

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова

С. П. Зимин

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ И МАГНЕТИЗМУ

*Рекомендовано
Научно-методическим советом университета
для студентов всех специальностей
физического факультета*

Ярославль 2010

УДК
ББК

*Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2010 года*

Рецензенты:

Матвеев В.И., д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующей
кафедрой теоретической физики Поморского государственного
университета; кафедра физики и прикладной математики
Владимирского государственного университета

**Зимин, С.П. Физический практикум по электричеству и
магнетизму: учеб. пособие / С.П. Зимин; Яросл. гос. ун-т
им. П.Г.Демидова – Ярославль: ЯрГУ, 2010.- XXX с.**

В учебном пособии содержатся задания и справочные материалы для выполнения лабораторных работ физического практикума по электричеству и магнетизму. Выполнено в соответствии с государственным образовательным стандартом.

Предназначено для студентов 2 курса, обучающихся по всем специальностям физического факультета (дисциплина «Физический практикум», «Общий физический практикум», блок ЕН), очной формы обучения.

Ил.64. Библиогр.: 41 назв.

*Пособие выполнено при частичной финансовой поддержке
программы «Развитие научного потенциала высшей школы на
2009-2010 годы (проект 2.1.1/466)».*

© Ярославский государственный университет,
20010

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное издание содержит описания лабораторных работ для выполнения «Физического практикума» по электричеству и магнетизму. Материалы представленных работ находятся в соответствии с разделами лекционного курса, предназначены для закрепления теоретического материала и овладения навыками проведения эксперимента. Выполнение работ, оформление отчета и защита проводятся в соответствии с общими правилами, действующими в лабораториях физического практикума ЯрГУ. При подготовке к защите работы необходимо прочитать соответствующие разделы учебников и рекомендуемой литературы. Некоторые справочные материалы для вычислений студент найдет в конце учебного пособия. При составлении отчета стоит обратить особое внимание на четкую формулировку физических выводов по каждой экспериментальной работе и грамотное объяснение наблюдаемых зависимостей.

При подготовке данного учебного пособия были использованы и переработаны методические указания прежних лет, разработанные с участием автора и преподавателей физического факультета В.С.Бойденко, М.В.Лоханина, М.Н.Преображенского, А.Л.Яковлева, Н.Е.Мокроусова. В пособие включены несколько новых лабораторных работ, выполняемых на стендах лабораторного комплекса «Электричество и магнетизм», созданных в Южно-Уральском государственном университете и Уральском филиале ФГУП РНПО «Росучприбор». Общая характеристика стендов ЮУрГУ и основные правила работы на них приведены в Приложении 2.

Автор признателен доценту кафедры общей и экспериментальной физики Бойденко В.С. и доценту кафедры технологий в наноэлектронике Кривелевичу С.А. за ценные замечания, высказанные при чтении рукописи.

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы: знакомство с электроизмерительными приборами; изучение обозначений на шкалах приборов; приобретение навыков работы с электроизмерительной аппаратурой.

Приборы и принадлежности: набор электроизмерительных приборов разных типов.

1. Краткая теория

Электроизмерительные приборы предназначены для измерения различных параметров, связанных с производством, передачей и использованием электрической энергии. С их помощью могут быть определены сила тока в цепи, падение напряжения между двумя точками, электрическое сопротивление участка цепи и т.д. Электроизмерительные приборы широко применяются и для измерения неэлектрических величин: температуры, скорости, времени, давления и т.п. В этом случае с помощью специальных датчиков происходит их преобразование в электрические величины, которые и измеряются электроизмерительными приборами.

Измерительным прибором называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала об измеренном параметре в форме доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные приборы состоят из измерительных преобразователей и отсчетного устройства.

Все электроизмерительные приборы классифицируются по следующим основным признакам:

1. По роду измеряемой величины: амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, частотометры, счетчики и т. д.
2. По роду тока: приборы постоянного тока, приборы переменного тока, универсальные.
3. По устойчивости к климатическим воздействиям приборы делятся на следующие группы:

А - для работы в сухих, отопливаемых, закрытых помещениях при температуре от +10 до +35⁰С.

