Бельгии. 1793 - - казнь Людовика XVI и установление якобинской диктатуры. 1794 - восстание Тадеуша Костюшко. 1796 - "Заговор равных" под руководством Ф.-Н. Бабефа. В 1768-I779 гг. Д. Кук открывает Новую Зеландию и Австралию. Во Франции в 1751-1776 гг. выходит великая "Энциклопедия наук, искусств и ремесел".

В Италии идет процесс "Рисорджименто" (или национального Возрождения). В Западной Европе это эпоха П.-О. Бомарше (1732--1799) и В. Альфиери (1749-I806), К. Гольдони (1707-1793) и К. Гоцци (I720-I806), Р. Бернса (1759-I796) и И. Г. Гердера (I744-I803), И.-В. Гете (1749-1832) и Ф. Шиллера (I759-1805); великих музыкантов и композиторов Л. Бетховена (1770-1827-) и В.А. Моцарта (1756-1791), И. Гайдна (1732-1809) и К.В. Глюка (I714-1787). Живопись эпохи прославлена именами Я.-Б.С. Шардена (I699-1779) и М.К. де Латура (1704-1788), Ж.-Б. Греза (1725--1805) и Ж.-О. Фрагонара (1732-1806), К.Л. Давида и Д. Рейнольдса, Т. Гейнсборо (1727-1788) и Ф. Гойя (1746-1828). В России творят Н.И. Новиков (1744-18Т8) и Д.И. Фонвизин (1745-1792), Г.Р. Державин (1743-1816) и А.Н. Радищев (1749-1802), И.А. Крылов (1769-1844) и Н.М. Карамзин (1766-1826), Ф.С. Рокотов (1732--1808) и И.П. Аргунов (1729-1802); в эту эпоху "в гранит оделася Нева, мосты повисли над водами" (А.С. Пушкин) ; развертываются крупные градостроительные работы, создаются бессмертные творения В.И. Баженова (1737-1799) и М.Ф. Казакова (1738--1812), Д. Кваренги (1744-1817) и Э.М. Фальконе (1716-1791). Это эпоха Ж.-П. Марата (1743-1793) и М. Робеспьера (1758-1794), Ж. Дантона (1759-1794) и Г. Потемкина (1739-1791). Это эпоха великих

философов и просветителей: Ф.-М. Вольтера (1694-1778) и Ж.-Ж. Руссо (1712-1778), И. Канта (1724-1804) и Г.-В.Ф. Гегеля (1770-1831), А. Сен-Симона (1760-1825), Р. Оуэна (1771--1851) и Ш. Фурье (1772-1837).

В эти годы начинается бурное развитие химии, за 1772-1791 гг. открывается целый ряд элементов, работают великие химики К.В. Шееле (1742-1786) и А.Лавуазье. Целый ряд замечательных открытий совершается в физике: в 1770г. Дж. Блэк вводит понятие теплоемкости; в 1777г. К. Шееле вводит понятие теплового излучения. 1782г. - Р. Гаюи открывает пьезоэлектричество, 1785г. - Ш. Кулон устанавливает закон взаимодействия электрических зарядов. 1786г. - Д. Риттенгаус создает дифракционную решетку. 1787г. - Ж. Шарль устанавливает газовый закон, носящий теперь его имя. 1798г. - Г. Кавендиш при помощи крутильных весов подтверждает закон всемирного тяготения Ньютона и вычисляет плотность Земли. 1796г. - выходит в свет труд П.С. Лапласа "Изложение системы мира", в котором содержится его гипотеза образования солнечной системы.

Каждое из перечисленных выше имен и событий вызывает у образованного человека целый поток ассоциаций. И вот на таком историческом и интеллектуальном фоне эпохи в 1791 году выходит "Трактат о силах электричества при мышечном движении" Луиджи Гальвани, в котором описывается открытие им электрического тока. Буря страстей, поднятая этим трактатом, по свидетельствам современников, была сравнима с политической бурей, вызванной поднимавшейся Французской революцией. А вот что писал об этом один из современников, автор курса физики аббат Аюи: "Изучение электричества, обогащенное трудами стольких знаменитых физиков, дошло, казалось, до такого предела, когда не может уже быть заметного движения вперед, а будущим работникам в этой области остается лишь надежда подтверждать открытия предшественников... И вот когда наука, казалось, приближается уже к состоянию покоя (это писалось, когда весь мир использовал для освещения свечу, лампаду или лучину), явление конвульсивных движений, подмеченных Гальвани в мускулах лягушки при соприкосновении их с металлами, привлекло к себе внимание и изумление физиков". А Вольта обнаружил возникновение контактной разности потенциалов при соединении разных металлов, и "этот факт превратился в его руках как бы в зародыш изумительного прибора, занявшего благодаря своей плодотворности одно из первых мест среди всех аппаратов, которыми гений человечества обогатил физику" (цит. по [42] - С.61). Опыты Гальвани и его представления о “животном электричестве” развились за прошедшие двести лет в стройное учение о биотоках живых организмов. Даже такие сложные процессы, как процесс запоминания, удалось объяснить с помощью электричества. За эти два века электричество спасло жизнь не одному человеку. Взять хотя бы случаи, когда остановившееся сердце больного, подстегнутое электрическим импульсом, вновь начинает биться. В ряде случаев электрический удар оказывается полезным при параличах. Многим

тысячам людей продлили полноценную жизнь различные методы электротерапии. И, наконец, прикладыванием электродов к телу ищут пули в теле раненого. И толчок всему этому дали опыты Гальвани. А теоретические и экспериментальные исследования Вольта привели к созданию в конце 1799 года первого в мире источника постоянного тока — “вольтова столба”, возвестившего наступление эры электричества. Весь мир был поражен удивительной простотой устройства столба и его необычайными возможностями. Французский физик Доминик Франсуа Араго писал: “Этот столб представляет собой прибор, чудеснее которого никогда не изобретал человек, не исключая телескопа и паровой машины”. Можно привести еще очень много фактов, свидетельствующих о популярности и значении открытия Гальвани и Вольта, но мы остановимся на стихотворении, в шутливой форме отражающем влияние этого открытия на мировоззрение современников:

Итак, узнал я наконец,

Тебя, Зевес самодержавный!

Узнал, что мир - большой глупец,

А ты - проказник презабавный!

Два металлических кружка

Да два телятины куска

С цепочкой медной за ушами -

Вот тайна молний и громов,

Которыми, как чудесами,

Ты нас снащал из облаков.

Гальвани с мертвою лягушкой

В лаборатории своей

Нам доказал, что ты людей

Всегда считал одной игрушкой!

Сын праха, слабый и глухой,

Под руководством гальванизма

Едва ль, Зевес почтенный мой,

Я не дойду до атеизма!

К чему мне ты? Я сам Зевес!

Перуны, молнии и громы

Мне без обманов и чудес

Теперь торжественно знакомы!

ТЕМА № 4.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Литература

[Р3]. Гл. XVIII, X, XI.

[Р8]. §§ 8 - 10, 35, 39 - 43, 47.

[Р11]. Гл. 5, 6.

[Р12]. Гл. VI, VII.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Магнитное взаимодействие токов. Закон Ампера.
2. Напряженность и индукция магнитного поля. Закон Био—Савара—Лапласа.
3. Некоторые простейшие примеры магнитных полей в вакууме.
4. Силы в магнитном поле.
5. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме. (Теорема о циркуляции вектора индукции магнитного поля.)
6. Магнитный поток. Теорема Гаусса для магнитного поля.
7. Магнитный момент элементарного тока.
8. Механическая работа в магнитном поле.

9. Контур с током в магнитном поле.
10. Энергия магнитного поля.
11. Магнитное поле в веществе. Природа молекулярных токов. Намагниченность.
12. Объяснение пара- и диамагнетизма.
13. Объяснение ферромагнетизма.
14. Условия для магнитного поля на границе раздела изотропных сред.
15. Магнитомеханическое и механомагнитное явления.

Качественные вопросы

1. Как изменится угол, на который в опыте Эрстеда отклоняется при включении тока магнитная стрелка, если, не меняя величины тока и расстояния провода от стрелки, сделать следующие изменения опыта: а) взять стрелку такого же размера, но намагниченную более сильно; б) взять стрелку более длинную; в) окружить провод железной трубой?
2. По длинному прямому металлическому проводу течет электрический ток. Можно ли избавиться от его магнитного поля, устремившись вдоль провода со скоростью, равной средней скорости упорядоченного движения электронов в нем?
3. Вдоль жесткого провода, по которому пропускается переменный ток от городской сети, расположена мягкая тонкая металлическая нить. В одном случае через нить пропускается также переменный ток от городской сети. В другом случае через нить пропускается постоянный ток. Что будет происходить с нитью в одном и в другом случаях?
4. На нитке висит вертикально гвоздик, недалеко от него установлен прямолинейный магнит. Как, не касаясь ни гвоздика, ни магнита, привести гвоздик в движение, заставить его качаться подобно маятнику?
5. Калий, кислород и многие другие вещества сохраняют свои магнитные свойства и после испарения. Почему не сохраняют свои магнитные свойства после перехода в парообразное состояние железо и другие ферромагнетики?
6. В поэме «О природе вещей» древнеримский философ Лукреций Кар пишет: «Видеть случалось мне, как прыгают в медных сосудах самофракийские кольца с железа опилками вместе, бурно бушуя, когда под сосудом камень магнитный, словно скорей убежать они жаждут от этого камня». Как объяснить описанное здесь явление? Будет ли оно происходить, если сосуд взять железный, а не медный?
7. В романе Жюля Верна «Пятнадцатилетний капитан» есть такое место: «...Негоро положил под компас железный брусок. Железо притянуло к себе стрелку компаса... стрелка сместилась на четыре румба... После того как из-под пакгауза был убран железный брусок,

стрелка компаса заняла вновь нормальное положение и указывала своим острием прямо на магнитный полюс». Объясните описанное явление.

8. Почему полярные сияния сопровождаются магнитными бурями?
9. Два одинаковых магнита одновременно начинают падать с одной и той же высоты через закрепленные проводящие кольца. Первый - через замкнутое кольцо, второй – через разомкнутое. Какой магнит упадет раньше?
10. Прямой постоянный магнит падает в замкнутое металлическое кольцо. Будет ли магнит падать с ускорением свободного падения?
11. На лист бумаги равномерно насыпаны металлические опилки. Этот лист помещают в магнитное поле. Если слегка постукивать по листу, то опилки расположатся в цепочки по направлению силовых линий. Для чего необходимо постукивать по листу? Почему опилки не просто ориентируются по полю, а соединяются в цепочки?
12. Одинаковую ли работу нужно совершить для того, чтобы вставить магнит в катушку, когда ее обмотка замкнута и разомкнута?
13. Имеется два одинаковых стальных стержня, один из которых намагничен. Как узнать, какой из них намагничен, не пользуясь ничем, кроме этих стержней?
14. Большую магнитную стрелку на подставке поднесли к нижнему, а затем верхнему концу штатива. Почему стрелка поворачивается к нижнему концу штатива с любой стороны южным полюсом, а к верхнему концу – северным полюсом?
15. Можно ли намотать катушку соленоида так, чтобы при подключении к нему источника постоянного тока на обоих концах соленоида были южные полюсы? Северные полюсы? Может ли стальной стержень иметь на обоих концах одинаковые магнитные полюсы? Может ли постоянный магнит иметь четное число магнитных полюсов? Нечетное число?
16. Незаряженное металлическое кольцо охладили до сверхпроводящего состояния и начали быстро вращать. Возникнет ли вокруг этого кольца магнитное поле?
17. Медицинский прибор для извлечения инородных тел из глаза представляет собой сильный электромагнит, питаемый постоянным или переменным током. Он позволяет, не прикасаясь к глазу, удалять из него железные и стальные частицы (опилки, стружки и т. п.). Каков должен быть график зависимости силы тока, питающего электромагнит, от времени, чтобы, не прикасаясь к глазу, можно было извлекать из него металлические предметы из неферромагнитных материалов (алюминия» меди и т. д.)?
18. Для измерения очень сильных токов часто используют стержни из магнитных материалов. Магнитное поле тока намагничивает их, и по величине остаточной намагниченности можно судить о величине тока. Такая методика используется, например, для измерения тока молний. При этом возникают, однако, такие проблемы. Во-первых, заранее неизвестно, куда ударит молния, во-вторых, интересно изучить распределение тока по

сечению канала молнии, в-третьих, одни и те же стержни хотелось бы использовать не один раз. Как решить эти проблемы?

19. Существуют ли на петле гистерезиса участки, которым можно формально приписать значения магнитной проницаемости, равные нулю, бесконечности и отрицательные?
20. Две катушки, по которым текут токи, взаимодействуют между собой с определенной силой. Как изменится сила взаимодействия катушек, если обе катушки свободно надеть на общий замкнутый железный сердечник?
21. При помощи магнита не только обогащают железную руду, но и очищают семена культурных растений от сорняков. Как это делается?

Как вы думаете

1. Могут ли потенциальные и вихревые поля превращаться друг в друга?
2. Какой характер имеет изменение напряженности магнитного поля в пространстве и во времени, непрерывный или дискретный?
3. Какой физической реальности соответствует положение о том, что силовые линии магнитного поля замкнуты?
4. Какой характер имеет магнитное поле: абсолютный или относительный?
5. Какие качественные и количественные эксперименты лежат в основе теории магнитного поля?
6. Можно ли сказать, что непрерывное в пространстве магнитное поле дискретно во взаимодействии?
7. Какую роль сыграли философские взгляды Эрстеда в постановке и интерпретации его знаменитого эксперимента?
8. Можно ли было предсказать результат опыта Эрстеда?
9. Какую роль сыграл опыт Эрстеда в становлении новой физической картины мира?
10. Имеет ли принцип суперпозиции магнитных полей пределы применимости?
11. В рамках какой структуры условий действует закон Ампера?
12. Связаны ли магнитные свойства вещества со свойствами пространства-времени?
13. Обладает ли теорема Лармора эвристическими свойствами?
14. Какую роль сыграл метод аналогии в разработке теории диэлектриков и теории парамагнетизма?
15. Вероятно ли в принципе существование в природе веществ, обладающих только ферромагнитными свойствами?

Проверь себя

1. Крутильные колебания рамки с током в магнитном поле являются гармоническими, так как
   a) угловое ускорение рамки пропорционально ее угловому отклонению;
   b) на нее действует постоянная сила;
   c) со стороны магнитного поля на рамку действует периодически изменяющаяся сила.

2. Силу, действие которой на магнитную стрелку вызывает ее гармонические колебания, можно определить из соотношения
   a) $\mathbf{F} = I\,[\boldsymbol{l} \times \mathbf{B}]$;
   b) $[\mathbf{r} \times \mathbf{F}] = [\mathbf{p}_m \times \mathbf{B}]$;
   c) $\mathbf{F} = (\mathbf{p}_m \operatorname{grad})\mathbf{B}$.

3. Взаимодействие элементов тока
   a) в общем случае подчиняется третьему закону Ньютона;
   b) в общем случае не подчиняется третьему закону Ньютона;
   c) подчиняется третьему закону Ньютона только при условии, что создаваемое ими поле однородно.

4. Напряженность магнитного поля на оси у конца катушка
   a) равна напряженности поля в центре соленоида, так как магнитное поле соленоида является однородным;
   b) больше напряженности поля в центре соленоида, так как у концов соленоида расположены его полюсы, а у полюсов силовые линии сгущаются;
   c) меньше напряженности поля в центре соленоида, так как у концов соленоида магнитное поле рассеивается.

5. Магнитная стрелка тангенс-гальванометра
   a) должна быть короткой, чтобы в расчетах можно было использовать значение напряженности магнитного поля *в* центре кругового тока;
   b) должна быть длинной, чтобы обеспечить достаточную точность отсчета углов отклонения;

c) может быть любых размеров, так как ее геометрия не входит в расчетные формулы.

6. Величина и степень неоднородности магнитного поля планеты
   a) не оказывают заметного влияния на формы развития цивилизации на ней;
   b) могут оказать влияние на развитие форм технической цивилизации, не влияя заметным образом на формы биологической цивилизации;
   c) могут существенным образом повлиять на формы развития биологической цивилизации.

7. Космические аппараты для исследования планет с сильным магнитным полем необходимо изготавливать из
   a) ферромагнитных материалов для обеспечения магнитной защиты приборов;
   b) диа- и парамагнитных материалов, слабо намагничивающихся в поле планеты;
   c) диэлектрических материалов для обеспечения маневренности аппарата.

Лабораторная работа № 14

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАТУШКИ

Цель работы: знакомство с одним из методов изучения магнитного поля.

Приборы и принадлежности: источник питания; соленоид; измерительная катушка; микроамперметр.

Описание экспериментальной установки

Измерение индукции магнитного поля на оси соленоида можно осуществить с помощью установки, схема которой приведена на рис. 41. В основу метода измерений положено явление электромагнитной индукции: Измерительная катушка с известным числом витков N подключается к микроамперметру и располагается на оси соленоида таким образом, чтобы плоскость ее витков

была перпендикулярна силовым линиям магнитного поля. Если магнитное поле в соленоиде создается переменным током, изменяющимся по закону $i = I_0 \sin\omega t$, то магнитное поле соленоида

$$B = B_0 \sin\omega t.$$

В этом случае в измерительной катушке индуцируется э. д. с.

$$\varepsilon_i = NSB_0\omega \cos\omega t = \mathcal{E}_0 \cos\omega t,$$

где

$$\mathcal{E}_0 = NSB_0\omega \qquad (1)$$

С другой стороны,

$$\mathcal{E}_0 = I(R + R_0), \qquad (2)$$

где I — ток в измерительной катушке, R - сопротивление катушки, R_0 —сопротивление прибора. Сравнивая (1) и (2), получим:

$$B_0 = I(R + R_0)/(NS\omega) \qquad (3)$$

Параметры измерительной катушки указаны на установке.

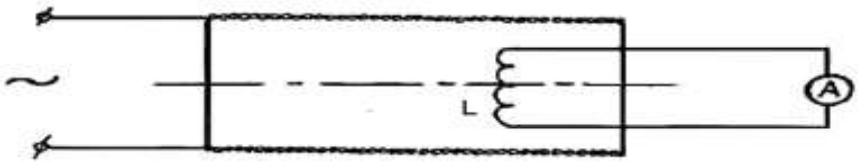

Рис. 41.

Измерения и их обработка

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 41.
2. Включить цепь питания соленоида.
3. Перемещая измерительную катушку вдоль оси соленоида, через каждые 2,5 см фиксировать величину индуцируемого в ней тока.
4. Вычислить соответствующие фиксированным точкам значения магнитной индукции по формуле (3).
5. Построить график зависимости $B_0 = f(x)$.
6. Измерения п.п. 2-5 повторить при нескольких значениях силы тока, текущего через соленоид.
7. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Лабораторная работа № 15.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ТАНГЕНС-ГАЛЬВАНОМЕТРА

Цель работы: практическое освоение магнитометрического метода измерения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр; источник постоянного тока; амперметр; реостат; ключ и переключатель.

Описание экспериментальной установки

Горизонтальную составляющую магнитного поля Земли определяют с помощью прибора, называемого тангенс-гальванометром. Он состоит из катушки - нескольких круговых проводников, расположенных вертикально в плоскости магнитного меридиана (диаметр проводников и число витков указываются на приборе). В центре помещается магнитная стрелка. Она должна быть малой, чтобы можно было принимать действующую на полюса стрелки индукцию равной индукции в центре кругового тока. Плоскость контура устанавливается перпендикулярно горизонтальной плоскости так, чтобы она совпала с направлением магнитной стрелки. Ток, протекающий по контуру, создает магнитное поле $\mathbf{B_к}$, действующее на магнитную стрелку и направленное перпендикулярно горизонтальной составляющей земного поля $\mathbf{B_г}$ (рис. 42). Под действием горизонтальной составляющей индукции поля Земли и напряженности поля контура стрелка установится по направлению равнодействующей индукции $\mathbf{B_р}$. Из рис. 42 видно, что

$$B_к = B_г \, tg\varphi \qquad (1)$$

Индукция магнитного поля контура $B_к$ в центре равна:

$$B_к = \mu_0 NI/(2r), \qquad (2)$$

где N — число витков контура, I — ток, протекающий в контуре; r —радиус контура.

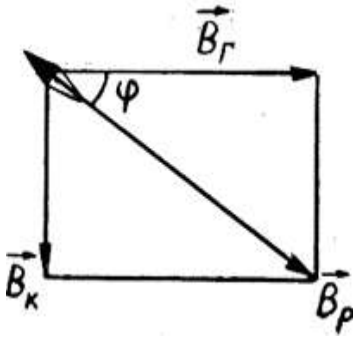

Рис. 42.