Б - для работы в закрытых неотапливаемых помещениях (подгруппа Б₁ для диапазона температур от +5 до +50⁰С, Б₂ – от –10 до +50⁰С).

В - для работы в полевых и морских условиях (В₁ - от -40 до +50⁰С, В₂ – от –50 до +50⁰С, В₃ – от –50 до +80⁰С).

Кроме приборов групп А, Б, В, выпускаются приборы, предназначенные для работы в тропическом климате. В этом случае к обозначению прибора добавляется буква Т, например, М145Т.

4. По устойчивости к механическим воздействиям приборы разделяются на обыкновенные, обыкновенные с повышенной механической прочностью (ОП), тряскопрочные (ТП), вибропрочные (ВП), тряскоустойчивые (ТН), виброустойчивые (ВН), ударопрочные.

5. По способу преобразования электромагнитной энергии, подводимой к прибору, в механическую энергию перемещения подвижной части, приборы разделяются на магнитоэлектрические с подвижной рамкой, магнитоэлектрические с подвижным магнитом, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, индукционные, магнитоиндукционные, электростатические и вибрационные (язычковые).

6. По преобразователям в электрической цепи приборы разделяются на выпрямительные с полупроводниковым выпрямлением, с механическим выпрямлением и термоэлектрические.

7. По количеству диапазонов измерительные приборы разделяются на однодиапазонные (однопредельные) и многодиапазонные (многопредельные).

8. По защищенности от воздействия окружающей среды приборы разделяются на обыкновенные, магнитозащищенные, водозащищенные, герметические, газозащищенные, защищенные от агрессивной среды и т.д.

Приборы могут также классифицироваться по многим другим признакам, например, по способу создания противодействующего момента, по конструкции опор подвижной части, по виду шкалы и указателя.

2. Погрешности измерительных приборов. Класс точности

Электроизмерительные приборы характеризуются абсолютной и относительной погрешностью.

1. *Абсолютной* погрешностью ΔX называется разность между показаниями прибора $X_{ИЗМ}$ и истинным значением измеряемой величины $X_{ИСТ}$:

$$\Delta X = X_{ИСТ} - X_{ИЗМ}. \quad (1.1)$$

2. *Приведенной, или нормированной*, погрешностью называется отношение абсолютной погрешности ΔX к нормирующему значению $X_{НОРМ}$:

$$\gamma = \pm \frac{100\Delta X}{X_{НОРМ}} \%. \quad (1.2)$$

Нормирующее значение выбирается равным значению рабочей части шкалы, а для приборов с двухсторонней шкалой (с нулем посередине) - сумме конечных значений рабочей части шкалы.

3. *Относительная* погрешность определяется как отношение абсолютной погрешности ΔX к измеренному (истинному) значению:

$$\delta = \pm \frac{100\Delta X}{X_{ист}} \%. \quad (1.3)$$

Допускается использование $X_{ИЗМ}$ вместо $X_{ИСТ}$.

Точность прибора является основной его характеристикой. По степени точности измерений приборы делятся на 7 классов: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.

Показатель класса определяет приведенную погрешность измерения в процентах. Например, миллиамперметр класса 1.5 со шкалой 300 мА дает в любом месте шкалы абсолютную погрешность:

$$\Delta X = \pm 300 \frac{1.5}{100} = \pm 4.5 \text{ (мА)}. \quad (1.4)$$

Приборы класса 0.1, 0.2, 0.5 применяются для точных лабораторных измерений и называются прецизионными. В технике используются менее точные приборы классов 1.0 - 4.0. Класс прибора обычно указывается на его шкале. Приборы с погрешностью более 4% считаются внеклассными.

Важными характеристиками приборов являются их чувствительность и цена деления.

Цена деления C определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение на одно деление, или разность значений измеряемой величины для двух соседних меток шкалы. Цена деления прибора зависит от предела измерений и числа делений шкалы.

Чувствительность $S = 1/C$ есть величина обратная цене деления, она характеризует отношение изменения величины на выходе (например показания прибора α) к вызывающему его изменению величины X на входе:

$$S = d\alpha/dX. \quad (1.5)$$

Размерность чувствительности зависит от характера измеряемой величины (например, чувствительность к току - деление на ампер, к напряжению - деление на вольт и т. д.). При равномерной шкале чувствительность и цена деления в различных точках шкалы постоянны.

При отсчете луч зрения должен быть перпендикулярным к шкале, иначе возможна погрешность от параллакса. Избежать параллакса позволяют зеркальные шкалы. При отсчете глаз должен быть расположен так, чтобы конец стрелки покрывал свое изображение в зеркале.

На шкалу прибора обычно наносятся символы, указывающие принцип действия прибора, род тока (постоянный или переменный), рабочее положение прибора (вертикальное или горизонтальное), пробивное напряжение изоляции, класс точности, знак завода изготовителя. Иногда указывается температурная группа (А, Б, В). Условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы, указаны в таблице 1 Приложения.

3. Устройство некоторых электроизмерительных приборов

3.1. Магнитоэлектрическая система. Приборы этой системы предназначены для измерения силы и напряжения постоянного тока. С различными преобразователями приборы магнитоэлектрической системы применяются и для других измерений. Ввиду простоты конструкции, надежности, высокой

чувствительности, малого собственного сопротивления приборы этой системы являются основными лабораторными приборами. Устройство приборов магнитоэлектрической системы показано на рис. 1.1.

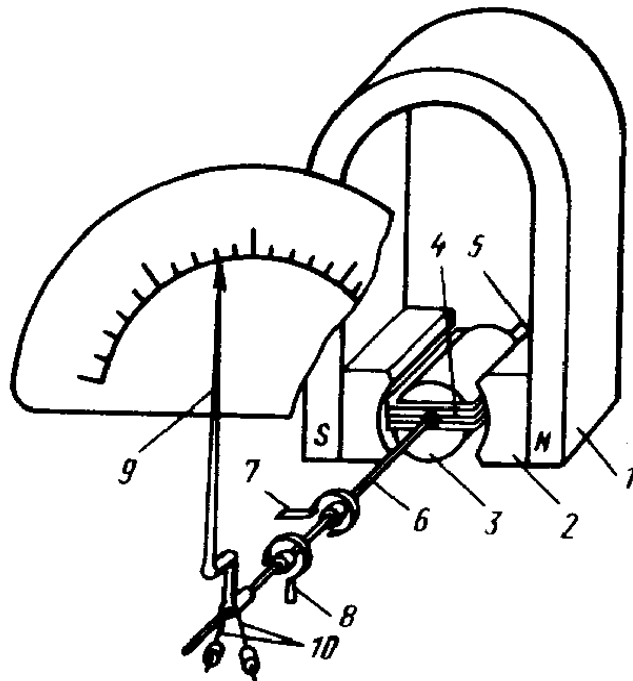


Рис.1.1. Прибор магнитоэлектрической системы

Принцип действия основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и поля подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток. Теория взаимодействия рамки с током в магнитном поле описана в учебнике. Отметим некоторые конструктивные особенности.

Постоянный магнит 1, магнитопровод с полюсными наконечниками 2 и неподвижный сердечник 3 составляют магнитную систему механизма. В зазоре между полюсными

наконечниками и сердечником создается сильное равномерное радиальное магнитное поле, в котором находится подвижная прямоугольная катушка (рамка) 4, намотанная медным или алюминиевым проводом на алюминиевом каркасе. Катушка закреплена между полуосями 5 и 6. Спиральные пружины 7 и 8 предназначены для создания противодействующего момента. Рамка жестко соединена со стрелкой 9.

Как следует из теории, вращающий момент сил, действующих на рамку с током в магнитном поле, пропорционален току I , т. е. $M_1 = K_1 I$. Противодействующий момент, создаваемый пружинами, пропорционален углу поворота α , т. е. $M_2 = K_2 \alpha$; следовательно, угол поворота рамки (и связанной с ней стрелки) можно найти из условия равновесия моментов: $M_1 = M_2$ или $\alpha = KI$, где $K = K_1/K_2$. Таким образом, шкала приборов магнитоэлектрической системы линейная. Т. к. каркас рамки сделан из алюминия, то возникающие в нем индуктивные токи при движении рамки в магнитном поле

создают тормозящий момент, что обуславливает быстрое ускорение подвижной системы.