Из (1) и (2) следует:

$$B = \mu_0 NI/(2r\ tg\phi) \qquad (3)$$

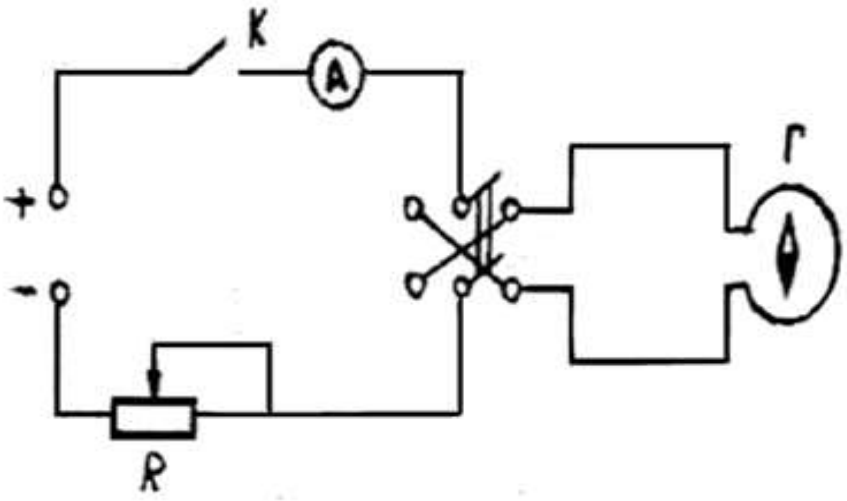

Рис. 43.

Для данного места Земли и данного прибора

$$C = I/tg\varphi$$

является постоянной величиной и называется постоянной тангенс-гальванометра. Тогда

$$B_г = \mu_0(N/2\ r)C \qquad \textbf{(4)}$$

Следует помнить, что формула (4) является приближенной, т.е. верной только в том случае, когда размер магнитной стрелки много меньше радиуса контура r. Наименьшая ошибка при измерениях получается при углах отклонения стрелки ≈ 45^0. В работе используется тангенс-гальванометр, для которого r = 0,15 м, N = 1. В центре прибора установлен компас.

Измерения и их обработка

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 43. Поворачивая подставку тангенс-гальванометра, установить витки его катушки в плоскости магнитного меридиана.
2. Включить ток и установить с помощью реостата силу тока 1 А.
3. Как только стрелка компаса придет в равновесие, отсчитать по круговой шкале компаса угол отклонения стрелки ϕ_1.
4. Не меняя величины тока, изменить переключателем его направление и измерить величину отклонения стрелки - угол ϕ_2. Взять среднее значение угла ϕ.
5. Повторить измерения п.п. 3, 4 при токах 1,5 А, 2,0 А, 2,5 А, 3 А. Величину тока изменяют, меняя положение движка на реостате.
6. Подставляя последовательно измеренные значения tgϕ и I, находят значения постоянной тангенс-гальванометра С.
7. Взяв среднее значение С, по формуле (4) определяют горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

Лабораторная работа №16.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Цель работы: определение точки Кюри образцов методом электромагнитной индукции.

Приборы и принадлежности: нагревательная печь. автотрансформатор, амперметр, ламповый милливольтметр, измерительная катушка, термопара, термоэлектрический пирометр, набор образцов.

Описание экспериментальной установки

Большинство методов определения точки Кюри ферромагнетиков основано на регистрации резкого падения намагниченности исследуемого образца при нагревании его до температуры Кюри. Метод электромагнитной индукции основан на изменении электродвижущей силы индукции в катушке, которая охватывает исследуемый образец, находящийся в переменном магнитном поле постоянной амплитуды. Измерить точку Кюри можно с помощью схемы рис. 44.

Здесь трубка с образцом О помещена в нагревательную печь. Обмотка печи N_2 является одновременно и намагничивающей обмоткой, создающей переменное магнитное поле. Концы

измерительной катушки N_1 замкнуты на ламповый милливольтметр В3—2А. Первичная обмотка отделена от вторичной слоем теплоизолирующего материала.

Обмотка печи, измерительная катушка и образец представляют собой трансформатор, роль сердечника в котором играет образец. Напряжение на первичной обмотке, т. е. на обмотке печи, таково:

$$U_1 = U_R + U_L,$$

где $U_R = i_1R_1$ — падение напряжения на омическом сопротивлении первичной обмотки, $U_L = - \varepsilon_1$ — падение напряжения на индуктивном сопротивлении, численно равное э. д. с. индукции, возникающей в первичной цепи. Таким образом,

$$\varepsilon_1 = i_1R_1 - U_1 \qquad (1)$$

С другой стороны,

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} N_2, \qquad (2)$$

где Φ_1 — магнитный поток, пронизывающий один из витков первичной обмотки, N_2 — число витков первичной обмотки.

Магнитный поток, пронизывающий каждый из витков вторичной обмотки, равен $\Phi_2 = k\Phi_1$, где k — коэффициент, учитывающий разницу сечений первичной и вторичной обмоток.

Для э.д.с. индукции во вторичной обмотке находим:

$$\varepsilon_2 = -\kappa \frac{d\Phi_1}{dt} N_1 \qquad (3)$$

где N_1 — число витков во вторичной обмотке.

Из выражений (2) и (3) следует, что

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{N_1}{N_2},$$

или, учитывая выражение (1), получаем:

$$\varepsilon_2 = k \frac{N_1}{N_2} (i_1R_1 - U_1), \qquad (4)$$

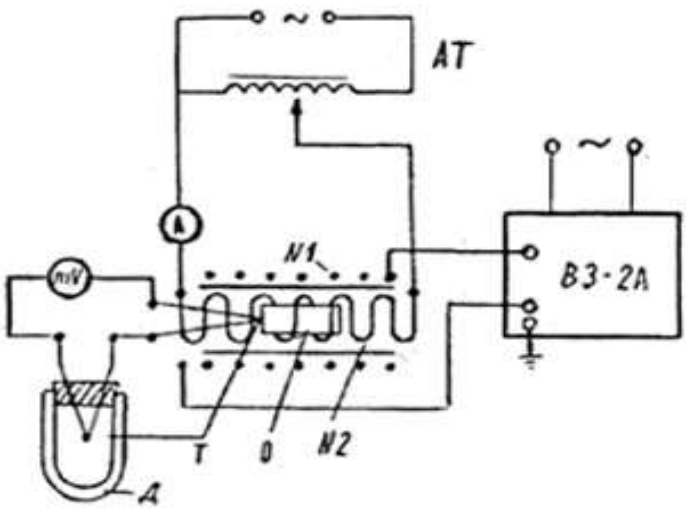

Рис. 44.

откуда следует, что когда температура образца достигает точки Кюри, коэффициент самоиндукции, а, следовательно, и индуктивное сопротивление первичной обмотки резко уменьшаются и практически становятся равными нулю. Поэтому в точке Кюри $\varepsilon_2 \approx 0$.

Температура образца измеряется с помощью термопары Т (хромель—никель или медь—константан) и пирометрического милливольтметра типа МПП. Рабочий конец термопары вместе с образцом помещен в печь, а свободный конец находится в сосуде Дьюара (Д) при постоянной температуре.

Следует помнить, что при температуре свободных концов термопары выше нулевой прибор покажет заниженную по сравнению с действительной температуру образца. Поэтому в процессе измерения к показанию прибора необходимо прибавлять температуру свободных концов термопары или перед началом работы с помощью корректора установить стрелку милливольтметра на деление, соответствующее температуре свободных концов.

Измерения и их обработка

1. Собрать схему согласно рис. 44.
2. Включить ламповый вольтметр в сеть и дать ему прогреться в течение 10 мин. Переключатель пределов измерения поставить в положение «300 В» и установить указатель на нуль ручкой «Установка нуля». Затем переключатель пределов измерения поставить в положение «Калибровка» (под шлиц), установить стрелку прибора на отметку «10» верхней шкалы.
3. Образец вставить в центр печи.
4. С помощью автотрансформатора установить электрический ток в первичной обмотке (1,5 А).

5. Записать температуру (°С) по показаниям милливольтметра и э.д.с. индукции по соответствующей шкале лампового милливольтметра.
6. Нагревание образца производить до тех пор, пока после крутого спада э.д.с. индукции практически не перестанет уменьшаться. После этого печь отключить от источника тока.
7. Повторить измерения для других образцов с более высокой точкой Кюри.
8. Построить графики зависимости $\varepsilon_2 = f(t)$ для всех образцов. Из графиков при помощи экстраполяции области крутого спада кривой на прямую — продолжение участка кривой выше точки Кюри — определить точки Кюри исследуемых ферромагнитных образцов.
9. Произвести оценку погрешностей при графическом определении температуры Кюри.

Лабораторная работа № 19.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАГНЕТИКОВ С ПОМОЩЬЮ МОСТА МАКСВЕЛЛА

Цель работы: изучение мостового метода магнитных измерений.

Приборы и принадлежности: источник переменного напряжения; эталонная катушка индуктивности; реохорд; набор тороидальных образцов с обмотками; индикатор нуля.

Описание экспериментальной установки

Мостовые методы определения магнитных характеристик в переменных магнитных полях в основном используются для исследования магнитомягких материалов. В практике применяется несколько различных мостовых схем. Так, для измерения относительной магнитной проницаемости магнетиков можно использовать мост Максвелла (рис. 45).

Здесь L_x и R_x — коэффициент самоиндукции и омическое сопротивление обмотки тороида, L и R — то же соответственно для образцовой катушки, АВ — реохорд длины l для уравновешивания моста, l_1 и l_2 — плечи реохорда.

Для индикации равновесия моста можно использовать осциллограф или вибрационный гальванометр ВГ. С помощью движка реохорда можно добиться такого положения, что ток, проходящий через гальванометр, становится равным нулю, и при равновесии моста можно написать следующее равенство (вывести самостоятельно):

$$\sqrt{\frac{R_x^2 + \omega^2 L_x^2}{R^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{l_1}{l - l_1}$$

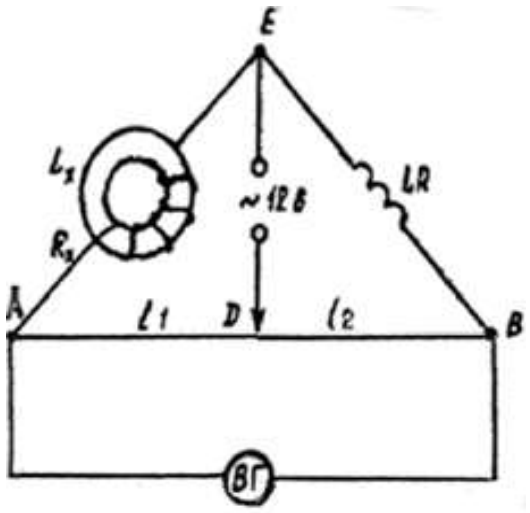

Рис. 45.

Отсюда:

$$L_x = \frac{1}{\omega}\sqrt{\left(\frac{l_1}{l-l_1}\right)^2 (R^2+\omega^2 L^2) - R_x^2} \qquad (1)$$

Известно, что индуктивность тороидальной катушки

$$L_x = \mu_0 \mu \frac{N_x^2}{l_m} S \qquad (2)$$

Здесь S — площадь сечения тороида, l_m — длина средней линии тороида.

Из (2) получим:

$$\mu = \frac{L_x l_m}{\mu_0 N_x^2 S} \qquad (3)$$

Измерения и их обработка

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 45.
2. Перемещением движка реохорда добиться равновесия моста.
3. Измерив плечи реохорда, по формуле (1) вычислить L_x, а по формуле (3) — магнитную проницаемость образца.
4. Проделать измерение μ для нескольких образцов.
5. Произвести оценку погрешностей.

Замечание. Необходимые для вычисления номиналы указаны на образцовой катушке и образцах.

Лабораторная работа №18.

ИЗУЧЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ [35]

Цель работы: изучение гистерезиса ферромагнитных материалов, расчет и графическое построение основной кривой намагничивания, расчет работы перемагничивания и коэрцитивной силы.

Приборы и принадлежности: звуковой генератор PQ, электронный осциллограф PO, модуль ФПЭ-07.

Методика измерения

Принципиальная схема установки приведена на рис. 46.

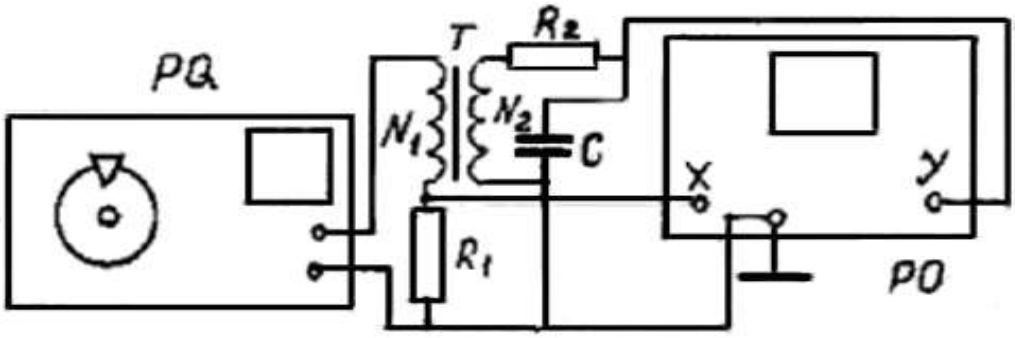

Рис. 46.

Исследуемый образец выполнен в виде тороидального трансформатора Т, первичная обмотка которого содержит N_1 витков, а вторичная – N_2 витков. Напряжение на первичную обмотку трансформатора Т подается с выхода звукового генератора PQ через сопротивление R_1. Вторичная обмотка трансформатора последовательно соединяется с сопротивлением R_2 и конденсатором С. С сопротивления R_1 на вход усилителя горизонтального отклонения осциллографа PO подается напряжение U_x, пропорциональное напряженности магнитного поля Н. На вертикальный вход “y” с конденсатора С подается напряжение U_y, пропорциональное

индукции магнитного поля B. При радиусе витка обмотки $r_в << r_т$ радиуса тороида напряженность H в тороиде

$$H = \frac{N_1}{2\pi r_T} I_1 \qquad (1)$$

где $r_т = (r_1 + r_2)/2$; $r_1 = d_1 / 2$; $r_2 = d_2 / 2$.

Так как падение напряжения на сопротивлении R_1 $U_x = I_1 R_1$, то с учетом (1)

$$U_x = \frac{2\pi r_T R_1 H}{N_1} \qquad (2)$$

U_x определяется по коэффициенту отклонения электронного луча по горизонтальной оси R_x:

$$U_x = k_x x \qquad (3)$$

С учетом (3) выражение для H может быть записано в виде

$$H = \frac{N_1 k_x x}{2\pi R_1 r_T} = \alpha k_x x \qquad (4)$$

По закону Фарадея ЭДС индукции во вторичной обмотке

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{dB}{dt} S_2 \qquad (5)$$

где Ф – поток вектора магнитной индукции через один виток ; S_2 – площадь поперечного сечения тороида.

По закону Ома для вторичной обмотки получаем

$$\varepsilon_1 = U_c + I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} \qquad (6)$$

где U_c - напряжение на конденсаторе; I_2 – ток во вторичной обмотке ; L_2 – индуктивность вторичной обмотки .

Так как L_2 очень мало, а $I_2R_2 >> U_c$, уравнение (6) может быть записано с учетом (5) в следующем виде:

$$-N_2 \frac{dB}{dt} S_2 = I_2 R_2 ,$$

откуда:

$$I_2 = -\frac{N_2 S_2}{R_2}\frac{dB}{dt} \tag{7}$$

Учитывая (7), найдем напряжение U_y , равное напряжению на конденсаторе:

$$U_y = U_c = \frac{q}{C} = \frac{\int_0^t I_2 dt}{C} = -\frac{N_2 S_2}{R_2 C}\int_0^B dB = -\frac{N_2 S_2 B}{R_2 C} \tag{8}$$

где q – заряд на обкладках конденсатора.

Если известен коэффициент отклонения луча k_y по вертикали, то:

$$U_y = k_y y \tag{9}$$

Из выражений (8) и (9) получаем:

$$B = \frac{R_2 C U_y}{N_2 S_2} = \frac{R_2 C k_y y}{N_2 S_2} = \beta k_y y \tag{10}$$

Подав одновременно напряжения U_y и U_x на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины, получим на экране осциллографа петлю гистерезиса.

По площади петли можно найти работу перемагничивания, отнесенную к единице объема. Малое изменение объемной плотности энергии магнитного поля

$$dw_n = Hd(\mu\mu_0 H) = HdB \tag{11}$$

Работа $dA_п$ расходуется на изменение внутренней энергии единицы объема ферромагнетика. За полный цикл перемагничивания

$$A_n = \frac{N_1 R_2 C k_x k_y}{2\pi r_T R_1 N_z S_2} S_n \tag{12}$$

где $S_п$ – площадь петли гистерезиса; $S_2 = (r_1 - r_2)b$.

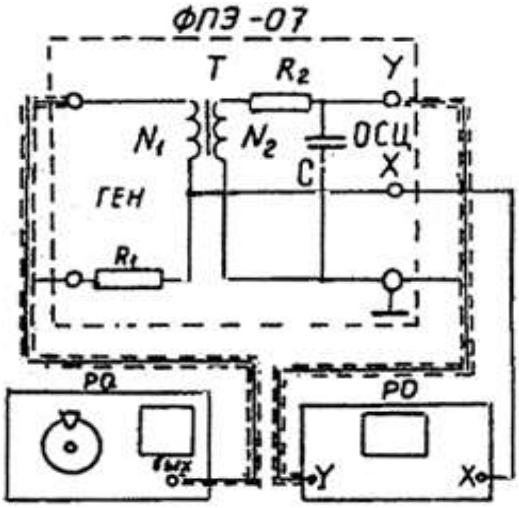

Рис. 47.

Измерения и их обработка

Упражнение 1**. Определение основной кривой намагничивания.**

1. Установить на стенде приборы, указанные на рис. 47.
2. Ознакомившись с описанием установки и методом измерения, соединить приборы в соответствии со схемой, изображенной на рис. 47.
3. Ознакомиться с работой звукового генератора PQ и электронного осциллографа PO в режиме измерения фигур Лиссажу.
4. Подготовить приборы к работе:

   а) установить следующие параметры выходного сигнала звукового генератора: 2 кГц - частота; 0 В - выходное напряжение;

   б) отключить развертку на осциллографе PO.

5. Включить лабораторный стенд и приборы. Установить луч в центре экрана осциллографа, после чего, регулируя величину выходного напряжения на звуковом генераторе и усиление по оси Y, установить максимальную петлю гистерезиса, соответствующую магнитному насыщению образца, в пределах экрана. Уменьшая величину выходного напряжения, получить семейство петель гистерезиса (рис. 48) - не менее 5 петель.

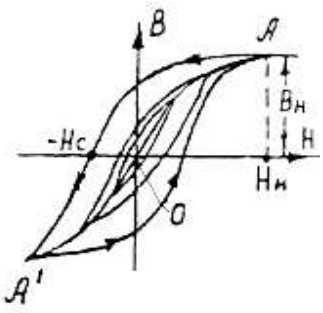

Рис. 48.

Для каждой петли снять координаты "x" и "y" ее вершины и записать их в таблицу (можно скопировать их на кальку с экрана):

№ петли	x, м	y, м	U_x, В	U_y, В	H, А/м	ΔH, А/м	B, Тл	ΔB, Тл

6. По формулам (4) и (10) вычислить значения напряженности H и индукции B вершин каждой петли гистерезиса и записать их в таблицу. Значения d_1, ,d_2, N_1, N_2, R_1, R_2 и b указаны на панели модуля ФПЭ-07.
7. Оценить доверительную границу случайной погрешности измерения H и B при доверительной вероятности P=0,9, связанную с погрешностью величин k_x, k_y, x, y. Погрешность измерения величин H и B определяется:

   а) приборными погрешностями коэффициентов отклонения электронного луча , и погрешностями визуального отсчета величин x и y на экране осциллографа (по паспорту на осциллограф $\Delta k_x = \pm 0{,}07k_x$, $\Delta k_y = \pm 0{,}07k_y$, $\Delta x = \Delta y = 0{,}5$ мм);

   б) погрешностью величин N_1, N_2, R_1, R_2, r_T, S_2, C (она существенного вклада в общую погрешность не дает);

   в) систематической погрешностью, связанной с некоторыми допущениями при выводе расчетных формул (4) и (10).

Доверительные границы погрешности отдельных измерений определяются выражениями:

$$\Delta H = \alpha\sqrt{x^2\left(\frac{k_p\Delta k_x}{3}\right)^2 + k_x^2\left(\frac{k_p\Delta x}{3}\right)^2} \qquad (13)$$

$$\Delta B = \beta\sqrt{y^2\left(\frac{k_p \Delta k_y}{3}\right)^2 + k_y^2\left(\frac{k_p \Delta y}{3}\right)^2} \qquad (14)$$

где ΔH и ΔB - доверительные границы погрешностей измерения H и B, а k_p = 1,645 для доверительной вероятности P=0,9. Значения ±ΔH и ±ΔB наносятся на кривую B =f(H), а также записываются в таблицу.

Упражнение 2**. Оценка работы перемагничивания $A_п$ за один цикл.**

1. Получить максимальную петлю гистерезиса и зарисовать на кальке в координатах x и y.
2. Скопировать эту петлю на миллиметровую бумагу, измерить ее площадь.
3. Определить работу перемагничивания за один цикл по формуле (12).