Недостатками приборов магнитоэлектрической системы являются сложность конструкции, высокая стоимость, чувствительность к перегрузкам и необходимость преобразователей для измерений на переменном токе.

3.2. Электромагнитная система. Приборы этой системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного и переменного токов. Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки 1, по которой протекает измеряемый ток, и подвижного железного сердечника 2 (рис. 1.2). Сердечник 2 особой формы закреплен эксцентрично на оси и может входить в щель катушки, поворачиваясь вокруг оси. Под действием магнитного поля катушки сердечник втягивается в нее.

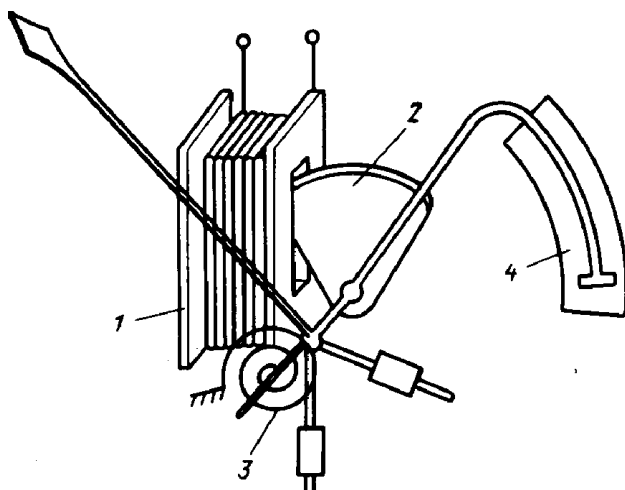


Рис.1.2. Прибор электромагнитной системы

Противодействующий момент создаётся пружиной 3.

Приборы электромагнитной системы снабжены воздушным успокоителем 4, представляющим собой камеру, в которой помещается алюминиевый поршень. При повороте сердечника поршень встречает сопротивление воздуха, вследствие чего колебания подвижной части быстро затухают. Магнитное

поле катушки пропорционально току I , намагничивание железного сердечника тоже увеличивается с возрастанием тока, поэтому можно считать, что вращающий момент пропорционален квадрату тока $M_1 = K_1 I^2$.

Противодействующий момент пружины $M_2 = K_2 \alpha$. При равновесии $M_1 = M_2$, откуда $\alpha = K I^2$. Т. е. шкала прибора электромагнитной системы приблизительно квадратичная. С изменением направления тока меняется как направление

магнитного поля, так и полярность намагничивания сердечника, поэтому приборы электромагнитной системы применяются для измерения как на постоянном токе, так и на переменном токе низких частот.

Недостатками приборов этой системы являются неравномерность шкалы, меньшая точность, зависимость от внешних магнитных полей (в механизмах без магнитопровода), большое собственное потребление мощности.

3.3. Электродинамическая система. Электродинамические приборы применяются для измерения тока, напряжения и мощности постоянного и переменного токов. Принцип действия основан на взаимодействии магнитных полей двух катушек, по которым протекает измеряемый ток. Внутри неподвижной катушки 1 (рис. 1.3) может вращаться по оси катушка 2, с которой связана стрелка. Противодействующий момент создается пружиной. Измеряемый ток протекает через обе катушки. В результате взаимодействия поля неподвижной катушки и тока в подвижной создается вращающий

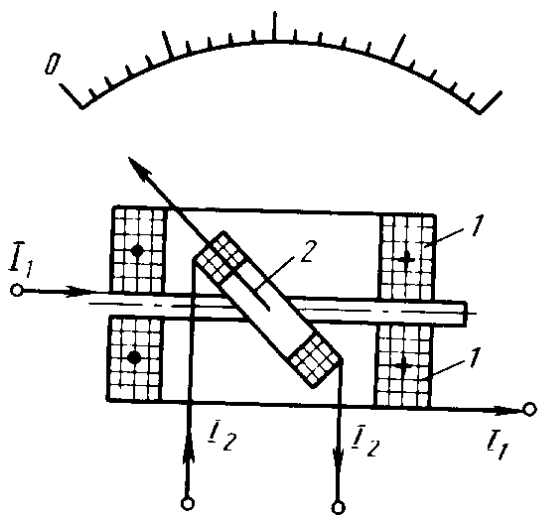


Рис.1.3. Прибор электродинамической системы

момент M , под действием которого подвижная катушка будет стремиться повернуться так, чтобы плоскость ее витков стала параллельной плоскости витков неподвижной катушки, а их магнитные поля совпадали бы по направлению. Вращающий момент приблизительно пропорционален току I_2 в неподвижной катушке и току I_1 в подвижной, т. е. $M_1 = K I_1 I_2$. Противодействующий момент пружины, как обычно равен $M_2 = K \alpha$ (α - угол

поворота). Из условия равновесия $M_1 = M_2$: $\alpha = K I_1 I_2$. При последовательном соединении катушек $I_1 = I_2$ и $\alpha = K I^2$, т. е. шкала приборов электродинамической системы неравномерная.

При перемене направления тока в обеих катушках направление вращения может не меняться, следовательно, приборы этой системы

пригодны как для измерения на постоянном токе, так и на переменном. Для измерения мощности неподвижная катушка делается из толстой проволоки с небольшим числом витков и включается последовательно в цепь. Подвижная катушка содержит большое число витков тонкой проволоки, включается

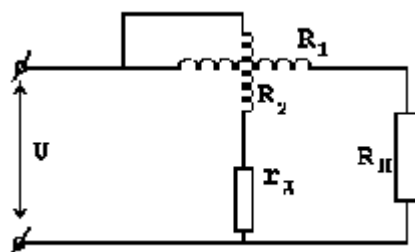


Рис.1.4. Измерение мощности в приборах электродинамической системы

параллельно нагрузке R_H (рис.1.4). Для увеличения ее сопротивления последовательно включается добавочное сопротивление r_d . Допустим, ток в первой катушке I_1 , а во второй I_2 . По закону Ома напряжение на зажимах нагрузки $U = I_2(R_2 + r_d)$. Откуда $I_2 = U/(R_2 + r_d)$. Подставляя значение I_2 в

условие равновесия моментов $\alpha = KI_1I_2$, получим $\alpha = (K/(R_2 + r_d))I_1U = K_3I_1U = K_3P$, где $K_3=K/(R_2+r_d)$. Т. е. отклонение альфа пропорционально мощности P , причем шкала равномерная. Недостатками приборов этой системы являются неравномерность шкалы у вольтметров и амперметров, чувствительность к перегрузкам и внешним магнитным полям, большое собственное потребление мощности, невысокая чувствительность.

3.4. Электростатическая система. Принцип действия приборов электростатической системы основан на взаимодействии двух или нескольких электрически заряженных проводников. Под действием сил электрического поля подвижные проводники перемещаются относительно неподвижных. Приборы этой системы применяются в основном как вольтметры для измерения высоких напряжений.

3.5. Индукционная система. Принцип действия приборов индукционной системы основан на взаимодействии токов, индуцируемых в подвижной части прибора, с магнитными потоками неподвижных электромагнитов. К индуцированным приборам относятся счетчики переменного тока и некоторые ваттметры.

3.6. Тепловая система. Принцип действия приборов тепловой системы основан на изменении длины проводника, по которому

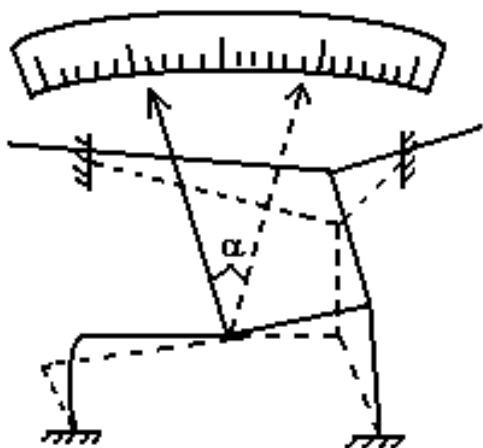


Рис.1.5. Прибор тепловой системы

протекает ток, вследствие его нагревания (рис.1.5). Количество теплоты, выделяемое током $Q = I^2 R t$, не зависит от напряжения, и приборы тепловой системы пригодны для измерений на постоянном и переменном токе. Шкала неравномерная.