Упражнение 3. **Определение коэрцитивной силы.**

1. По максимальной петле гистерезиса найти координату $-x_c$, соответствующую коэрцитивной силе - H_c (см. рис. 48).
2. По формуле (4) рассчитать H_c.
3. По полученному значению определить группу ферромагнетика (мягкий или жесткий). По формуле (13) оценить погрешность измерения коэрцитивной силы.

Это интересно

Последователь Эпикура, поэт и философ Тит Лукреций Кар в своей поэме «О природе вещей» дает рифмованное толкование взглядов своего учителя. Мы приводим ниже несколько затянутую цитату из Лукреция ввиду ее исключительной ценности. Ведь этим гекзаметрам уже более двух тысяч лет!

Мне остается сказать, по какому закону природы

Может железо притягивать камень, который

Греки «магнитом» зовут по названию месторожденья,

Ибо находится он в пределах отчизны магнетов.

Этому камню народ удивляется, ибо нередко

Цепью звено к звену, от него исходя, повисает.

Можно ведь видеть порой, что, качаясь от тихого ветра,

Пять или больше таких свободно спускается звеньев.

Все они вместе висят и, одно к одному прилепляясь,

Камня силу и связь друг от друга тогда испытуют:

Так его сила всегда беспрерывным вливается током...

Прежде всего из магнита должны семена выделяться

Множеством или же ток истекать, разбивая толчками

Воздух, который везде между камнем лежит и железом.

Только что станет пустым пространство меж ними, и много

Места очистится там, как тотчас же, общею кучей

Первоначала туда стремглав понесутся железа;

Следом за тем и кольцо устремляется всем своим телом...

Вовсе не надо тебе удивляться, что ток из магнита

Не в состоянии совсем на другие действовать вещи:

Частью их тяжесть стоять заставляет, - как золото, - частью

Пористы телом они, и поэтому ток устремляться

Может свободно сквозь них, никуда не толкая при этом;

К этому роду вещей мы дерево можем причислить.

Среднее место меж тем и другим занимает железо...

Вещи, в которых их ткань совпадает взаимно с другою,

Так, что где выпуклость есть, у другой оказалась бы там же

Впадина, - эта их связь окажется самою тесной.

Есть и такие еще, что крюками и петлями будто

Держатся крепко, и этим друг с другом сцепляются вместе.

Это, скорее всего, происходит в железе с магнитом...

Эти строки являются, пожалуй, в начале третьего тысячелетия нашей эры наиболее успешной попыткой объяснения природы магнитных явлений, хотя и очень наивной. Все остальные попытки сводились к предложению существования у магнита божественной «души», что позволяло не думать о дальнейших доводах в защиту гипотезы.

ТЕМА №5

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Литература

[Р3]. Гл. XX, XXI. §§159-161.

[Р7]. Гл. XIII.

[Р8]. §§50, 55.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Свободные гармонические колебания в электрическом колебательном контуре.
2. Уравнение собственных электрических колебаний.
3. Затухающие колебания. Логарифмический декремент. Добротность.
4. Уравнение колебаний при наличии затухания.
5. Вынужденные колебания в электрическом контуре.
6. Резонансные явления в колебательном контуре. Ширина резонансной кривой и ее связь с добротностью контура.
7. Процесс установления вынужденных колебаний.
8. Поддержание колебаний. Искровой контур.
9. Автоколебательная система.
10. Использование отрицательных сопротивлений.
11. Релаксационные колебания.
12. Колебания в связанных контурах. Парциальные колебания и их частоты. Нормальные колебания (моды) и их частоты.
13. Фильтры. Фильтр низких частот. Фильтр высоких частот. Цепочка из фильтров. Полосовой фильтр.
14. Трансформаторы.

15. Однополупериодное и двухполупериодное выпрямление переменного тока.

Качественные вопросы

1. На гвоздь наматывают проволоку и подключают к заряженному конденсатору. Намагнитится ли гвоздь?
2. Допустим, что удалось создать такой колебательный контур, в котором происходили бы незатухающие колебания без притока энергии извне. В каких целях это изобретение могло .бы найти применение?
3. При двухполупериодном выпрямлении тока с помощью схемы, показанной на рис. 49 получают ток, текущий в одном направлении. Нарисовать зависимость этого тока от времени, пренебрегая всеми потерями, и, считая, что выпрямитель питает чисто активное сопротивление, определить среднее значение силы тока. Если схема выпрямления питает первичную обмотку трансформатора, какая ЭДС возникнет во вторичной обмотке?

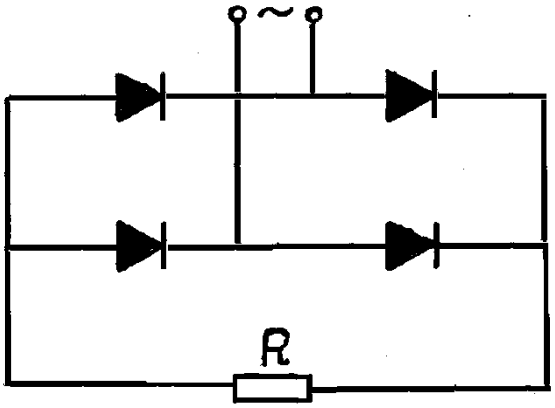

Рис. 49.

4. В схеме, представленной на рис. 49, параллельно сопротивлению R присоединен конденсатор C. Как это отразится на зависимости тока от времени?
5. В первичную цепь трансформатора включены соединенные последовательно в противоположных направлениях два полупроводниковых диода (рис. 50). Нарисовать осциллограммы тока в первичной цепи и электродвижущей силы, возникающей во вторичной.

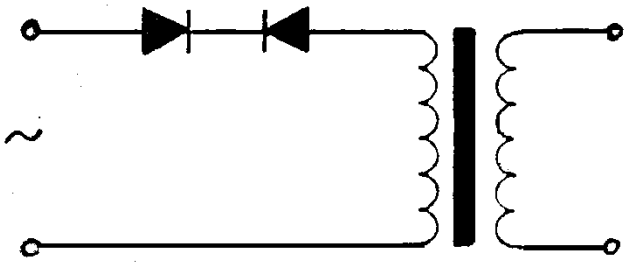

Рис. 50.

6. В первичную цепь трансформатора включены два вакуумных диода, соединенных параллельно, но в противоположных направлениях (рис. 51). Амплитуда электродвижущей силы, приложенной к первичной обмотке, значительно превышает напряжение, при котором диоды переходят в режим насыщения. Нарисовать схематически осциллограммы тока в первичной цепи и электродвижущей силы во вторичной.

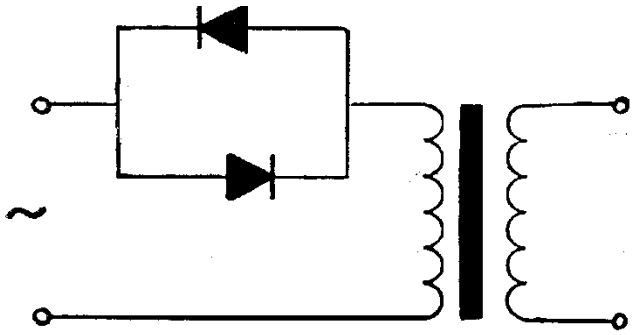

Рис. 51.

7. На какие пробивные напряжения должны быть рассчитаны конденсатор С и диод, если выпрямитель (рис. 52) может работать как под нагрузкой, так и без нее?

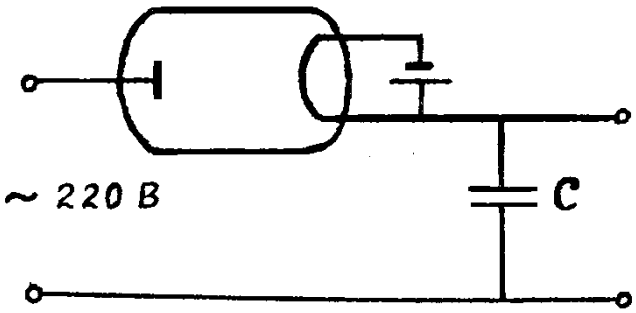

Рис. 52.

8. Электрический контур состоит из конденсатора постоянной емкости и катушки, в которую может вдвигаться сердечник. Один сердечник спрессован из феррита и является изолятором. Другой сердечник изготовлен из меди. Как изменится частота собственных колебаний контура, если в катушку вдвинуть а) медный сердечник; б) сердечник из феррита?
9. Два конденсатора одинаковой емкости соединяются параллельно с помощью сверхпроводников. Один из конденсаторов несет заряд q. Какие процессы происходят в этой системе? Как при этом изменяется энергия электрического поля?

10. Входящий в колебательный контур плоский конденсатор таков, что его пластины могут перемещаться друг относительно друга. Каким образом посредством перемещения пластин осуществить параметрическую раскачку контура?
11. Катушка, в которую вставлен постоянный магнит, присоединена к конденсатору. Известны: индуктивность катушки, емкость конденсатора и магнитный поток, создаваемый магнитом. Опишите электрический процесс, происходящий в цепи в случае, когда магнит очень быстро удаляют из катушки, и в случае, когда магнит удаляют очень медленно. Определить в обоих случаях работу, затраченную на удаление магнита.
12. В сеть переменного тока с напряжением включен контур, состоящий из трех сопротивлений и двух идеальных диодов (рис. 53). Какая средняя мощность выделяется на сопротивлении за один период? Какие приборы и как надо подключить, чтобы ее измерить?

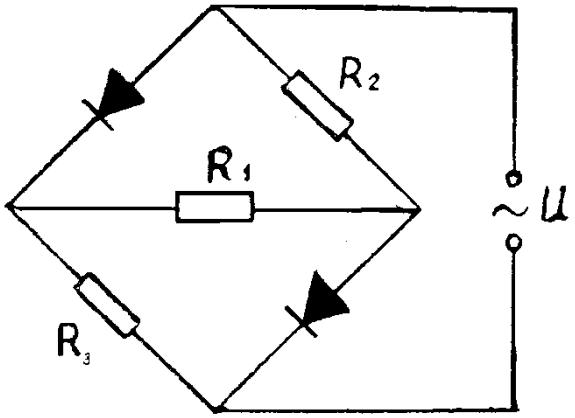

Рис. 53.

13. Почему в СВЧ-печи вода нагревается, а лед — нет?
14. Что происходит с магнитным полем в катушке, через которую происходит разряд конденсатора?
15. Почему при значительном повышении температуры выпрямляющее действие *p-n* - перехода резко ослабляется?
16. Объясните работу выпрямителей, собранных по схемам, показанным на рис. 54. Какой из графиков зависимости силы тока от времени соответствует каждой из схем выпрямителей?

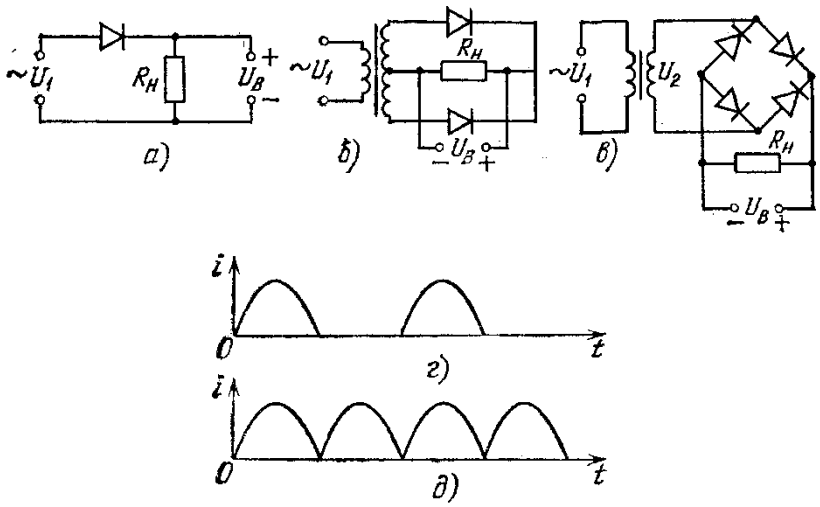

Рис. 54.

17. Провода, идущие на изготовление катушки, должны иметь возможно меньшее сопротивление: чем меньше сопротивление, тем медленнее затухают колебания в контуре. Однако встречаются контурные катушки, сделанные из стеклянной трубки, покрытой сверху тонким слоем серебра. Сопротивление стеклянной палочки электрическому току столь велико, что его невозможно измерить. Как же согласовать два положения, противоречащих друг другу: во-первых, стекло является хорошим изолятором; и, во-вторых, катушки должны изготовляться из материала, обладающего наименьшим сопротивлением?
18. Почему при значительном повышении температуры выпрямляющее действие *p-n* - перехода резко ослабляется?
19. Измерение величины сдвига фазы между токами можно произвести с помощью катодного осциллографа по схеме рис. 55. Как осуществить это измерение? Можно ли этим способом определить знак сдвига фазы?

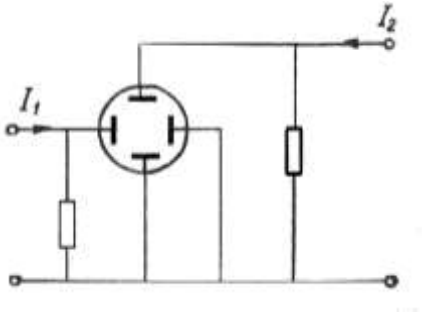

Рис. 55.

20. Мощность в цепи переменного тока изменяется со временем, как показано на рис. 56. Как, зная максимальное и минимальное значение мощности, определить числовое значение сдвига фаз между напряжением и током? Чему равен период изменения мощности?

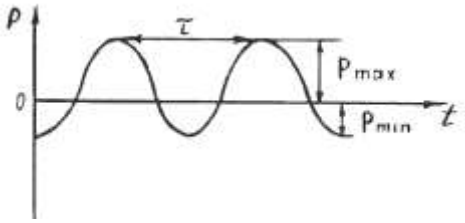

Рис. 56.

21. Почему нагруженный трансформатор гудит? Чему равна частота звука для трансформатора, включённого в сеть с током промышленной частоты?

Как вы думаете

1. Существуют ли в природе строго периодические процессы?
2. Какое отражение нашли идеи дальнодействия и близкодействия в развитии теории электромагнитных колебаний?
3. Какой тип физической аналогии (аналогия переноса признака, аналогия существования, аналогия родственности сравниваемых явлений, обобщающая аналогия, субстанционная аналогия и т. д.) используется при сравнении электромагнитных и механических колебаний?
4. Какие идеальные модели используются в теории электромагнитных колебаний?
5. В чем смысл энергетических аналогий при сравнении колебаний математического маятника с электромагнитными процессами в колебательном контуре?
6. Каковы условия успешного применения метода аналогии?
7. Являются ли идеальные модели объективными по форме и содержанию?
8. Отличаются ли при соответствующих условиях законы распространения волн и движения частиц?
9. В чем сходство и различие между механической и электромагнитной волнами?
10. В чем заключаются количественные и качественные стороны такой физической величины, как период колебаний?
11. Зависит ли собственная частота колебательного контура от системы отсчета, в которой рассматривается контур?
12. Могут ли энергии, свойственные различным видам движения, в которых участвует данная система, взаимно превращаться?
13. Существуют ли ограничения для взаимного превращения различных видов энергии?
14. Что такое электромагнитная волна - материальный объект или процесс распространения поля?
15. Допускают ли законы физики существование строго периодических процессов?

Проверь себя!

1. Логарифмический декремент затухания

   a) не связан с добротностью контура;

   b) увеличивается с ростом добротности контура;

   c) уменьшается с ростом добротности контура.

2. В последовательном контуре при $\omega < \omega_0$

   a) $U_L < U_C$;

   b) $U_L > U_C$;

   c) $U_L == U_C$, но между ними существует сдвиг по фазе.

3. При резонансе напряжений

   a) сопротивления индуктивности и емкости минимальны, а сила тока максимальна;

   b) сопротивления индуктивности и емкости максимальны, а сила тока минимальна;

   c) полное сопротивление цепи минимально, а сила тока максимальна.

4. Период электрических колебаний в реальном контуре

   a) не зависит от добротности контура;

   b) увеличивается при возрастании добротности контура;

   c) уменьшается при возрастании добротности контура.

5. Коэффициентом выпрямления называется отношение

   a) прямого и обратного токов, измеренных при одинаковых по величине прямом и обратном напряжениях;

b) прямого и обратного напряжений, измеренных при одинаковых по величине прямом и обратном токах;

c) выходного и входного напряжений.

6. Сглаживающее действие конденсатора

a) не зависит от величины его емкости;

b) усиливается при увеличении его емкости;

c) усиливается при уменьшении его емкости.

7. Коэффициент выпрямления вакуумного диода

a) не зависит от анодного напряжения;

b) проходит через максимум при возрастании анодного напряжения;

c) монотонно возрастает при увеличении анодного напряжения.

Лабораторная работа №19

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА [35]

Цель работы: изучение кривых заряда и разряда конденсатора при различных параметрах RC электрической цепи и вычисление времени релаксации.

Приборы и оборудование: источник питания ИП; звуковой генератор PQ; преобразователь синусоидальных импульсов (модуль ФПЭ-08); магазин сопротивлений МС; магазин емкостей МЕ; электронный осциллограф PO.

Описание экспериментальной установки

Блок-схема и электрическая схема установки приведены на рис. 57, 58.

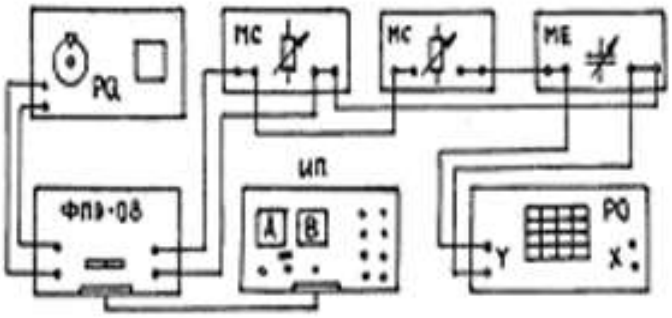

Рис. 57.

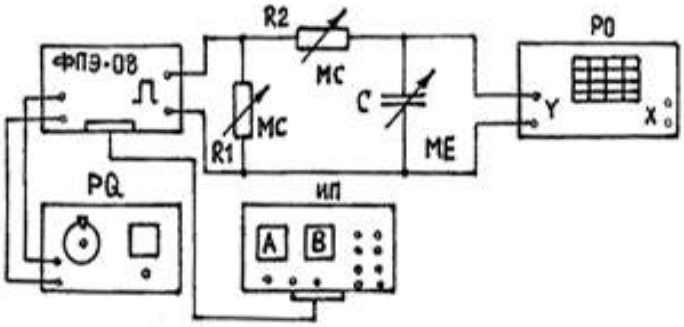

Рис. 58.

Схема (рис. 57) состоит из источника постоянного тока ИП, генератора низкочастотных синусоидальных импульсов (звукового генератора), смонтированного в модуле ФПЭ-08 преобразователя синусоидальных импульсов в прямоугольные положительной полярности (преобразователь импульсов позволяет получить прямоугольные импульсы, скважность которых меняется регулятором на лицевой панели), двух магазинов сопротивлений R_1 и R_2, магазина емкостей С и электронного осциллографа.

Подаваемый с выхода генератора синусоидальный импульс преобразуется в прямоугольный и через магазин сопротивлений подается на магазин емкостей С. Конденсатор заряжается. Время заряда конденсатора С можно изменять сопротивлением R_2. В момент паузы происходит разряд конденсатора по цепи R_1R_2C. Время разряда определяется параметрами этой цепи.

Визуально процесс заряда-разряда конденсатора можно наблюдать на экране осциллографа. Наиболее устойчивый режим работы данной схемы обеспечивается при изменении номинальных величин элементов RC -цепи в следующих пределах:

C = 0,02...0,04 мкФ; $R_1 = 10^2...10^3$ Ом; R_2= 1…5 кОм; $f_{ген}$= 0,5...5 кГц.

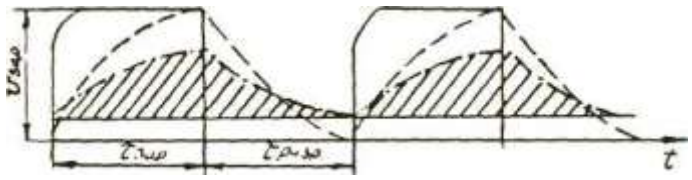

Рис. 59.

При этом сравнительно полно происходит процесс заряда-разряда конденсатора. При увеличении сопротивлений и емкости больше определенных значений конденсатор не успевает полностью зарядиться и разрядиться за один период цикла. Наблюдаемые при этом кривые заряда и разряда изображены на рис. 59 штрихпунктирной линией.