Недостатками приборов тепловой системы являются неравномерность шкалы, тепловая инерция, зависимость показаний от температуры среды.

3.7. Вибрационная система. Устройство приборов этой системы основано на резонансе при совпадении частот собственных механических колебаний подвижной части прибора с частотой переменного тока, приборы этой системы применяются в качестве герцметров для измерения частоты.

4. Многопредельные приборы

Измерительный прибор, электрическую схему которого можно переключать для изменения интервалов измеряемой величины, называется многопредельным. Для амперметров изменение пределов достигается включением различных шунтов, для вольтметров - включением добавочных сопротивлений.

Шунтом называется сопротивление $r_{ш}$, включаемое в цепь параллельно амперметру, после чего в амперметр ответвляется только часть измеряемого тока (рис. 1.6). Например, если необходимо измерять амперметром ток, в n раз больший возможного для данного прибора, то надо включить сопротивление $r_{ш}$, удовлетворяющее равенству $r_{ш} = r_A / (n - 1)$,

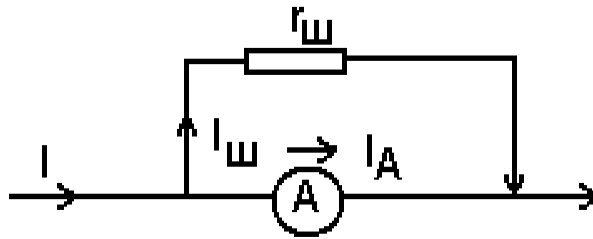


Рис. 1.6. Подключение шунта

где $n = I/I_A$, I - ток в цепи, I_A - ток через амперметр, r_A - сопротивление амперметра.

Для расширения пределов измерений вольтметров применяется добавочное сопротивление, включаемое последовательно с вольтметром (рис. 1.7). Его величина r_0 рассчитывается из условия $r_0 = r_V(n - 1)$, где $n = U/U_V = r/r_V$, U - полное подводимое напряжение, U_V - напряжение на вольтметре, $r = r_0 + r_V$ - полное сопротивление, r_V - сопротивление вольтметра.

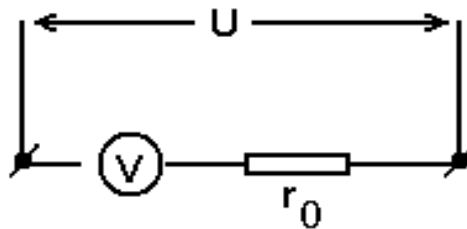


Рис. 1.7. Расширение пределов вольтметра при помощи добавочного сопротивления

Наличие многопредельных приборов связано с тем обстоятельством, что часто требуется измерять электрические величины в очень широком диапазоне с достаточной степенью точности в каждом интервале. В этом случае один многопредельный прибор заменяет несколько однотипных приборов. Допустим, имеется прибор класса 1.5 со шкалой 0-30 мА, тогда абсолютная погрешность будет

$$\Delta I = 0,015 \cdot 30 = 0,45 \text{ (мА)}.$$

При измерении тока в 20 мА относительная погрешность будет

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{0,5}{20} \cdot 100 = 2,5\%.$$

Если же измерять этим прибором ток в 1 мА, то относительная погрешность будет

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{0.5}{1} \cdot 100 = 50\%$$

В таких случаях многопредельный прибор переключают на меньший предел, чтобы стрелка отклонялась на максимальный угол, но не выходила за пределы шкалы. Иными словами, многопредельный прибор следует включать так, чтобы относительная погрешность была минимальной. Иногда многопредельные приборы снабжаются различными шкалами. Отсчет производится по шкале, соответствующей включению прибора. Часто многопредельные приборы имеют одну шкалу. При измерениях такими приборами необходимо определить переводной коэффициент $K = a/N$, где a - максимальное значение величины, которое можно измерить при данном включении прибора, N - число, стоящее против последнего деления шкалы прибора. Для нахождения значения измеряемой величины отсчет в цифрах шкалы, соответствующий этой величине, необходимо умножить на переводной коэффициент. Иногда число делений шкалы и отсчета совпадают.