Измерения и их обработка

1. Собрать электрическую схему согласно рис. 57 и 58.
2. Ознакомиться с работой звукового генератора и электронного осциллографа.
3. Подготовить звуковой генератор к работе. Установить следующие параметры выходного напряжения звукового генератора: частота 2 кГц, напряжение 2-3 В.
4. Установить импульсы наибольшей скважности. Для этого нажать левую кнопку "скважность-грубо" преобразователя импульсов ПИ (модуль ФПЭ-08). Ручку "скважность-точно" установить в крайнее правое положение.
5. Подготовить осциллограф к работе:
   а) включить развертку электронного усилителя У и установить частоту развертки, удобную для наблюдения сигналов частотой 2-10 кГц;

   б) усиление по оси Y электронного осциллографа установить таким, чтобы можно было измерять переменное напряжение до 10 В;

   в) установить время горизонтальной развертки луча таким, чтобы на экране помещалось 1-2 периода синусоидального напряжения частотой 2 кГц.

6. Включить лабораторный стенд и приборы.
7. Установить на экране осциллографе устойчивую картину.
8. Установить на магазине сопротивлений R_1 значение $R_1=10^2$ Ом.
9. Установить на магазине сопротивлений R_2 значение $R_2=10^3$ Ом.
10. Установить на магазине емкостей значение $C= 2\cdot10^{-2}$ мкФ.

Упражнение I. **Изучение кривых заряда и разряда конденсатора**

1. Установить усиление канала Y осциллографа таким, чтобы высота импульса на экране была максимальной. Совместить начало кривой заряда с началом шкалы осциллографа. Установить частоту развертки осциллографа такой, чтобы на экране уместилась полная кривая заряда и разряда конденсатора. Снять зависимость Y = f(X), измеряя X в секундах, а Y - в вольтах. Записать 8-10 значений X и Y . Результаты занести в табл. 1.

   Построить кривую заряда конденсатора.

Таблица 1.

X, с								
Y, В								

2. Аналогичные измерения провести для кривой разряда, совместив начало кривой разряда с началом координат на шкале осциллографа. Результаты занести в табл. 2. Построить кривую разряда конденсатора.

Таблица 2.

X, с								
Y, В								

3. По кривым заряда и разряда конденсатора определить время, за которое величина напряжения падает до половины первоначального значения ("половинное время") и по формуле $RC = 1{,}4425\ t_{½}$ вычислить время релаксации $\tau = RC$.
4. Не изменяя усиление канала Y осциллографа, получить на экране кривые заряда и разряда конденсатора при других значениях R_2 и C, оставляя неизменной величину сопротивления $R_1 = 10^2$ Ом.

   Рекомендуемые значения R_2 и C следующие:

   1) $R_2 = I0^3$ Ом; $C = 2\cdot10^{-2}...4\cdot10^{-2}$ мкФ;

2) $R_2 = 2 \cdot 10^3$ Ом; $C = 1 \cdot 10^{-2}$ мкФ;

3) $R_2 = 3 \cdot 10^3$ Ом; $C = 1 \cdot 10^{-2}$ мкФ.

Измерить по наблюдаемым на экране осциллографа кривым релаксации заряда "половинное время" в делениях шкалы. Затем $t_{½}$ перевести в секунды. Для получения достаточно полного процесса заряда и разряда конденсатора можно изменять частоту следования импульсов, меняя частоту сигнала звукового генератора.

5. Вычислить постоянную времени RC, используя значения параметров RC-цепи. Учесть, что при заряде конденсатора $R \approx R_2$, а при разряде $R = R_1 + R_2$. Рассчитать отношение $t_{½}$ к RC для всех случаев по формуле $A = t_{½}/RC$.
6. Сравнить величину A с теоретическим значением, равным ln 2,0=0,693.
7. Оценить погрешность измерений по формуле

$$\delta = \frac{\langle A_{изм} \rangle - A_{теор}}{A_{теор}} 100\%$$

где $\langle A_{изм} \rangle$ - среднее значение выполненных измерений.

Упражнение 2. **Построение кривой разряда конденсатора в логарифмическом масштабе**

Можно показать (выполнить самостоятельно), что напряжение на конденсаторе в процессе его разряда изменяется по закону

$$V = V_0 e^{t/RC},$$

откуда:

$$\ln \frac{V_0}{V(t)} = \frac{t}{RC}.$$

Воспользовавшись данными табл. 2, построить логарифмическую зависимость, характеризующую изменение напряжения на конденсаторе от времени t при разряде конденсатора, учитывая, что $V_0 = Y(0)$, $V(t) = Y(X)$, $X = t$. Котангенс угла наклона полученной прямой есть характеристическое время релаксации заряда, или постоянная времени RC:

$$\mathrm{ctg}\, \alpha = \tau = RC.$$

Сравнить полученные результаты со значениями постоянной времени, найденными в упражнении 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕДЬНОМ КОНТУРЕ [35]

Цель работы: изучение параметров и характеристик колебательного контура.

Приборы и оборудование: генератор звуковых сигналов PQ, осциллограф PO; модуль с колебательным контуром ФПЭ-10; преобразователь импульсов ФПЭ-08; источник питания ИП; магазин сопротивлений МС.

Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис.60.

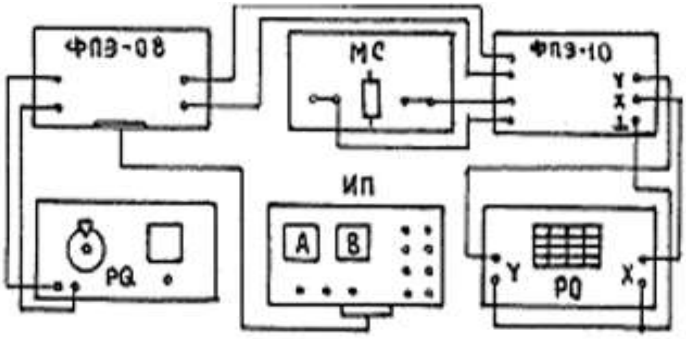

Рис.60.

В работе для получения колебаний в контуре используется модуль ФПЭ-10 с контуром, изображенным на рис. 61.

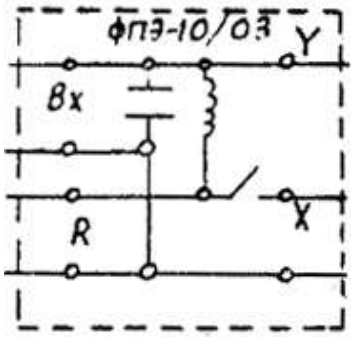

Рис. 61.

Происходящие в контуре колебания наблюдаются на экране осциллографа (рис. 62).

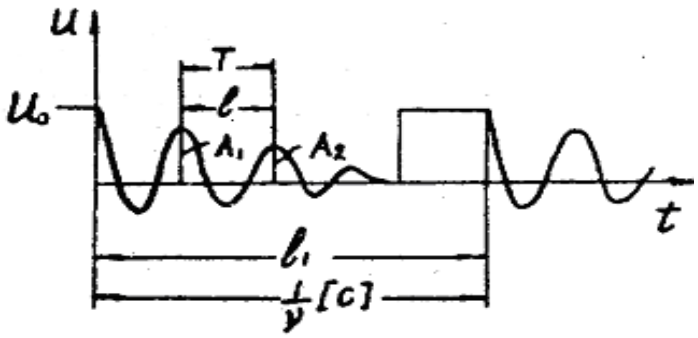

Рис. 62.

Цикл заряжения и разряжения осциллографа длится 1/ν секунд, где ν – частота, задаваемая звуковым генератором. На экране осциллографа ему соответствует отрезок l_1. Это позволяет определить период Т затухающих колебаний, которому на рис. 62 соответствует отрезок *l*. Из пропорции $l/T = l_1\nu$ получаем:

$$T = \frac{l}{l_1 \nu} \tag{1}$$

Измерения и их обработка

Упражнение 1 **. Измерение периода, логарифмического декремента и параметров L, C, R колебательного контура.**

1. Ознакомится с работой звукового генератора и электронного осциллографа в режиме измерения амплитуды синусоидального напряжения.
2. Подготовить приборы к работе:

   а) установить следующие параметры выходного напряжения звукового генератора: частота 500 Гц, напряжение 2-3 В;

   б) на преобразователе импульсов ФПЭ-08 нажать клавишу «П» и правую клавишу «скважность грубо»;

   в) ручку магазина сопротивлений поставить в положение «I» и нажать клавишу «x10^2».

3. Включить лабораторный стенд и приборы.
4. Получить на экране осциллографа устойчивую картину колебаний (см. рис .62).

5. Измерить расстояния *l, l_1* и вычислить период колебаний по формуле (1).
6. Измерить амплитуду колебаний V_{10} ,V_{20}, V_{30} и, комбинируя их попарно, вычислить по формуле

$$\lambda = \ln\frac{V_{10}}{V_{20}} = \ln\frac{V_{10}(t_1)}{V_{20}(t_1+T)} \qquad (2)$$

логарифмический декремент затухания λ. По формуле $\lambda = \beta \cdot T$ определить коэффициент затухания β. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 1.

7. Выполнить измерения п.п. 5,6, включив в магазине сопротивления 100, 300, 500, 600 Ом.

Таблица 1

R_m	V_{10}	V_{20}	V_{30}	λ	β	L	C	R_K	R

8. Построить график зависимости логарифмического декремента затухания λ от сопротивления R_m магазина (рис.63), откладывая значения R_m по оси абсцисс от произвольной точки **О** и экстраполируя график к $\lambda = 0$. Полное сопротивление контура R складывается из сопротивления R_k катушки самоиндукции и сопротивления магазина R_k: $R = R_k + R_м$.

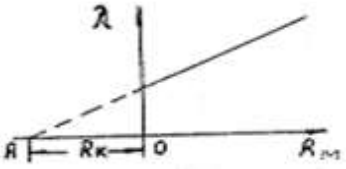

Рис. 63.

Поэтому

$$\lambda = \frac{R_k + R_m}{2 \cdot L} \cdot T \qquad (3)$$

Сопротивление R_k, очевидно, измеряется отрезком (см. рис. 63).

9. Используя найденное значение R_k и значение периода T, найденное ранее по формуле (1), вычислить индуктивность из формулы (3), а затем емкость C – из формул

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad \text{и} \qquad T = 2\pi\sqrt{LC} \tag{4}$$

10. Подобрать сопротивление магазина сопротивлений R_{mk}, при котором наблюдается апериодический разряд конденсатора. Согласно расчетам (выполнить самостоятельно) должно быть $R_k + R_{mk} = 2\sqrt{L/C}$. Проверить расчетом это соотношение.

Упражнение 2. **Исследование фазовых кривых**

Для наблюдения на экране фазовой кривой на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подают напряжение с обкладок конденсатора, а на горизонтально отклоняющие пластины - напряжение V_K с клемм магазина сопротивлений R_M, пропорциональное току $V=IR_M$. Таким образом, на экране осциллографа изображается зависимость напряжения V на обкладках конденсатора от тока I в контуре.

1. Включить осциллограф. Получить на экране фазовую кривую (см. рис. 64).

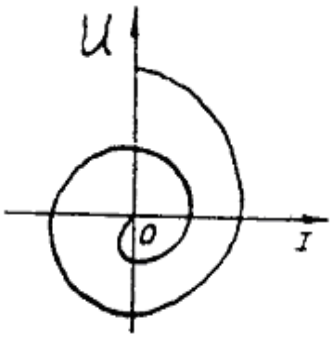

Рис. 64.

2. Установить картину в центре экрана.
3. Вращая ручку магазина сопротивлений, получить фазовые кривые при различных сопротивлениях.
4. Измерить значения напряжения, разделенные периодом времени, т.е. расстояния от центра фазовой кривой до точки пересечения витков спирали с осью напряжения V и вычислить логарифмический декремент затухания:

$$\lambda_V = 2{,}3\lg\frac{V_{10}}{V_{20}}$$

Аналогичным образом вычислить логарифмический декремент по значениям тока , разделенные периодом времени:

$$\lambda_I = 2{,}3\lg\frac{I_{10}}{I_{20}}.$$

Измерения выполнить по всем виткам фазовой кривой. Результаты записать в таблицу 2.

Таблица 2.

R_M	$R=R_к+R_M$	V_{10}	V_{20}	V_{30}	λ_V	I_{10}	I_{20}	I_{30}	λ_I

5. Повторить измерения п.4 при значениях сопротивления магазина 100, 200, 300, 400, 500, 600 Ом.
6. Зарисовать фазовую кривую при апериодическом разряде конденсатора.
7. Рассчитать погрешность определения λ (формулу вывести самостоятельно):

$$\Delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{10}}{V_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{20}}{V_{20}}\right)^2},$$

где ΔV – погрешность измерения V на экране.

Лабораторная работа № 21

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ [35]

Цель работы: изучение зависимости тока в колебательном контуре от частоты источника ЭДС, включенного в контур, и измерение резонансной частоты контура.

Приборы и оборудование: звуковой генератор PQ; электронный осциллограф PO; модуль ФПЭ-11; магазин сопротивлений MC; магазин емкостей ME.

Описание экспериментальной установки

Содержанием работы является изучение резонанса в последовательной цепи RCL. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 65.

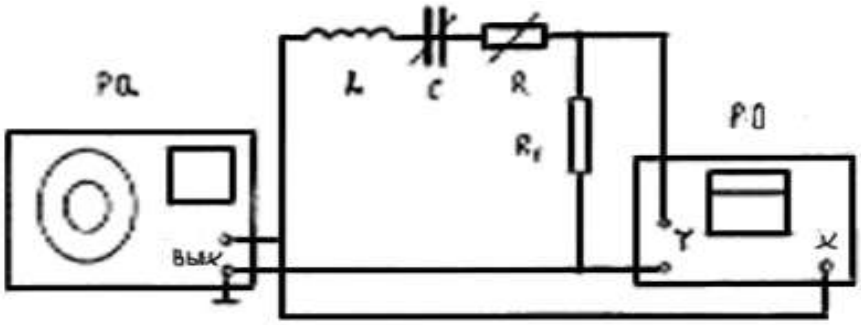

Рис. 65.

Колебательный контур состоит из катушки *L*, магазина емкостей *C,* переменного сопротивления R и сопротивления R_1. Напряжение на сопротивлении R_1, пропорциональное току в контуре, подается на вход Y электронного осциллографа. Для снятия резонансных кривых, изменяя частоту звукового генератора PQ, определяют зависимость $I_o = f(Q)$ при различных сопротивлениях контура *R* .

Для измерения сдвига фаз ϕ_1 можно использовать фигуры Лиссажу, получаемые на экране осциллографа (рис. 66).

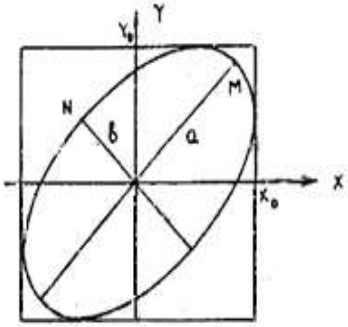

Рис. 66.

Можно показать (вывести самостоятельно), что

$$tg\frac{\varphi}{2} = \frac{b}{a} \qquad (1)$$

Таким образом, для измерения сдвига фаз между напряжениями одинаковой частоты достаточно измерить полуоси *a* и *b* эллипса, вписанного б квадрат на экране осциллографа. При ф = 0 эллипс вырождается в прямую, что позволяет по фигурам Лиссажу установить момент наступления резонанса. Для получения фигур Лиссажу на вход «Y» осциллографа подается напряжение с сопротивления R_1, пропорциональное току, а на вход «X» - напряжение со звукового генератора (рис. 65).

На рис. 67 и 68 приведена электрическая схема экспериментальной установки.

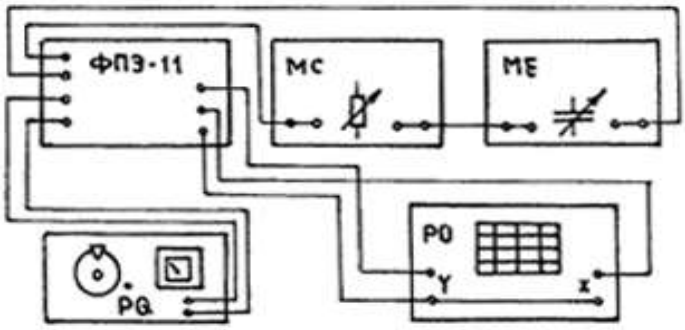

Рис. 67.

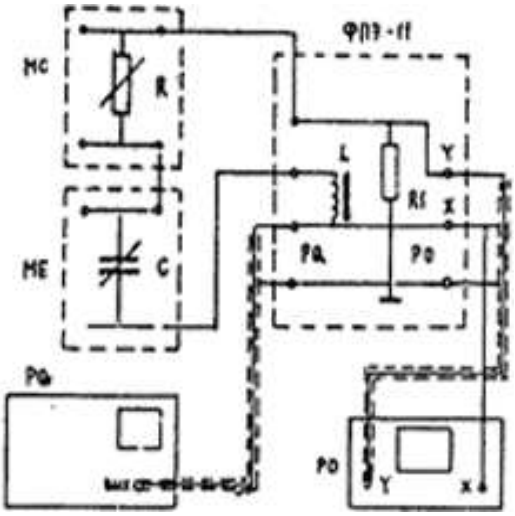

Рис.68.

Измерения и их обработка

Упражнение 1. **Снятие резонансных кривых**

1. Установить переключателями магазина емкостей $C=3\cdot10^{-3}$ мкФ и переключателями магазина сопротивлений R=0.
2. Используя приблизительное значение индуктивности L=100 мГн, рассчитать резонансную частоту контура по формуле $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.
3. Ознакомиться с работой звукового генератора и электронного осциллографа в режиме измерения амплитуда синусоидального напряжения и получения фигур Лиссажу.

4. Подготовить приборы к работе:
   а) установить следующие параметры выходного напряжения звукового генератора: частота - 2 кГц, величина напряжения - до I В;
   б) включить развертку электронного осциллографа с запуском от усилителя У и установить частоту развертки, удобную для наблюдения сигналов частотой 2-16 кГц;
   в) усиление по оси Y электронного осциллографа установить таким, чтобы было возможно измерять переменные напряжения до I В.
5. Включить лабораторный стенд и приборы. Напряжение звукового генератора установить равным 0,8 В. Это значение при всех измерениях в упражнении I поддерживать неизменным. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение синусоиды. Измерить амплитуду синусоидального напряжения в вольтах. Результаты измерения записать в таблицу 1.

Таблица I

f, кГц										
V_0, В										
I_0, мА										

6. Измерить амплитуды при других частотах в диапазоне от 2 до 16 кГц. Частоту изменять с интервалом 1-2 кГц, вблизи резонанса (в пределах f ± I кГц) с интервалом 0,2 кГц. Результаты измерений занести в табл. 1.
7. Рассчитать амплитуду тока в колебательном контуре по формуле $I_0 = V_0/R_1$, где R_1 – значение, указанное на модуле. Расчет провести для каждого значения частоты, результаты вычислений записать в табл. 1 в миллиамперах.
8. Установить сопротивление магазина R = 500 Ом. Провести измерения п.п. 5-7, результаты записать в таблицу.
9. Снять резонансную кривую (п.п. 5-7) при R = 3000Ом.
10. Построить на одном чертеже графики зависимостей $I_0(f)$.
11. По графикам $I_0(f)$ при R = 0 и R = 500 Ом найти ширину резонансной кривой Δf и рассчитать значения добротности контура по формуле $Q \approx \frac{f_0}{\Delta f}$.

Упражнение 2. **Определение зависимости резонансной частоты от емкости С**

1. Установить сопротивление R = 0, емкость $C = 1 \cdot 10^{-3}$ мкФ.
2. Выключить развертку осциллографа. На экране осциллографа наблюдать эллипс (см. рис. 6б). Изменяя частоту звукового генератора, добиться превращения эллипса в прямую, расположенную примерно под углом 45° к оси X. При необходимости изменять усиление

усилителя У. При этом частота звукового генератора равна резонансной частоте f_0.

3. Значения f_0 и С записать в таблицу 2.

Таблица 2.

$C \cdot 10^9$, Ф									
f_0, КГц									
Z									

4. Провести измерения п.п. 2 и 3 при других значениях С от $1 \cdot 10^{-3}$ до $10 \cdot 10^{-3}$ мкФ с интервалом $1 \cdot 10^{-3}$ мкФ.

5. Вычислить значения $Z = \dfrac{1}{(2\pi f_0)^2}$ и построить график зависимости Z от С, который должен представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат. При построении графика следует учесть следующее. Точность значений емкостей, устанавливаемых на магазине емкостей, составляет *5%.* Поэтому на графике следует изобразить пределы, в которых известно данное значение С так, как показано на рис. 69. Затем следует провести прямую, не выходящую за нижние границы С (прямая 1), и прямую, не выходящую за верхние границы (прямая 2). В этих пределах должна располагаться истинная зависимость Z = f(C).

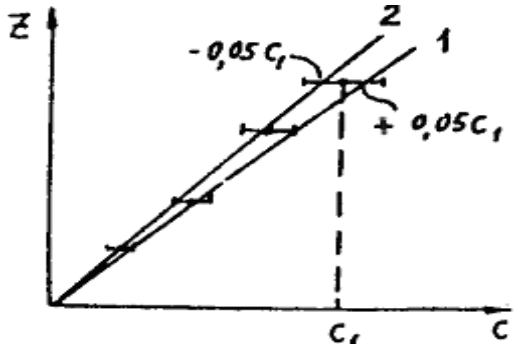

Рис. 69.

6. Рассчитать значение индуктивности катушки как тангенс угла наклона прямых на графике Z = f(C):

$$L = \frac{\Delta Z}{\Delta C}; \qquad L_{cp} = \frac{L_1 + L_2}{2}$$

7. Оцените погрешность определения L:

$$\delta = \frac{\Delta L}{L_{cp}} = \frac{L_2 - L_{cp}}{L_{cp}}$$

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СВЯЗАННЫХ КОНТУРАХ [35]

Цель работы: изучение обмена энергии в системе электрических контуров, слабо связанных между собой.

Приборы и оборудование: источник питания ИП; преобразователь импульсов ПИ; -звуковой генератор PQ; осциллограф PO; магазин емкостей МЕ; модуль ФПЭ-13.

Описание экспериментальной установки

Биения можно наблюдать в электрической системе - в двух одинаковых LC-контурах, связанных между собой слабой емкостной связью (рис.70), наблюдаются **биения** (рис. 71). Колебания в контурах возбуждаются с помощью преобразователя импульсов (ПИ). Биения – результат процесса обмена энергией между двумя гармоническими осцилляторами, собственные частоты которых различаются мало.

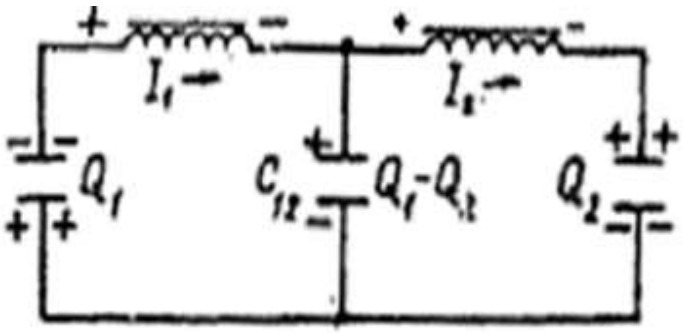

Рис.70.

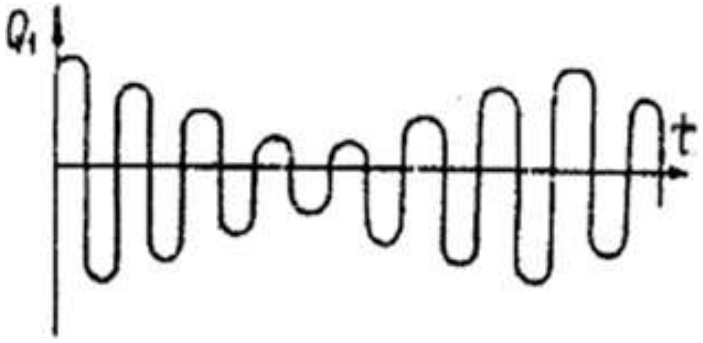

Рис. 71.

Значение частоты обмена $\omega_{обм}$ (имеется в виду обмен энергией), или частоты биений $\omega_{биен} \approx \omega_{обм}$ можно изменять, настраивая систему контуров путем изменения номинала элементов C, C_{12}, L, R и т.д., добиваясь того, чтобы разностная частота была сведена к минимуму. Если связанные контура имеют одинаковую резонансную частоту $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, и, кроме того, C_{12} велика по сравнению с C, т.е. $\frac{C}{C_{12}} << 1$ ("слабая связь"), то частота обмена может быть выражена формулой:

$$\omega_{обм} = \sqrt{\frac{1}{LC}} - \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{2}{LC_{12}}} \approx \frac{C}{C_{12}}\omega .$$

Исследование биений, т.е. обмена энергий в связанных контурах, и является одной из практических задач данной работы.

На рис. 72 и 73 даны блок-схема и электрическая схема экспериментальной установки.

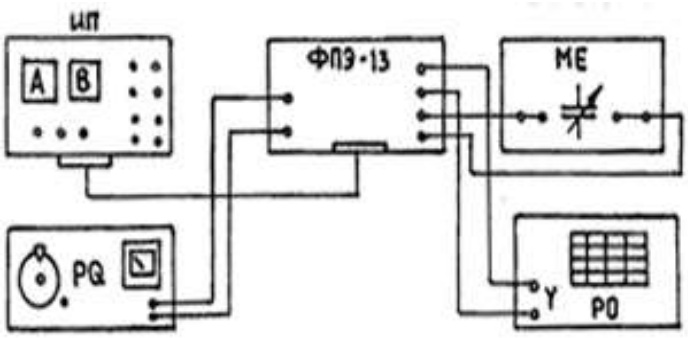

Рис. 72.

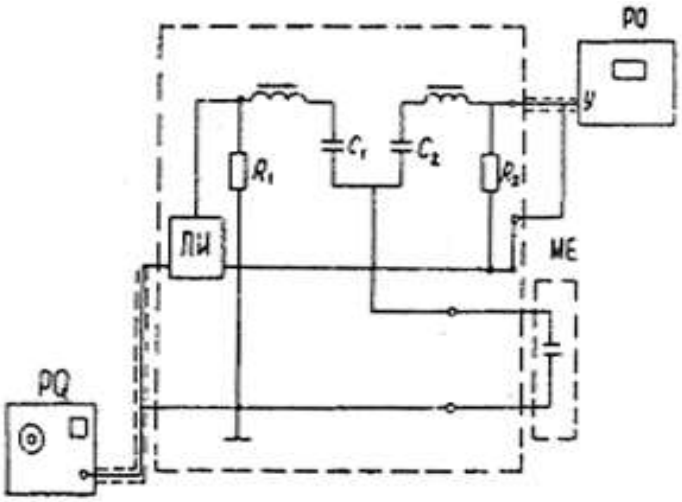

Рис. 73.

Здесь ИП - источник питания; ПИ - преобразователь импульсов; PQ - звуковой генератор; PO - осциллограф; ME - магазин емкостей; ФПЭ-13- модуль.

Измерения и их обработка

1. Ознакомиться с работой звукового генератора и электронного осциллографа.
2. Собрать схему измерений согласно рис. 73.
3. Подготовить приборы к работе:
   а) с помощью магазина емкостей ME установить C = $4 \cdot 10^{-2}$ мкФ;
   б) установить следующие параметры выходного напряжения звукового генератора: частота 200 Гц, величина напряжения 2-4 В, режим работы - генерация синусоидальных колебаний;
   в) включить развертку электронного осциллографа с запуском от усилителя и установить частоту развертки, удобную для наблюдения сигналов частотой 200 Гц;
   г) усиление по оси Yэлектронного осциллографа установить таким, чтобы было возможно измерить переменное напряжение до 5 В.
4. Включить лабораторный стенд и приборы. Регулировкой ручек управления на панели осциллографа добиться стабильной картины процесса "биений" в контурах.
5. Вычислить $T_{рез}$ для одного из контуров (резонансные частоты контуров близки) по формуле Томсона $T_{рез} = 2\pi\sqrt{LC}$. Величины L и C указаны в паспорте модуля
6. Изменяя величину емкости конденсатора связи C_{12} на магазине емкостей от $4 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-1}$

мкФ, измерить периоды "биений". Период "биения"' определяется следующим образом: подсчитывается количество периодов (количество максимумов), укладывающихся в одно "биение" (число N, рис. 74). Эта величина умножается на вычисленное по формуле Томсона, т.е. $T_{биен} = f_{рез} \bullet N$. Полученные результаты записать в таблицу 1. По полученным данным построить график зависимости $T_б = f(C_{12})$.

7. Провести расчет $T_б$ по формуле $T_б = \frac{C_{12}}{C} T_{рез}$ и сравнить его с экспериментальным значением.

Таблица 1

C_{12}, мкФ	
N	
$T_{б\ эксп}$, с	
$T_{б\ теор}$, с	

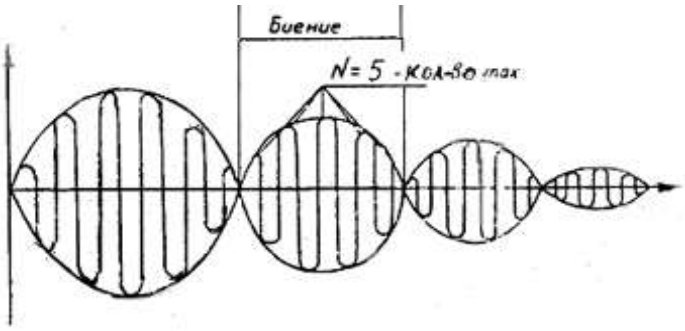

Рис.74.

Лабораторная работа № 23

ИЗУЧЕНИЕ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО И ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение однополупериодного и двухполупериодного кенотронного и полупроводникового выпрямителей.

Приборы и принадлежности: стенд (рис. 75), электронный осциллограф; 3. полупроводниковый выпрямитель; источник питания.

Измерения и их обработка.

Упражнение 1. **Наблюдение кривой изменения тока в кенотронном выпрямителе**

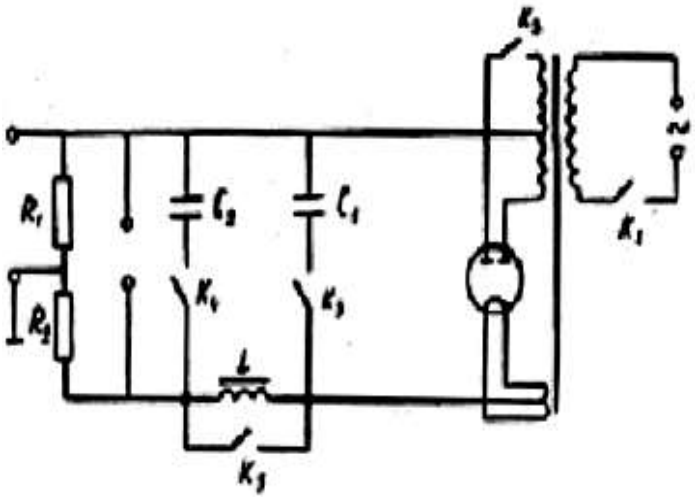

Рис. 75.

1. Рассмотрите устройство выпрямителя, уясните назначение каждой его детали.
2. Выясните, с помощью какого ключа можно перейти от однополупериодной схемы выпрямителя к двухполупериодной (и наоборот).
3. Присоедините осциллограф к выпрямителю через делитель R_1, R_2.
4. Включите выпрямитель, проверьте, накаливается ли катод кенотрона.
5. Разомкните ключ K_2, подайте небольшое напряжение с выхода выпрямителя на осциллограф. На экране осциллографа вы должны получить следующие кривые выпрямленного напряжения:
   a) без фильтра;
   b) при включенном только одном конденсаторе C_1;
   c) при включенном дросселе фильтра и выключенных конденсаторах;
   d) при включенном дросселе и конденсаторе C_1;
   e) при включенных всех элементах сглаживающего фильтра.

   Решите самостоятельно, какие ключи должны быть замкнуты, какие разомкнуты при выполнении каждого опыта в отдельности. Приложив прозрачную бумажку к экрану осциллографа, мягким карандашом зарисуйте полученные кривые. Будьте осторожны, чтобы не повредить трубку осциллографа.
6. Замкните ключ K_2, повторите исследования для двухполупериодного выпрямителя.
7. Снимите нагрузочную характеристику выпрямителя. Для этого отключите осциллограф, нагрузите выпрямитель реостатом с большим сопротивлением (порядка 3—5 кОм), последо-

вательно с реостатом включите миллиамперметр. Присоедините вольтметр. Изменяя сопротивление реостата, записывайте показания прибора. По данным измерений постройте график U = f(I).

Примечание: нагрузочный реостат должен быть снабжен ограничителем во избежание короткого замыкания выходных зажимов выпрямителя.

Упражнение 2. **Наблюдение кривой изменения тока в полупроводниковом выпрямителе**

Для получения одно- и двухполупериодного выпрямления тока используется выпрямитель, собранный по мостовой схеме (рис.76).

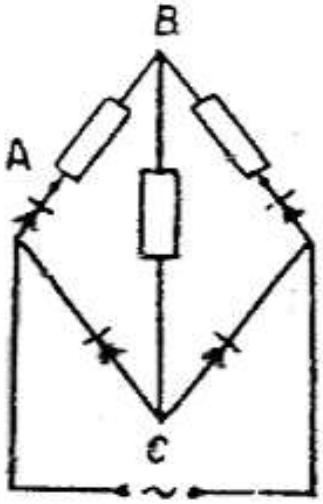

Рис. 76.

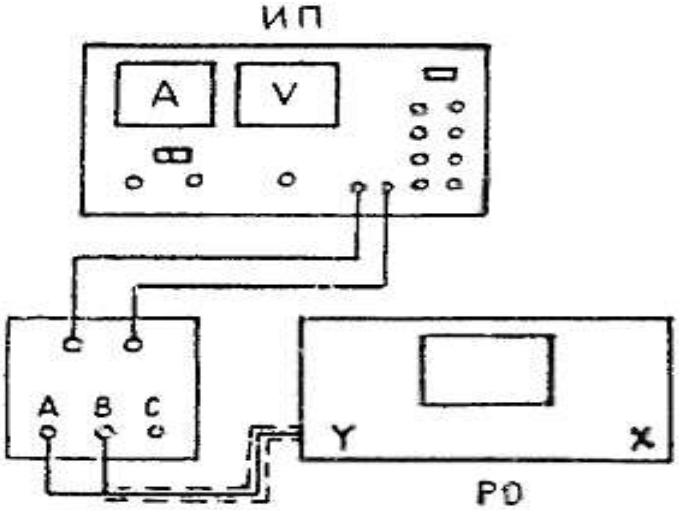

Рис. 77.

6. Собрать схему, изображенную на рис. 77.
7. Вход Y осциллографа соединить с клеммами А и В на панели моста.
8. На выпрямитель подать напряжение 6,3 В от источника питания.
9. Включить генератор развертки осциллографа и получить на экране осциллографа устойчивую картину изменения тока от времени при однополупериодном выпрямлении. Зарисовать картину в тетрадь.
10. Вход Y осциллографа соединить с клеммами С и В на панели моста и получить на экране осциллографа устойчивую картину изменения тока от времени при двухполупериодном выпрямлении. Зарисовать картину в тетрадь.

Это интересно [16, 30]

В 1842 г. знаменитый американский физик Джозеф Генри установил, что разряд лейденский банки состоит не из одного перехода электричества с одной обкладки на другую, а из целой серии быстро затухающих электрических колебаний. К этому же выводу в 1847 г. пришел Герман Гельмгольц в своей знаменитой статье “О сохранении силы”. Колебательный характер разряда лейденской банки вновь был подвергнут внимательному анализу Вильгельмом Феддерсеном. Он заметил, что если две обкладки конденсатора соединены небольшим сопротивлением, то разряд носит колебательный характер и длительность периода колебаний пропорционально квадратному корню из емкости конденсатора. В 1855 г. Вильям Томсон (лорд Кельвин) вывел из теории потенциала, что период колебаний осциллирующего разряда пропорционален квадратному корню из произведения емкости конденсатора на его коэффициент самоиндукции. Наконец, в 1864 г. Г. Кирхгоф дал теорию колебательного разряда, а в 1869 г. Гельмгольц показал, что аналогичные колебания можно получить и в индукционной катушке, концы которой соединены с обкладками конденсатора. В 1887 г. Генрих Герц экспериментально доказал, что колебательный разряд вызывает в пространстве волны, состоящие из двух колебаний - электрического и магнитного, поляризованных перпендикулярно” друг к другу. Таким образом было экспериментально доказано существование предсказанных Джеймсом Клерком Максвеллом электромагнитных волн.

Во времени Максвелла существовали две теории электричества: теория “силовых линий” Фарадея и теория, разработанная великими французами Кулоном, Ампером, Био, Саваром, Араго и Лапласом. Исходная точка французов - представление о так называемом “дальнодействии”, мгновенном действии одного тела на другое на расстоянии без помощи какой-либо промежу-

точной среды. Открытие закона Кулона, в точности повторявшего “по конструкции” закон Ньютона, создание электродинамики Ампера утвердили французских физиков в справедливости концепции “мгновенного дальнодействия”. Теории великих французов были прекрасно математически обработаны и, в общем, выстраивались в довольно изящную и удельную теорию.

Воззрения Фарадея в корне расходились с такими представлениями. Он был абсолютно убежден в том, что “материя не может действовать там, где ее нет”. Поэтому Фарадею понадобилась “какая-то материальная среда, заполняющая даже “пустое” пространство, через которую от точки к точке передается электрическое и магнитное воздействие. Среду, через которую передается воздействие, Фарадей назвал “полем”. Поле, считал он, пронизано магнитными и электрическими “силовыми линиями”. Увидеть силовые линии, по Фарадею, очень просто. Например, чтобы увидеть магнитные силовые линии, достаточно насыпать железные опилки на бумагу и поднести снизу магнит. Электрическое поле можно “увидеть”, если продолговатые кристаллики какого-либо диэлектрика (например, кристаллы хинина) взболтать (“взмутить”) в какой-либо достаточно вязкой жидкости (например, в касторовом масле): кристаллики в электрическом поле образуют картину силовых линий.

Максвелл присоединился к фарадеевской концепции поля безоговорочно. “Фарадей, - писал Максвелл, - своим мысленным оком видел силовые линии, пронизывающие все пространство. Там, где математики видели центры напряжения сил дальнодействия, Фарадей видел промежуточный агент. Где они не видели ничего, кроме расстояния, удовлетворяясь тем, что находили закон распределения сил, действующих на электрические флюиды, Фарадей искал сущность реальных явлений, протекающих в среде”.

Теория Максвелла - триумф идей Фарадея. Максвелл, по выражению Роберта Милликена, “облек плебейски обнаженные представления Фарадея в аристократические одежды математики”. Разрабатывая идеи Фарадея, Максвелл в 1862-1864 гг. создал теорию электромагнитного поля и предсказал существование электромагнитных волн, Большинство современников были не в состоянии оценить достигнутые Максвеллом результаты, некоторые называли их бредовыми идеями. Только через двадцать пять лет Г. Герцу удалось подтвердить теорию Максвелла экспериментально.

Генрих Рудольф Герц родился в 1857 г. в семье гамбургского адвоката, а затем сенатора города. Крепким здоровьем не отличался. Проявил выдающиеся способности при освоении гимназического курса. Владел английским, французским, итальянским языками, понимал греческий и арабский. Освоил специальности столяра и токаря. По окончании гимназии в 1875 г. решил стать инженером и поступил в Дрезденскую высшую техническую школу. Однако через два года Герц понял, что ошибся в выборе профессии. Его призвание - наука. По этому поводу

молодой Герц в письме к родителям (1877) приводит слова Шиллера: “Кто трусит жизнью рисковать - тому успеха в ней не знать”. В Берлинском университете руководителем Герца становится Герман Гельмгольц, один из самых видных немецких физиков. В числе его преподавателей были и другие известные физики, например, Г. Р. Кирхгоф.

Вся короткая научная жизнь Герца прошла под покровительством Гельмгольца, а научные взгляды формировались в громадной степени под влиянием взглядов Гельмгольца. Герман Гельмгольц первым среди “континентальных” ученых обратил внимание на теорию Максвелла и сразу оценил ее сильные стороны, ее многогранность и универсальность. И тут проявилось во всей полноте трагическое противоречие научного мировоззрения Гельмгольца: с одной стороны, роль промежуточной среды, подчеркивавшаяся Максвеллом, была для него очевидна, с другой — признать саму промежуточную среду, “ничто”, в качестве физической реальности Гельмгольц не мог. Не мог, прежде всего, потому, что он был последователем знаменитого немецкого философа-идеалиста, агностика И. Канта, отрицавшего возможность познания мира. Отсюда приверженность Гельмгольца к идеям дальнодействия, где в основу без объяснения берутся таинственные непознаваемые свойства материи.

Опирающиеся только на факты, глубоко реалистические в своей основе взгляды Фарадея, обработанные математически Максвеллом, были ему чужды. И в то же время научная добросовестность Гельмгольца не позволяла ему идти против истины “В настоящее время Фарадеево воззрение является единственным, согласным со всеми экспериментальными данными и не противоречащим ни в каком из своих выводов основным законам динамики”.

Для того чтобы примирить свои философские взгляды с бесспорными научными фактами, Гельмгольц должен был пойти на компромисс: он разработал свою собствённую электродинамическую теорию, в которой пытался сочетать не сочетаемое - взгляды Максвелла на роль промежуточной среды и теории немецких приверженцев дальнодействия Вебера и Ф. Неймана.

Двадцатилетний Герц, с несформировавшимися еще взглядами, естественно, попал под влияние великого Гельмгольца и в течение всей своей жизни тщетно пытался разделять его научные взгляды. Тщетно — потому что чём больше экспериментов ставил Герц для проверки теории Гельмгольца, тем радикальней он опровергал ее. Теория Гельмгольца подтверждалась лишь в тех своих частностях, где были использованы идеи Максвелла.