При использовании многопредельных приборов необходимо соблюдать следующие правила:

1. Приблизительно оценивают величину, подлежащую измерению.
2. Прибор включают на максимальный предел измерений.
3. Определяют грубо измеряемую величину, умножив отсчет на переводной коэффициент данного диапазона.
4. После этого переводят на тот диапазон, верхний предел которого ближе всего к значению измеряемой величины.
5. Если измеряемая величина увеличивается, то измерения продолжают, пока стрелка не подойдет к концу шкалы, а потом переходят на следующий (большой диапазон). В случае уменьшения величины измерения продолжают до тех пор, пока измеряемая величина не достигнет верхнего предела следующего меньшего диапазона, после чего переходят на этот диапазон.
6. В случае применения комбинированных приборов (т. е. приборов, предназначенных для измерения различных величин: тока, напряжения, сопротивления и т. п.) необходимо каждый раз тщательно проверять соответствие установки переключателей рода работы измеряемой величине.

5. Собственное сопротивление прибора

Все электроизмерительные приборы обладают собственным внутренним сопротивлением R , которое включает в себя сопротивление рамки, шунта или добавочного сопротивления. Поэтому включение в схему прибора изменяет режим работы цепи. Внутреннее сопротивление обычно указывается на шкале. Иногда указывают не R , а падение напряжения на приборе (для амперметров) или ток, протекающий через вольтметр.

Для вольтметров R должно быть достаточно большим, т. к. они включаются параллельно участку цепи. Включение вольтметра считается правильным, если его сопротивление более чем на два порядка превышает сопротивление участка, к которому он подключен. В общем случае погрешность, вносимая прибором должна быть значительно меньше погрешности, определяемой классом прибора. Если это условие не выполняется, то при различных измерениях необходимо учитывать влияние R на характеристики цепи.

6. Пять золотых правил при работе с электроизмерительными приборами

1. Убедитесь, что выбранный вами прибор по пределам измерений, по роду тока, по классу точности и т.д. соответствует цели проводимого эксперимента.

2. Расположите электроизмерительные приборы так, чтобы они и измеряемые объекты своими электромагнитными полями не влияли друг на друга. В противном случае используйте заземление приборов и кабели с защитным экраном. Подключение приборов к цепи должно быть надежным, поскольку любое неплотное соединение подводящих проводов приводит к появлению шумов и нестабильности показаний.

3. Подготовьте приборы к измерениям согласно инструкции к каждому прибору. Цифровые приборы требуют прогрева 20-60 минут и периодической калибровки во время длительной работы.

4. Во время проведения измерений убедитесь, что измеряемые величины стабильны, воспроизводимы, имеют одинаковые значения на разных пределах. Если наблюдаются колебания показаний около некоторого значения, то оцените реальную погрешность измерения.

5. Строго следуйте безопасным методам работы при проведении эксперимента.

7. Выполнение работы

1. Изучить обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы (таблица Приложения 1).

2. Ознакомиться со всеми электроизмерительными приборами, находящимися на лабораторном столе и дать им краткую характеристику.

3. Результаты оформить в виде таблицы:

	Назначение	Тип	Система	Предел	Род тока	Диапазон температур	Внутреннее сопротивление	Класс точности	Чувствительность	Цена деления	Абсолютная ошибка

Контрольные вопросы

1. Что такое класс точности прибора?
2. Как, используя класс точности, определить погрешность измерения?
3. Поясните принцип действия приборов магнитоэлектрической (электромагнитной, электродинамической, электростатической, индукционной, тепловой, вибрационной) системы.
4. Сформулируйте правила работы с многопредельными приборами.
5. Почему важно знать собственное сопротивление прибора?