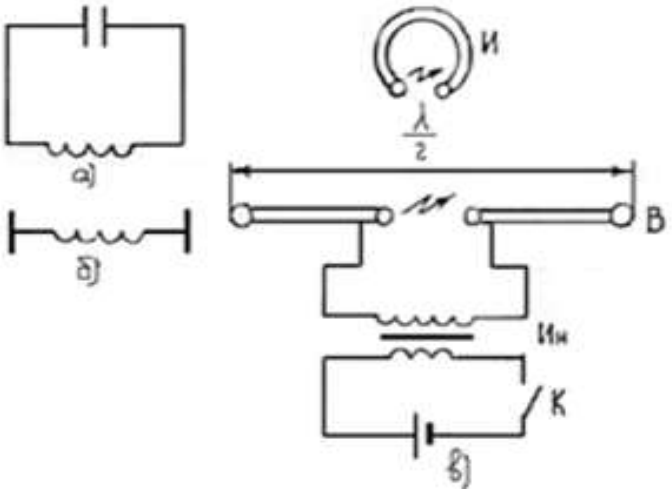

Рис. 78.

Установка, созданная Герцем, очень проста (рис. 78). В колебательном контуре Герца, изображенном на рис. Функция катушки выполняли два медных стержня диаметром 3 см и длиной 9 см. На их концах в качестве эквивалентов обкладок конденсатора располагались медные шары диаметром 4 см. Созданный таким образом вибратор (В) позднее был назван именем изобретателя. Вибратор возбуждался от индуктора Румкорфа в момент проскакивания искры между стержнями. Индуктор — это простейший вариант повышающего трансформатора, в котором индукционные токи возникали при замыкании или размыкании ключа К. В качестве индикатора использовалось отнесенное на несколько метров от вибратора разрезанное медное кольцо. Выяснилось, что мощность искры в разрыве кольца зависит от его размеров. Герц зафиксировал явление резонанса.

Вот три достижения, на основе использования которых были открыты электромагнитные волны:

1. изобретение вибратора (или диполя) Герца, т. е. по сути - первой антенны;
2. переход в область сверхвысоких частот (вплоть до“ $4,5 \cdot 10^8$ Гц);
3. использование явления резонанса при регистрации электромагнитных волн.

Все это ясно теперь: Герц не подозревал об открытии. Налицо был один только факт: разряды между концами вибратора регистрировались на значительном расстоянии от вибратора и даже в другой комнате. Это противоречило выводам из теории Гельмгольца. И чем больше экспериментов ставил Герц для проверки теории Гельмгольца, тем радикальней он опровергал ее. В результате дальнейших экспериментов было обнаружено теневое действие металлических листов, расположенных между вибратором и индикатором (эффект экранирования), и усиливающее действие металлических листов, расположенных за индикатором (эффект рефлектора). Установлен эффект “тени” и прямолинейное распространение получаемых “лучей”.

Если бы прав был Гельмгольц, ничего подобного не должно было быть. Где-то в конце 1887 г. Герц стал понимать, что наблюдаемые эффекты весьма схожи со свойствами света.

Необходимо было доказать возможность фокусировки полученных Герцем волн и их другие свойства, на основании которых появилась бы возможность отождествить наблюдаемые волны со светом. Из оцинкованного листа железа размером 2х1,5 м выгибается параболическое зеркало, в фокусе которого помещается резонатор. Новые “лучи” удается превратить в параллельные! Делается гигантская призма из асфальта с боковой гранью 1,2 м, высотой 1,5 м и массой 1200 кг. При прохождении через нее параллельные “лучи” преломляются. Следует серия трудоемких и чрезвычайно остроумно поставленных экспериментов. Удается установить, что электромагнитные волны, подобно свету, подвержены отражению, преломлению, интерференции, поляризации и дифракции. Удалось измерить длину и рассчитать скорость распространения волн. После этого не осталось практически никаких сомнений в том, что открытые “волны Герца”— предсказанные Максвеллом электромагнитные волны, причем совпадение было не только качественным, но и количественным - по теории Максвелла можно было заранее рассчитывать” практически все характеристики новых волн.

Трудно сейчас представить себе бурю, вызванную открытием Герца. Для физиков это прежде всего означало полный триумф “уравнений Максвелла” и крах всех других электродинамических теорий. Открытия Герца привлекли к себе внимание самых широких слоев общества — ведь суть вновь открытых “волн Герца”, “лучей Герца” была довольно легко доступна для понимания. Многие сразу же предложили создать новую систему связи — без столбов, проводов и кабелей. Один из таких энтузиастов написал Герцу. Ответ был пессимистическим: “Электрические колебания в трансформаторах и телефонах слишком медленные. Если бы вы были в состоянии построить вогнутые зеркала размером с материк, то вы могли бы поставить намечаемые опыты, но практически сделать ничего нельзя: с обычными зеркалами вы не обнаружите ни малейшего действия. По крайней мере, я так думаю”. Более того, от пассивного неприятия идеи о полезности своих волн он скоро перешел к активному - например, он написал в дрезденскую палату коммерции письмо о том, что исследования радиоволн нужно запретить как бесполезные.

Почему так произошло? Вряд ли можно дать четкий ответ. Скорее всего, смущала малая дальность регистрации волн — несколько метров и слабый эффект проявления — короткая искорка в разрядном промежутке.

Годы напряжения, хотя и творческого, колоссальные перегрузки, особенно во время открытия электромагнитных волн, не прошли для Герца безнаказанно. Сначала отказали глаза - явное следствие долгого всматривания в искровой промежуток в .темной комнате в поисках неуловимых, почти нематериальных искр. Его жене пришлось взять на себя дополнительный труд

- читать и писать для Генриха. Затем заболели зубы. Затем уши и нос. Затем - общее заражение крови, от которого на пороге нового 1893 года умер знаменитый Герц, умер в возрасте всего лишь 37 лет. Предчувствуя мрачную развязку, он за несколько недель до смерти писал матери: “Если со мной действительно что-то случится, вы не должны огорчаться, но должны мною гордиться и думать, что я принадлежу к тем особо избранным людям, которые жили хотя и не долго, но вместе с тем жили достаточно. Эту судьбу я не желал и не выбирал, но я доволен ею, и если бы мне предоставили выбор, я, может быть, сам избрал бы ее”.

Так ушел из жизни этот великий человек, удостоенный при жизни великих почестей (едва ли существуют в науке такие награды, премии и медали, которые не были ему вручены).

А после смерти, когда он не мог узнать уже о блестящей судьбе своего изобретения, благодарные потомки воздвигли ему еще один памятник: именем Герца названа единица частоты колебаний - одно колебание в секунду.

ТЕМА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Литература

[Р3]. Гл. IX, XX, XXI.

[Р8]. §§44-51.

[Р11]. Гл. 7, 8.

[Р12]. Гл. XIII.

Вопросы по теоретическому материалу

16. Цепи квазистационарного переменного тока. Методы расчета цепей переменного тока.
17. Метод векторных диаграмм.
18. Метод комплексных амплитуд.
19. Сопротивление в цепи переменного тока**.** Емкость в цепи переменного тока. Индуктивность в цепи переменного тока.
20. Закон Ома для переменных токов.

21. Резонанс напряжений.
22. Резонанс токов.
23. Работа и мощность переменного тока.
24. Трансформаторы.
25. Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея. Закон Ленца.
26. Основной закон электромагнитной индукции.
27. Самоиндукция.
28. Экстратоки самоиндукции.
29. Взаимная индукция. Теорема взаимности.
30. Энергия магнитного поля. Взаимная энергия двух токов.

Качественные вопросы

1. Внутрь короткозамкнутой катушки вставлена другая, по которой идет ток от аккумулятора. Во вторую катушку втягивается железный сердечник, вследствие чего в первой катушке индуцируется ток и она нагревается. За счет какой работы производится нагревание?
2. Почему для создания тока в цепи источник должен затратить энергию?
3. Почему на электростанциях для подводки тока от генератора к повышающим трансформаторам используют не круглые провода, а специальные плоские шины?
4. На рис. 79 приведена векторная диаграмма напряжений цепи переменного тока. Начертить схему соответствующей электрической цепи.

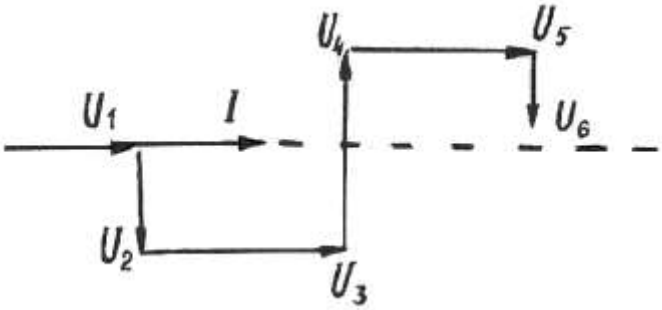

Рис. 79.

5. Алюминиевый диск, подвешенный горизонтально на нити, может свободно вращаться. При быстром вращении расположенного под ним магнита диск начинает вращаться. Почему? В каком направлении? Может ли он вращаться с той же угловой скоростью, что и магнит?
6. Можно ли вскипятить чай в ледяном стаканчике?
7. Почему в генераторах переменного тока, особенно большой мощности, делают так, что индуктор вращается, а обмотка, в которой индуцируется переменная э. д. с., вмонтирована в статор, т. е. остаётся неподвижной?

8. Если на железное ярмо надеть две катушки и через одну из них пропустить переменный ток, то во второй катушке возникнет переменная э. д. с. Если же через первую катушку пропустить постоянный ток, то во второй катушке наведённая э. д. с. будет наблюдается только в момент включения и выключения. Что является причиной наблюдаемых явлений?
9. Почему большие трансформаторы помещают в железные баки с маслом?
10. Трансформатор при работе вхолостую получает из сети небольшую энергию. На что она расходуется? Каков сдвиг фаз в первичной цепи при холостом ходе трансформатора?
11. Что произойдет, если трансформатор, рассчитанный на напряжение первичной цепи 127 В, включить в цепь постоянного тока того же напряжения? Почему к. п. д. у трансформатора значительно выше, чем у электродвигателя?
12. Имеются два соленоида одинаковой длины. Диаметры их отличаются незначительно лишь в такой степени, чтобы один можно было надеть на другой. Индуктивности обоих соленоидов можно считать одинаковыми и равными L. Эти соленоиды можно соединить следующими способами: 1) соленоиды соединены последовательно и находятся в отдалении друг от друга; 2) соленоиды соединены параллельно и находятся в отдалении друг от друга; 3) соленоиды соединены последовательно, один надет на другой, и направления обмоток совпадают; 4) соленоиды соединены параллельно, один надет на другой, и направления обмоток совпадают; 5) соленоиды соединены последовательно, один надет на другой, и направления обмоток противоположны; 6) соленоиды соединены параллельно, один надет на другой, а направления обмоток противоположны. Определить суммарную индуктивность соленоидов для каждого из перечисленных способов.
13. Когда по катушке идет ток, то она вследствие взаимодействия токов стремится изменить свои продольные и поперечные размеры. Как изменится индуктивность катушки при изменении ее размеров?
14. В катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигают магнит, и стрелка гальванометра дает отброс. Затем гальванометр заменяют реостатом, сопротивление которого равно сопротивлению гальванометра, и снова с той же скоростью вдвигают магнит. Одинаковы ли величины индукционных токов в этих случаях?
15. В короткозамкнутую катушку один раз быстро, другой раз - медленно вдвигают магнит. Одинаковое ли количество электричества происходит через катушку в первый и во второй раз? Одинаковую ли работу против электромагнитных сил совершает сила руки, вдвигающей магнит?
16. Спираль, изготовленная из упругой проволоки, присоединена к источнику тока. Спираль растягивают. Станет ли при этом (во время растягивания) ток больше или меньше первоначального или он останется неизменным?
17. На рис. 80 указать неправильно изображенные графики.

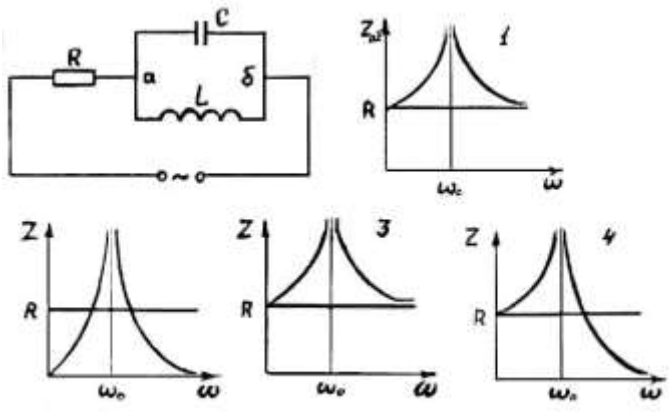

Рис. 80.

18. На рис. 81 указать правильно изображенный график, если $R_1=R_2$.

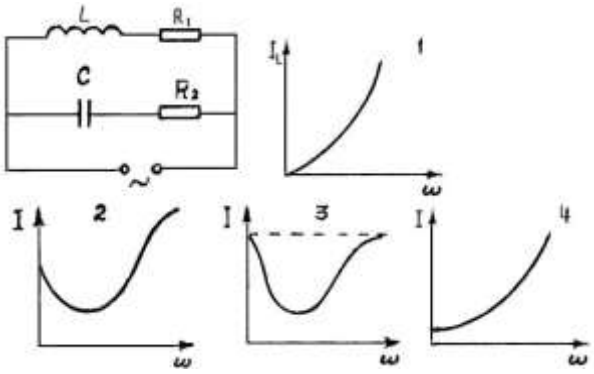

Рис. 81.

19. В электрической цепи резонанс токов (рис. 82). Как изменятся показания приборов, и сохранится ли резонанс, если увеличить сопротивление R?

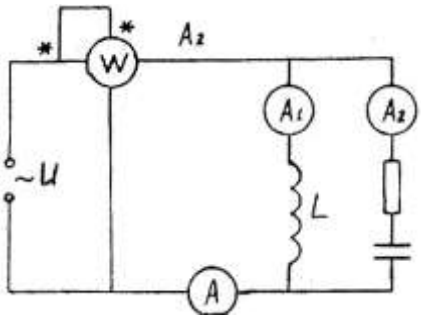

Рис. 82.

20. Как изменятся показания приборов при введении в катушку ферромагнитного сердечника. Если до и после введения сердечника $X_L>X_C$? Потерями мощности в сердечнике пренебречь (рис. 83).

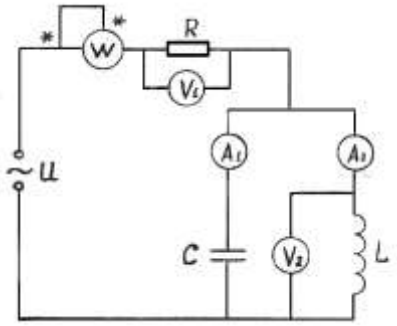

Рис. 83.

21. Какая из векторных диаграмм содержит ошибку, если $X_L>X_C$? (рис. 84).

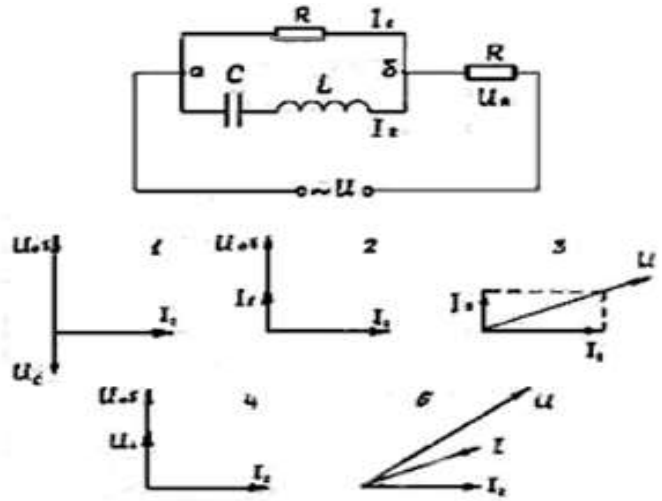

Рис. 84.

Как вы думаете

1. Какой характер имеет такая физическая величина, как частота переменного тока - непрерывный или дискретный? Существуют ли ограничения на частоту переменного тока?
2. Каковы причинно-следственные связи, выражаемые законом Ома для цепи переменного тока?
3. Зависят ли характеристики переменного тока (амплитуда, частота) от системы отсчета, в которой он рассматривается? Может ли характер тока (постоянный или переменный) измениться при переходе из одной системы отсчета в другую?

4. Является ли создание трансформатора исторически обусловленным?
5. Какова идеальная модель трансформатора?
6. Какие противоречивые тенденции необходимо учитывать при конструировании трансформатора?
7. Как используется метод моделирования для исследования сложных электрических систем?
8. Каково объективное содержание векторных диаграмм цепи переменного тока?
9. Какую физическую реальность отражает понятие о реактивной мощности в цепи переменного тока?
10. Чем обусловлен характер явлений, возникающих в электрической системе – отдельными параметрами структурных элементов этой системы или характером их сочетания?
11. Каковы сущность и формы проявления явления электромагнитной индукции?
12. Связано ли явление электромагнитной индукции со свойствами пространства и времени?
13. Зависит ли существование явления электромагнитной индукции от того, в какой системе отсчета рассматривается система?
14. Какую роль сыграла методологическая идея симметрии в открытии явления электромагнитной индукции?
15. Можно ли считать индуктивность абсолютной характеристикой данной катушки?

Проверь себя

1. Показания ваттметра зависят
   a) только от величины активного сопротивления участка, к которому он подключен;
   b) только от величины тока и напряжения на участке, к которому он подключен;
   c) от величины как активного, так и реактивного сопротивления цепи.

2. Увеличения коэффициента мощности для активной нагрузки, подключенной к электродвигателю с большой индуктивностью, добиваются:
   a) включая в цепь конденсатор небольшой емкости;
   b) включая в цепь конденсатор большой емкости;
   c) увеличивая силу тока через нагрузку.

3. Закон Ома $U = I\,[R^2 + (\omega L — 1/\omega C)^2]^{1/2}$ справедлив
   a) для любых переменных токов;
   b) только для синусоидальных токов;
   c) для переменных токов с постоянным периодом колебаний.

4. Сила, вызывающая механические колебания струны (лабораторная работа №26), обусловлена
    a) а) периодическим намагничиванием струны в переменном магнитном поле;
    b) б) взаимной индукцией электромагнита и струны;
    c) в) действием магнитного поля электромагнита на индукционный ток, возникающий в проводнике.

5. Коэффициент мощности в цепи с постоянными индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением
    a) не зависит от частоты и силы тока;
    b) зависит от частоты, но не зависит от силы тока;
    c) зависит как от частоты, так и от силы тока.

6. При резонансе напряжений
    a) сопротивления индуктивности и емкости минимальны, а сила тока максимальна;
    b) сопротивления индуктивности и емкости максимальны, а сила тока минимальна;
    c) полное сопротивление цепи минимально, а сила тока максимальна.

7. Спираль, изготовленная из упругой проволоки, присоединена к источнику постоянного тока. Спираль растягивают. Во время растяжения ток через спираль
    a) остается неизменным, так как ее сопротивление в цепи постоянного тока остается постоянным;
    b) уменьшается;
    c) увеличивается.

Лабораторная работа № 24.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ, ЕМКОСТИ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: изучение характеристик цепи переменного тока.

Приборы и принадлежности: источники постоянного и переменного напряжения; вольтметр; амперметр; реостат; магазин емкостей; набор катушек индуктивности; перекидной рубильник.

Описание экспериментальной установки

В цепи с индуктивностью и активным сопротивлением

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R_0^2}}{\omega} \tag{1}$$

$$Z = \frac{U}{I} \tag{2}$$

$$R = \frac{U_0}{I_0} \tag{3}$$

Здесь U, I - эффективные значения напряжения и тока; U_0, I_0 – соответствующие значения для цепи постоянного тока.

Определив величины Z, R_0, ω, найдем, очевидно, и самоиндукцию. Для этого катушка с неизвестной самоиндукцией L и активным сопротивлением R_0, реостат, амперметр A соединяются последовательно (рис. 85) и подключаются к средним клеммам перекидного рубильника K, к крайним клеммам которого подведены с разных сторон постоянный и переменный токи. Параллельно катушке и амперметру подключается вольтметр V. Оба прибора, вольтметр и амперметр, должны быть пригодны для измерений как постоянного тока, так и переменного.

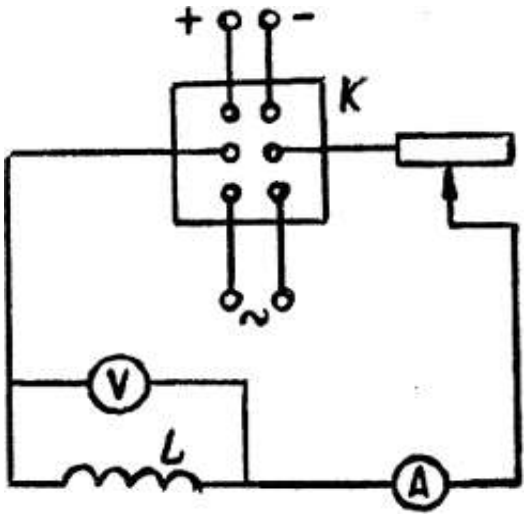

Рис. 85.

Для измерения активного сопротивления катушки устанавливают ползунок реостата на максимум сопротивления (это необходимо делать в целях предохранения приборов от порчи, так как в противном случае сила тока при замыкании рубильника может оказаться больше предельной для данного амперметра и он может перегореть) и, присоединив вольтметр, замыкают рубильник К на постоянный ток. Медленно передвигая ползунок реостата, устанавливают такое положение, чтобы стрелка амперметра дала достаточное для отсчета отклонение.

Измерив затем по приборам силу тока I_0 и напряжение U_0, изменяют переключением контактов число работающих витков катушки и производят дальнейшие измерения. Проделав эти операции для каждого контакта не менее 3—5 раз, подставляют средние результаты измерений в формулу (3) и вычисляют значения активных сопротивлений для каждого из контактов катушки.

При измерениях необходимо иметь в виду следующее: а) рубильник не следует держать дольше, чем это необходимо для производства отсчетов, так как в противном случае катушка нагреется, и сопротивление ее значительно изменится; б) переключение витков катушки следует производить при полностью введенном в цепь сопротивлении реостата.

Для определения полного сопротивления катушки Z замыкают рубильник К на переменный ток. Изменяя положение движка реостата, устанавливают, как и прежде, достаточное отклонение стрелки амперметра. Производя соответствующие отсчеты, изменяют число работающих витков катушки и, действуя далее совершенно аналогично предыдущему, получают для каждого контакта необходимые значения I и U и вычисляют соответствующие значения сопротивления Z.

Определяя таким образом значения R_0 и Z, находят при помощи формулы (1) значения L, по формуле

$$tg\varphi = \frac{\omega L}{R_0}$$

значения ф для каждого из контактов катушки.

В цепи с емкостью и активным сопротивлением

$$C = \frac{1}{\omega\sqrt{Z^2 - R_0^2}}$$

где Z и R_0 — суммарное и чисто активное сопротивление цепи. В случае, когда напряжение измеряется непосредственно на обкладках конденсатора, формула эта значительно упрощается, ибо активное сопротивление в цепи отсутствует: R_0= 0. В этом случае

. $$C = \frac{1}{\omega Z} \qquad (4)$$

Для определения *Z* поступают следующим образом: соединяют последовательно измеряемый конденсатор С, амперметр А и реостат r и приключают их к средним клеммам рубильника К (рис. 86). Параллельно конденсатору присоединяют вольтметр. Реостат r служит здесь лишь предохранителем на случай пробоя и короткого замыкания обкладок конденсатора и должен быть включен на максимальное сопротивление.

Для измерения С замыкают рубильник на переменный ток и отсчитывают по приборам силу тока I и напряжение U. Определив Z по формуле (3), подставляют это значение Z в формулу (4) и вычисляют С.

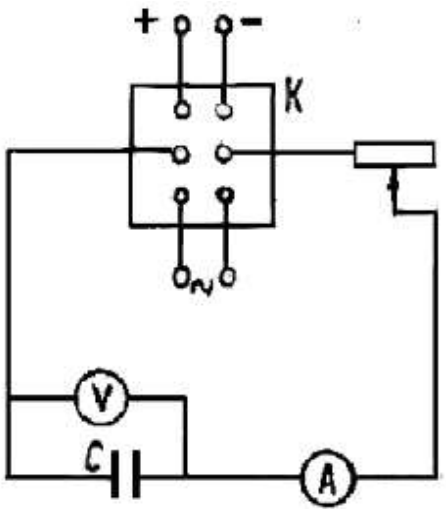

Рис. 86.

Для случая последовательно включенных сопротивления, индуктивности и емкости имеем

$$Z = \sqrt{R_0^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \frac{U}{I} \qquad (5)$$

Для проверки этой формулы в цепь переменного тока включают последовательно: катушку самоиндукции с известным активным сопротивлением R_0 и коэффициентом самоиндукции L, конденсатор с известной емкостью C, регулирующее сопротивление r (реостат) и амперметр A (рис. 87). Параллельно части цепи, содержащей катушку и конденсатор, подключают вольтметр V. Установив реостат r на максимум сопротивления, замыкают рубильник K на переменный ток. Изменяя затем сопротивление реостата, добиваются достаточных показаний приборов и производят отсчет I и U. Полученные результаты подставляют в правую часть формулы (5) и вычисляют Z. С другой стороны, Z определяется вычислением после подстановки в левую часть формулы известных величин R_0, L и C.

Полученные результаты сравнивают для проверки справедливости формулы полного закона Ома для переменного тока.

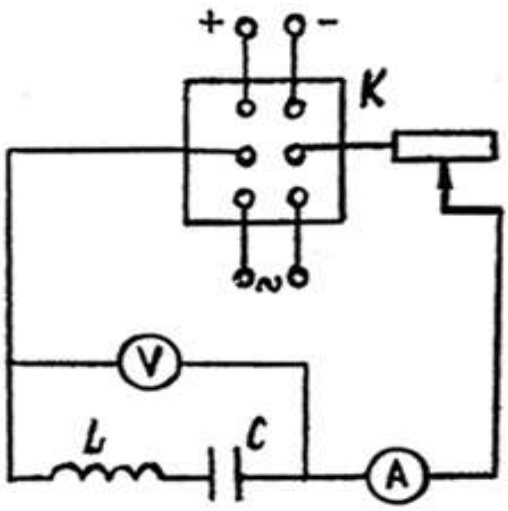

Рис. 87.

Измерения и их обработка

1. Собрать схему, изображенную рис. 85.
2. Провести не менее 3—5 измерений на постоянном токе для выбранного числа витков катушки.

3. Рассчитать R_0.
4. Провести не менее 3—5 измерений на переменном токе для выбранного числа витков катушки.
5. Рассчитать Z.
6. По данным измерений рассчитать L и tgф.
7. Измерения п.п. 2—6 повторить, изменяя переключением контактов число работающих витков катушки.
8. Собрать схему, изображенную на рис. 86.
9. Провести не менее 3—5 измерений на переменном токе для выбранного значения C.
10. По данным измерений рассчитать C и tgф.
11. Измерения п.п. 9, 10 повторить при нескольких значениях емкости.
12. Собрать схему, изображенную на рис. 87.
13. Провести не менее 3—5 измерений при выбранных значениях L и C.
14. По данным измерений рассчитать полное сопротивление цепи.
15. Проверить выполнение закона Ома для цепи переменного тока.

Результаты измерений и расчетов должны быть занесены в таблицы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25.

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ

Цель работы: изучение характеристик цепи переменного тока.

Приборы и принадлежности: источник переменного напряжения; вольтметр; ваттметр; амперметр; реостат; наборы резисторов, индуктивностей, емкостей; ключ.

Описание экспериментальной установки

Как известно из теории переменного тока, средняя мощность, развиваемая током в участке цепи, на котором падение напряжения равно U, выражается соотношением:

$$P = UI \cos \phi \qquad (1)$$

Настоящая задача состоит в исследовании значений cosф в различных цепях переменного тока. Если P, I и U экспериментально определены, то cosф может быть вычислен из соотношения

(1). Среднее значение мощности может быть измерено при помощи специальных приборов — ваттметров.

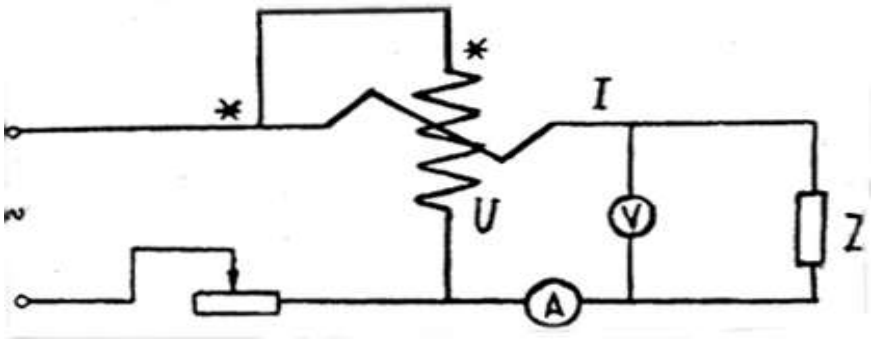

Рис. 88.

Собрав цепь переменного тока по схеме, изображенной на рис. 88, можно, пользуясь измеренными значениями P, I, U, вычислить cos ф. Измерения этих же величин позволяют найти полное сопротивление участка цепи переменному току, равное

$$Z = \frac{U}{I}$$

Из выражения $R' = \frac{P}{I^2}$ можно определить то активное сопротивление, в котором выделяется переменным током джоулево тепло. Пользуясь значениями R' и Z и законом Ома для переменного тока, можно составить выражения:

$$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = Z^2 - (R')^2 = \frac{U^2}{I^2} - \frac{P^2}{I^4} \qquad (2)$$

или

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = \frac{\sqrt{U^2 I^2 - P^2}}{I^2} \qquad (3)$$

а также

$$(P')^2 = U^2 I^2 - P^2 \qquad (4)$$

позволяющие найти индуктивное и емкостное сопротивления цепи и так называемую безваттную мощность P'.

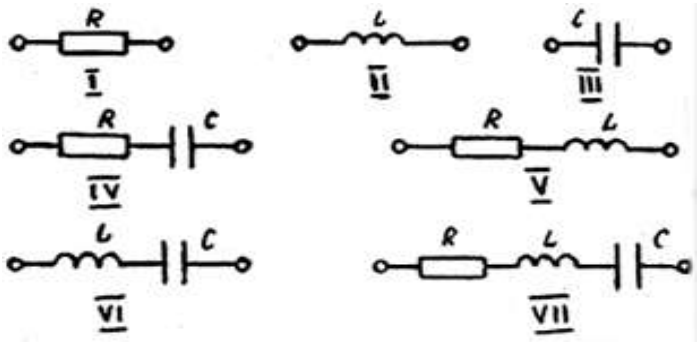

Рис. 89.

Измерения и их обработка

1. Собрать схему, изображенную на рис. 88. Вместо сопротивления Z включать поочередно комбинации нагрузок, изображенные на рис. 89.
2. Произвести измерения при трех-пяти значениях тока в цепи.
3. Произвести расчеты параметров цепи по формулам (1) - (4), определить cosф, R, L, C.
4. Для определения зависимости cos ф от величины индуктивного сопротивления цепи включить в схему, изображенную на рис. 88, катушку с выдвижным сердечником вместо нагрузки Z.
5. Постепенно вдвигая в катушку железный сердечник, измерить значения тока, напряжения и мощности в цепи.
6. Для каждого положения сердечника определить значения cos ф и L. Построить график зависимости cos ф от L.
7. Результаты измерений и расчетов занести в таблицы.

Лабораторная работа № 26.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: измерение частоты переменного тока.

Приборы и принадлежности: линейка с натянутой струной и двумя упорами; электромагнит до 3 А; амперметр до 3 А; реостат до 100 Ом; разновесы; источник переменного тока.

Описание экспериментальной установки

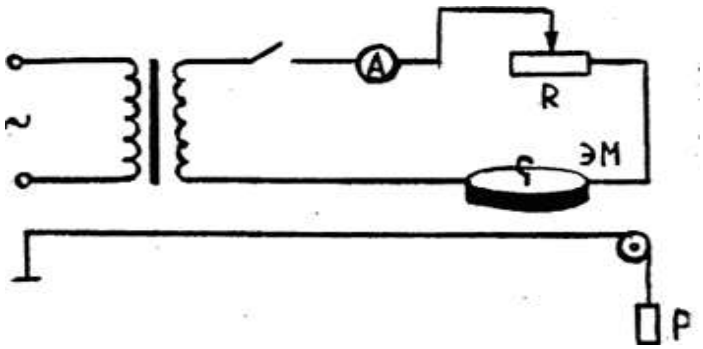

Рис. 90.

Частоту переменного тока можно определить, используя установку, изображенную на рис. 90. Стальная струна, натянутая с помощью груза, находится в переменном магнитном поле электромагнита, расположенного посередине натянутой струны и питаемого током, частоту которого требуется определить. Можно добиться возникновения резонанса (при этом струна будет колебаться с возможно большей амплитудой). Очевидно, при резонансе период переменного тока будет равен двум периодам струны: T = 2t, так как за один период переменного тока магнитное поле электромагнита дважды притягивает струну. Период струны вычисляется по формуле:

$$t = ld\sqrt{\frac{\pi\rho}{mg}},$$

где d — диаметр струны, *l* — длина струны между упорами, g — ускорение силы тяжести, ρ — плотность материала струны (сталь), m — масса груза плюс масса разновеса.

Тогда частота переменного тока

$$\nu = \frac{1}{2t} = \frac{1}{2ld}\sqrt{\frac{mg}{\pi\rho}}$$

Измерения и их обработка

1. Собрать цепь по заданной схеме (рис. 90).

2. Подвести натянутую струну под электромагнит и передвинуть упоры так, чтобы струна колебалась в резонанс.
3. Измерить расстояние между упорами. Следить, чтобы электромагнит находился примерно посередине струны между упорами.
4. Определить массу груза.
5. Измерить длину струны и ее диаметр.
6. Вычислить частоту колебаний.
7. Проделать опыт 5 раз, меняя грузы.
8. По данным измерений вычислить среднюю частоту колебаний.
9. Включить в цепь частотомер и по его показаниям определить частоту переменного тока.
10. Вычислить погрешности.
11. Результаты измерений и расчетов занести в таблицы.

Лабораторная работа № 27.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В ПРОСТЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА [35]

Цель работы: изучение электрических процессов и оценка параметров в цепях, состоящих из последовательно соединенных элементов: а) двух резисторов (цепь RR), б) резистора и конденсатора (цепь RC), в) резистора и катушки индуктивности (цепь RL).

Приборы и оборудование: - модуль ФПЭ-09, в котором собраны изучаемые электрические цепи; генератор PQ; осциллограф PO; источник питания ИП.

Метод измерений

В работе исследуются электрические процессы в цепях, состоящих из следующих последовательно соединенных элементов: а) двух резисторов с сопротивлениями R_1 и R_2 (цепь RR, рис. 91,а); б) резистора R_2 и конденсатора C (цепь RC, рис. 91,б); в) резистора R_2 и катушки индуктивности L (цепь RL , рис. 91,в).

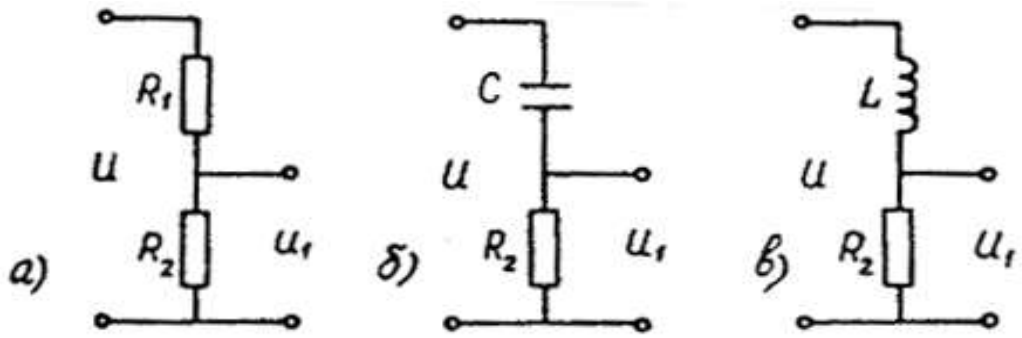

Рис. 91.

Основным параметром, характеризующим изучаемые цепи, является коэффициент передачи цепи К, представляющий собой отношение амплитуды напряжения на выходе цепи V_{01} к амплитуде напряжения на ее входе V_0:

$$K = \frac{V_{01}}{V_0} \tag{1}$$

Напряжение на выходе цепи V_1 равно падению напряжения на резисторе R_2:

$$V_1 = IR_2 \tag{2}$$

т.е. прямо пропорционально току в цепи I и находится в одинаковой с ним фазе. На основании соотношения (2) коэффициент передачи цепи можно записать в виде:

$$K = \frac{I_0 R_2}{V_0} \tag{3}$$

Из соотношения (2) следует, что для измерения угла сдвига фаз между током в цепи I и входным напряжением V достаточно измерить угол сдвига фаз между напряжениями V_1 и V. Для схем, изображенных на рис. 91, найдем аналитический вид выражений для коэффициента передачи цепи К и утла сдвига фаз ф.

1. Цепь RR:

$$\phi = 0; \quad K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{4}$$

2. Цепь RC:

$$\varphi = -arctg\,\frac{1}{R_2 \omega C}; \qquad K = \frac{R_2 \omega C}{\sqrt{1 + (R_2 \omega C)^2}} \tag{5}$$

При высоких частотах (ω → ∞):

$$I_0=V_0/R_2; \quad \phi=0; \quad K\approx 1. \tag{6}$$

Этот результат соответствует тому, что в цепи закорочен конденсатор C.

При низких частотах ($\omega \to 0$):

$$I_0 = V_0\omega C; \quad \phi = -\pi/2; \quad K = R_2\omega C = 2\pi R_2 Cv. \tag{7}$$

Этот результат соответствует тому, что в цепи закорочен резистор R_2.

3. Цепь RL:

$$\varphi = arctg\,\frac{\omega L}{R_2}; \qquad K = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L)^2}}. \tag{8}$$

При высоких частотах ($\omega \to \infty$):

$$I_0=V_0/\omega L; \quad \phi= \pi/2; \quad K \approx \frac{R_2}{\omega L} = \frac{R_2}{2\pi L}\frac{1}{\nu}. \tag{9}$$

Этот результат соответствует тому, что в цепи закорочен резистор R_2.

При низких частотах ($\omega \to 0$):

$$I_0=V_0/R_2; \quad \phi = 0; \quad K\approx 1. \tag{10}$$

Этот результат соответствует тому, что в цепи закорочен резистор R_2.

Это соответствует тому, что в цепи закорочена индуктивность L.

Полученные результаты могут быть использованы для экспериментального определения параметров цепей R, C , L.

Описание экспериментальной установки

На рис. 92, 93 приведены блок-схема и электрическая схема экспериментальной установки.

В кассете ФПЭ-09 собраны изучаемые электрические цепи (рис. 91). В нем находится также коммутатор А, применение которого позволяет наблюдать на экране однолучевого осциллографа одновременно два синусоидальных сигнала. Напряжение с входа изучаемой цепи подается на "Вх1" коммутатора, а напряжение с выхода изучаемой цепи - на "Вх2" коммутатора. С выхода .коммутатора исследуемые напряжения подаются на вход Y осциллографа.

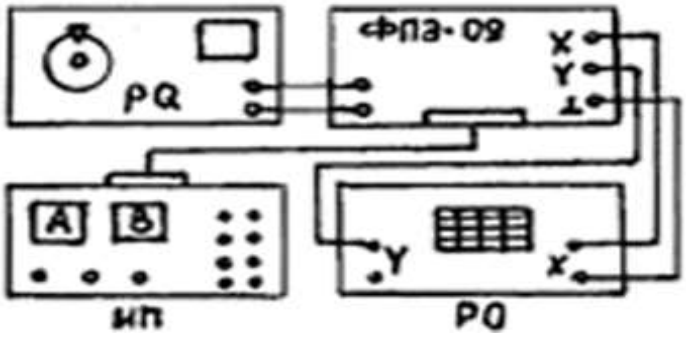

Рис. 92.

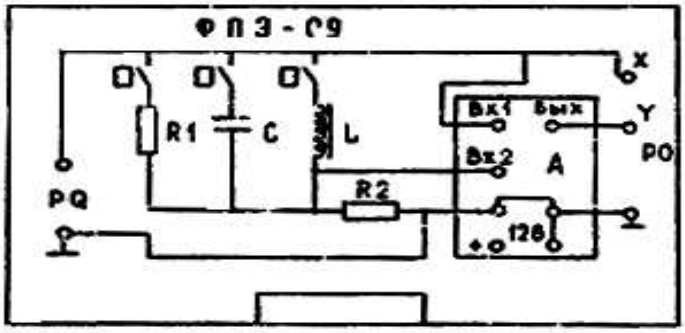

Рис. 93.

Генератор PQ. является источником гармонической ЭДС. Выходное напряжение в частоту генератора можно менять в широких пределах.

Осциллограф PO служит для измерения амплитуд напряжений на входе и выходе цепи, а также для измерения угла сдвига фаз между током в цепи и входным напряжением. Источник питания ИП предназначен для питания схемы коммутатора.

Перед выполнением заданий ознакомиться с описаниями приборов, используемых в данной установке.

Подготовка установки к работе

1. Установить исходное положение кнопочных переключателей на панели модуля ФПЭ-09: все кнопки отжаты.
2. Установить органы управления на панелях осциллографа PO в положение, обеспечивающее измерение амплитуды и развертку во времени переменного напряжения. Тумблер сигнала синхронизации развертки установить в положение синхронизации внешним сигналом.

3. Подготовить к работе генератор PQ и источник питания ИП.
4. Собрать схему, изображенную на рис. 92.
5. После проверки схемы преподавателем или лаборантом присоединить все приборы к сети ~220 В. Включить приборы тумблерами "Сеть". Дать приборам прогреться в точение 3 - 5 мин.
6. Установить следующие параметры выходного сигнала генератора: частота - 20 кГц, напряжение - около 2 В.
7. Установить размах колебаний напряжения генератора на экране осциллографа в пределах примерно 2/3 экрана подбором коэффициента отклонения K_y канала вертикального отклонения осциллографа.
8. Получить устойчивое изображение сигнала генератора на экране.
9. Установить такую длительность развертки, при которой на экране наблюдается 2-3 периода исследуемого сигнала.
10. Отрегулировать окончательно вертикальный размер изображения сигнала генератора на экране осциллографа с помощью ручки плавной регулировки выходного напряжения генератора. Этот размер изображения сигнала генератора рекомендуется поддерживать постоянным при всех измерениях..

Упражнение I. **Изучение электрических процессов в цепи, содержащей два резистора**

1. Замкнуть с помощью кнопочного переключателя на панели модуля ФПЭ-09 ветвь, содержащую резистор R_1.
2. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение двух исследуемых сигналов.
3. Зарисовать наблюдаемые колебания на миллиметровой бумаге. Убедиться, что угол сдвига фаз между током в цепи и входным напряжением равен нулю.
4. Произвести измерение амплитуд напряжений на входе и выходе цепи. Для этого измерить величину амплитуды каждого сигнала в делениях шкалы экрана и умножить полученные значения на коэффициент отклонения K_y канала вертикального отклонения осциллографа.
5. При измерении напряжений с помощью осциллографа, используемого в данной работе, рекомендуется устанавливать таксе значение коэффициента отклонения K_y, при котором размер изображения сигнала по вертикали составляет не менее двух делений шкалы экрана.

6. Рассчитать значение коэффициента передачи цепи К по формуле (1).
7. Определить величину сопротивления резистора R_1 по формуле (4).
8. Оценить погрешности измерения коэффициента передачи цепи и сопротивления резистора R_1.
9. Данные измерений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

V_0			V_{01}			$K= V_{01}/ V_0$	ΔK	R_1, Ом	φ, град
V_0, дел	K_y, В/дел	V_0, В	V_{01}, дел	K_y, В/дел	V_{01}, В				

Упражнение 2. **Изучение электрических процессов в цепи, содержащей резистор и конденсатор**

1. Замкнуть с помощью кнопочного переключателя на панели модуля ФПЭ-09 ветвь, содержащую конденсатор С.
2. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение двух исследуемых сигналов.
3. Зарисовать колебания, наблюдаемые на экране осциллографа при частоте генератора 20 кГц.
4. Определить угол сдвига фаз между током в цепи и входным напряжением при частоте 20 кГц. Для этого измерить в делениях шкалы экрана осциллографа сдвиг по времени Δt между изображениями двух исследуемых сигналов и период колебаний Т (рис. 94). Разность фаз рассчитать по формуле

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} 360 (град) \qquad (11)$$

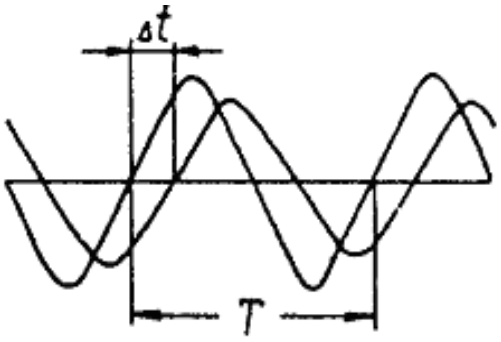

Рис. 94.

5. Повторить п.п. 3,4 при частоте генератора 80 кГц.

6. Провести измерение амплитуд напряжений на входе и выходе цепи при различных значениях частоты генератора ν (по методике, описанной в п.4 упражнения I). Частоту генератора менять в пределах от 20 до 80 кГц сначала с интервалом 5 кГц (до 40 кГц), а затем с интервалом 10 кГц.
7. Рассчитать значения коэффициента передачи цепи К по формуле (1) для всего исследованного диапазона частот.
8. Построить график зависимости коэффициента передачи цепи RC от частоты входного напряжения К = f(ν) .
9. С помощью графика К = f(ν) оценить величину емкости конденсатора С. Для этого воспользуемся линейным участком графика, который описывается формулой (7). Определив тангенс утла наклона линейного участка и приравняв его угловому коэффициенту зависимости (7), получим соотношение $tg\alpha = 2\pi R_2 C$, откуда

$$C = \frac{tg\alpha}{2\pi R_2 C}.$$

10. Рассчитать разность фаз ф по формуле (5) при двух значениях частоты генератора: 20 и 80 кГц. Сравнить результаты расчета с результатами непосредственного измерения угла ф.
11. Данные измерений и вычислений занести в табл. 2.

Таблица 2

ν 10^4 Гц	V_0			V_{01}			$K = \frac{V_{01}}{V_0}$	C, Ф	Δt, дел	T, дел	$\varphi_{изм}$, град	$\varphi_{расч}$, град
	V_0, дел	$K_у$, В/дел	V_0, В	V_{01}, дел	$K_у$, В/дел	V_{01}, В						

Упражнение 3. **Изучение электрических процессов в цепи, содержащей резистор и катушку индуктивности**

1. Замкнуть с помощью кнопочного переключателя на панели модуля ФПЭ-09 ветвь, содержащую катушку индуктивности L
2. Получать на экране осциллографа устойчивое изображение двух исследуемых сигналов.
3. Зарисовать колебания, наблюдаемые на экране осциллографа при частоте генератора 30 кГц.
4. Определить угол сдвига фаз между током в цепи и входным напряжением при частоте 30 кГц. Для этого измерить в делениях шкалы экрана осциллографа сдвиг по времени Δt между изображениями двух исследуемых сигналов в период колебаний T (см. рис. 94). Разность фаз рассчитать по формуле (11).

5. Повторить ил. 3,4 при частоте генератора 100 кГц.
6. Провести измерение амплитуд напряжений на входе и выходе цепи при различных значениях частоты генератора ν (по методике, описанной в пункте 4 упражнения I). Частоту генератора менять в пределах от 30 до 100 кГц с интервалом 10 кГц.
7. Рассчитать значения коэффициента передачи цепи К по формуле (1) для всего исследованного диапазона частот.
8. Построить график зависимости K = f(1/ν).
9. С помощью графика K = f(1/ν) оценить величину индуктивности катушки L. Для этого воспользоваться линейным участком графика, который описывается формулой (9). Определив тангенс угла наклона линейного участка и приравняв его угловому коэффициенту зависимости (9), получим соотношение $tg\alpha = \frac{R_2}{2\pi L}$, откуда $L = \frac{R_2}{2\pi tg\alpha}$.
10. Рассчитать разность фаз ф по формуле (8) при двух значениях частоты генератора: 30 b 100 кГц. Сравнить результаты расчета с результатами непосредственного измерения угла ф.
11. Данные измерений и вычислений занести в табл. 3.

Таблица 3

ν	1/ν,	V_0			V_{01}			$K = \frac{V_{01}}{V_0}$	L,	Δt,	T,	$\varphi_{изм}$,	$\varphi_{расч}$,
10^4 Гц	10^{-5} с	V_0, дел	K_y, В/дел	V_0, В	V_{01}, дел	K_y, В/дел	V_{01}, В		Гн	дел	дел	град	град

Лабораторная работа № 28.

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ

Цель работы: изучение явления взаимной индукции двух коаксиально расположенных катушек.

Приборы и оборудование: звуковой генератор PQ, электронный осциллограф PO, модуль ФПЭ-05, L_1, L_2 – две катушки индуктивности на одной оси; Ш – шток со шкалой, показывающий взаимной расположение катушек L_1 и L_2.

Метод измерений

В данной работе изучается коэффициент взаимной индукции между длинной катушкой 1 и короткой катушкой 2, которая надевается на катушку 1 и может перемещаться вдоль ее оси. Питание одной из катушек, например, 1, осуществляется от генератора звуковой частоты PQ, напряжение с которого

$$U=U_0\cos \omega t \qquad (1)$$

подается через сопротивление R. Вольтметр расположен на панели PQ, измеряет действующее значение напряжения $U_2 = U_0 / \sqrt{2}$. R выбирается таким образом, чтобы выполнить неравенство

$$R >> \sqrt{R_1^2 + L_1^2 w^2} \qquad (2)$$

где L_1 – индуктивность катушки I; R_1 – ее активное сопротивление.

В этом случае ток, протекающий через катушку I, можно определить по формуле

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R}\cos wt = I_{01}\cos wt \qquad (3)$$

Переменный ток в катушке 1 создает переменную ЭДС взаимной индукции в катушке 2:

$$\varepsilon_2 = -M_{21}\frac{dI_1}{dt} = M_{21}\frac{U_0}{R} w\sin wt. \qquad (4)$$

Для измерения ε_2 используется осциллограф. Амплитуда ЭДС взаимной индукции

$$\varepsilon_{02} = M_{21}\frac{U_0}{R} w = M_{21}\frac{U_0}{R} 2\pi f, \qquad (5)$$

где f - частота звукового генератора.

Из (5) имеем:

$$M_{21} = \varepsilon_{02} R / 2\pi f U_0 \qquad (6)$$

Если поменять местами катушки 1 и 2, то можно измерить

$$M_{12} = \varepsilon_{01} R / 2\pi f U_0 \qquad (7)$$

Для перестановки катушек необходимо переключатели $П_1$ и $П_2$ перебросить в противоположное положение (рис. 95).

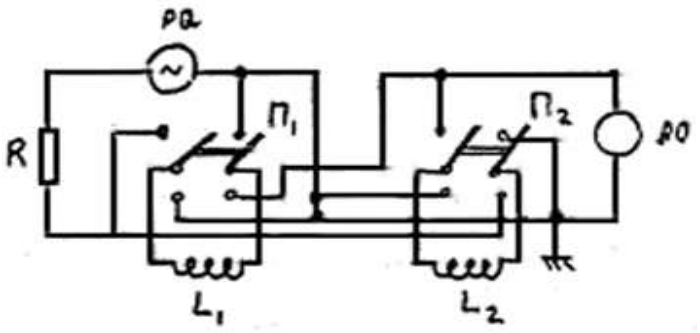

Рис. 95.

Измерения и их обработка

Упражнение 1. **Измерение коэффициентов взаимной индукции M_{21} и M_{12} и исследование их от взаимного расположения катушек.**

1. Собрать схему, изображенную на рис. 96 и 97.
2. Ознакомиться с работой электронного осциллографа и звукового генератора.
3. Задать напряжение U_∂ и частоту f сигнала генератора (по указанию преподавателя), подать напряжение на катушку I (с помощью переключателя $П_1$), а ЭДС катушки 2 подать на осциллограф (с помощью переключателя $П_2$).
4. Установить подвижную катушку 1 в крайнее положение. Перемещая ее в противоположное крайнее положение через 1 см, записывать значение ЭДС взаимной индукции в цепи катушки 2.
5. По формуле (6) рассчитать значение M_{21}. Полученные данные занести в таблицу1.
6. Поменять местами катушки L_1 и L_2 (с помощью переключателей $П_1$ и $П_2$), повторить измерения по пп.2, 3 и рассчитать M_{12}.
7. Построить графики зависимости M_{21} и M_{12} как функции координаты z (z – расстояние между центрами катушек 1 и 2).

Таблица 1

U_∂ = ... f = …						
z, см	ε_{02}		M_{21}	ε_{01}		M_{12}
	дел.	В	Гн	дел.	В	Гн

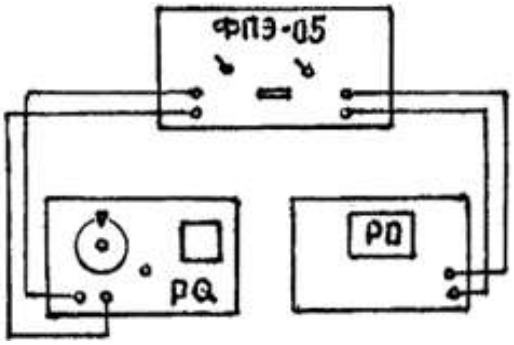

Рис. 96.

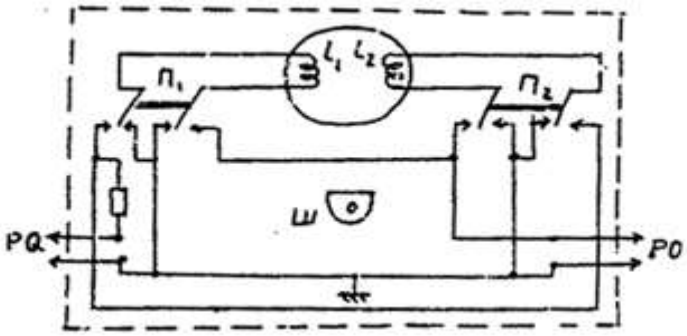

Рис. 97.

Упражнение 2. **Измерение M_{21} при различных значениях амплитуды питающего напряжения.**

1. Поставить катушку 1 в среднее положение относительно катушки 2.
2. Задать частоту питающего генератора по указанию преподавателя (например, 10^4 Гц)
3. Измерить амплитуду ЭДС взаимной индукции ε_{02} при различных значениях напряжения U_∂ в цепи катушки 1 в интервале 0 – 5 В через 0,1 В.
4. По формуле (6) рассчитать M_{21}. Полученные данные занести в таблицу 2.

Таблица 2

f =… R = 10^4 Ом					
U_∂, В					
ε_{02}, В					
M_{21}, Гн					

Упражнение 3. **Измерение M_{21} при различных частотах питающего напряжения.**

1. Поставить катушку 1 в среднее положение относительно катушки 2.
2. Задать амплитуду напряжения генератора по указанию преподавателя (например, 2 В).
3. Измерить амплитуду ЭДС взаимной индукции ε_{02} при различных частотах звукового генератора от 5 до 20 кГц (не менее 10 значений).
4. По формуле (6) рассчитать M_{21}. Полученные данные занести в таблицу 3.
5. Для одного из полученных значений M_{21} рассчитать абсолютную и относительную погрешности ΔM_{21} и $\Delta M_{21}/M_{21}$.

Таблица 3

$U_д$ =… R = 10^4 Ом					
f, Гц					
ε_{02}, В					
M_{21}, Гн					

Это интересно [16, 17]

В канун наступающего XIX столетия немецкий физик Риттер в письме своему последователю Эрстеду высказал такую мысль: годы максимальных наклонений эклиптики, по его мнению, соответствовали годам самых крупных открытий в области электричества. Так, 1745 год отмечен изобретением лейденской банки, в 1782 году появился конденсатор Вольта, в 1801 году - Вольтов столб. “Вы можете теперь вычислить, - писал Риттер, - что эпоха новых открытий наступит в 1819 или 1820 году, и мы сможем стать ее свидетелями”. Прогноз сбылся - в 1820 году Эрстед открыл магнитные свойства электрического тока (интересно, что в 1820 году была открыта и Антарктида). Спустя несколько месяцев после открытия Эрстеда Араго заметил прилипание железных опилок к проволоке с электрическим током. Еще через несколько дней Ампер и Араго изготовили первый соленоид. Задача “превращения электричества в магнетизм” была решена. Встала другая задача - “превратить магнетизм в электричество”. Решение ее принадлежит великому Фарадею. 29 августа 1831 года он собрал в лаборатории следующую несложную установку: на железное кольцо диаметром около шести дюймов он намотал изолированной проволокой две обмотки. Когда Фарадей подключил к зажимам одной обмотки батарею, его ассистент увидел, как дернулась стрелка гальванометра, присоединенного к другой обмотке. Дернулась и успокоилась, хотя постоянный ток продолжал течь по первой обмотке. Фарадей тщательно просмотрел все детали простой установки, все было в порядке. Но стрелка гальванометра упрямо стояла на нуле. С досады Фарадей решил выключить ток, и тут случилось чудо: во время размыкания цепи стрелка

гальванометра, показывающего электрическое напряжение в другой обмотке, опять качнулась и опять застыла на нуле!

Фарадей был в недоумении: во-первых, почему стрелка ведет себя так странно? Во-вторых, имеют ли отношение замеченные им всплески к явлению, которое он искал? Вот тут-то и открылись Фарадею во всей ясности великие идеи Ампера о связи между электрическим током и магнетизмом. Ведь первая обмотка, в которую он подавал ток, сразу становилась магнитом. Если рассматривать ее как магнит, то эксперимент 29 августа показал, что магнетизм как будто рождает электричество. Только две вещи оставались странными: почему всплеск электричества при включении электромагнита стал быстро сходить на нет? И более того: почему всплеск появляется при выключении магнита?

Фарадей ставит серию экспериментов. Эксперимент триумфальный 17 октября. Фарадей заранее знает, как это будет. Опыт удается блестяще. “Я взял цилиндрический магнитный брусок (3/4 дюйма в диаметре, 8/4 дюйма длиной) и ввел один его конец в просвет спирали из медной проволоки (220 футов длиной), соединенной с гальванометром. Потом я быстрым движением втолкнул магнит внутрь спирали на всю его длину, и стрелка гальванометра испытала толчок. Затем я так же быстро вытащил магнит из спирали, и стрелка опять качнулась, но в противоположную сторону. Эти качания стрелки повторялись всякий раз, как магнит вталкивался или выталкивался”.

Секрет в движении магнита! Импульс электричества определяется не положением магнита, а движением! “Это значит, что электрическая волна возникает только при движении магнита, а не в силу свойств, присущих ему в покое”.

Идея оказалась плодотворной. Если движение магнита относительно проводника создает электричество, то, видимо, и движение проводника относительно магнита должно рождать электричество. Значит, есть возможность создать генератор электрического тока, действующего сколь угодно долго, лишь бы продолжалось взаимное движение проволоки и магнита. Здесь путь к современным электрогенераторам. И поскольку Фарадей правильно оценил принцип действия нового устройства, оно было быстро им построено и испытано.

Электрический генератор, предложенный Фарадеем, был оригинальным по принципу действия, но неудобным для практического использования. В лучшем случае он мог служить изящным украшением физических лабораторий. Никому и в голову не приходило, что явление электромагнитной индукции, открытое Фарадеем, может иметь практическое применение

Но... Через несколько недель после открытия Фарадея, таинственный незнакомец с инициалами Р. М. тайно оставил в лондонской квартире Фарадея чертежи электрического

генератора, совершенно необычайной и неожиданной для того времени конструкции. Как писал впоследствии академик М. П. Костенко, “...основные черты машины Р. М. были настолько правильны, что на много лет определили конструкции машин позднейших изобретателей”. Будто он заглянул вперед на несколько десятилетий и избавил человечество от необходимости терять время напрасно. Кто же он, таинственный Р. М.? В ряду людей, поставивших электричество на службу человечеству, его имя осталось неизвестным.

Отметим еще, что независимо от Фарадея летом 1832 г. явление электромагнитной индукции открыл (официально) американский физик Джозеф Генри (1797—1878), единственный американец, которого в 20-х годах прошлого века увлекала проблема взаимоотношения электричества и магнетизма. Узнав, что Фарадей опередил его почти на год, Генри огорченно жаловался своему другу-издателю: “Мне следовало печатать все это раньше... И откуда мне было знать, что кто-то другой по ту сторону Атлантического океана занимается той же проблемой?” Однако с сообщением об открытии явления самоиндукции Генри удалось опередить Фарадея на две недели. Дж. Генри принадлежит ряд изобретений в области электромагнетизма. Так, в 1827 г. Генри начал работу в области физики с изобретения изолированной шелком медной проволоки. В несколько модернизированном виде провода марки ПЭЛШО (провод эмалированный лакированный в шелковой оплетке) выпускаются до настоящего времени и широко используются. В 1831 г. Генри, усовершенствовав открытый В. Стерджеком электромагнит, создал электромагнит с подъемной силой 9800 Н (немыслимая тогда цифра!). В 1835 г. Генри изобрел электромагнитное реле, а в 1838 г. установил факт электромагнитной индукции через кирпичную стену и возможность экранирования электромагнитного поля железными листами. В 1842 г. Генри открыл колебательный характер разряда конденсатора через катушку индуктивности (математическое описание его позднее сделает Томсон). В честь Джозефа Генри названа единица индуктивности генри, принятая на II Международном конгрессе электриков в 1889 г.

Лист обновления/актуализации

Программа обновлена.

Программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры бухгалтерского учета и налогообложения от «31» августа 2020 г., протокол № 1.

Программа одобрена на заседании Совета физико-технического факультета от «31» августа 2020 г., протокол № 1.

Сведения о преподавателе (ППС)

Разработчик:

Елканова Т.М., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и астрономии Северо-Осетинского государственного университета.

Программа одобрена на заседании кафедры физики и астрономии

от _____г., протокол № ___