Литература

1. *Электрические измерения* / Под ред. А.В.Фремке, Е.М.Душина. Л.: Энергия, 1980.
2. *Электрические измерения* / Под ред. В.Н.Малиновского. М.: Энергоиздат, 1982.
3. *Писаревский Э.А.* Электрические измерения и приборы. М.: Энергия, 1970.
4. *Шабалин С.А.* Ремонт электроизмерительных приборов.- М.: Изд-во стандартов, 1989.

Лабораторная работа №2

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ

***Цель работы:** ознакомление с классическим методом измерения сопротивлений при помощи мостовой схемы Уитстона.*

***Приборы и принадлежности:** лабораторный макет, нуль-гальванометр, источник постоянного тока, магазины сопротивлений, соединительные провода, эталонный резистор, резисторы с неизвестным сопротивлением.*

1. Краткая теория

Измерение и контроль параметров электрических цепей является важной задачей исследователя при создании приборов и устройств современной электроники. Для экспериментального определения величины активного электрического сопротивления резисторов и элементов схем разработаны несколько способов: метод вольтметра и амперметра, метод вольтметра и образцовой меры, метод замещения, мостовой метод и т.д. Метод вольтметра и образцовой меры будет использован нами в лабораторной работе №3, метод замещения оставим студенту для самостоятельного изучения. Физическую основу остальных подходов рассмотрим ниже.

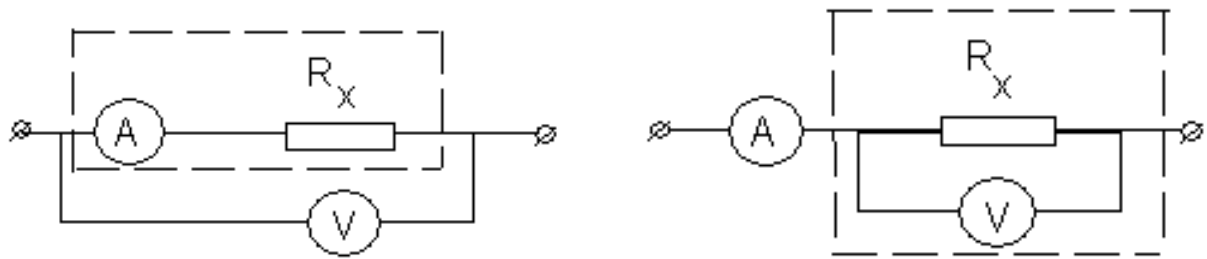
1.1. Измерение активных сопротивлений с помощью амперметра и вольтметра

Данный способ измерения неизвестного сопротивления R_x основан на непосредственном измерении силы тока I , протекающей через сопротивление, и падении напряжения U на нем. В самом простом случае грубая оценка величины сопротивления проводится по закону Ома:

$$R_x = \frac{U}{I}. \quad (2.1)$$

Для измерения сопротивления этим методом необходимы два измерительных прибора, вольтметр и амперметр с точной градуировкой шкалы, которые могут быть включены в цепь с измеряемым сопротивлением по одной из двух схем, изображенных на рис.2.1. Точные значения величины

сопротивлений вычисляются с учетом внутренних сопротивлений амперметра R_A и вольтметра R_V .



$$R_X = \frac{U}{I_{R_X}} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}$$

$$R_X = \frac{U_{R_X}}{I} = \frac{U}{I} - R_A$$

Рис. 2.1. Электрические схемы и рабочие формулы, предназначенные для определения величины сопротивления по методу амперметра и вольтметра.

Из приведенных формул следует, что для точного измерения сопротивлений этим методом кроме показаний измерительных приборов необходимо знание их внутренних сопротивлений. Использование формулы (2.1) в случае левой схемы приводит к систематически заниженному значению сопротивления, а для правой схемы - к завышенному значению.

1.2. Мост Уитстона постоянного тока

От недостатков описанного метода (систематические ошибки, необходимость использования измерительных приборов с точно градуированной шкалой и известным внутренним сопротивлением) свободен метод мостовых схем, использующий другой принцип измерений. Рассмотрим его на примере моста, предложенного в середине 19 века Чарльзом Уитстоном (Wheatstone).

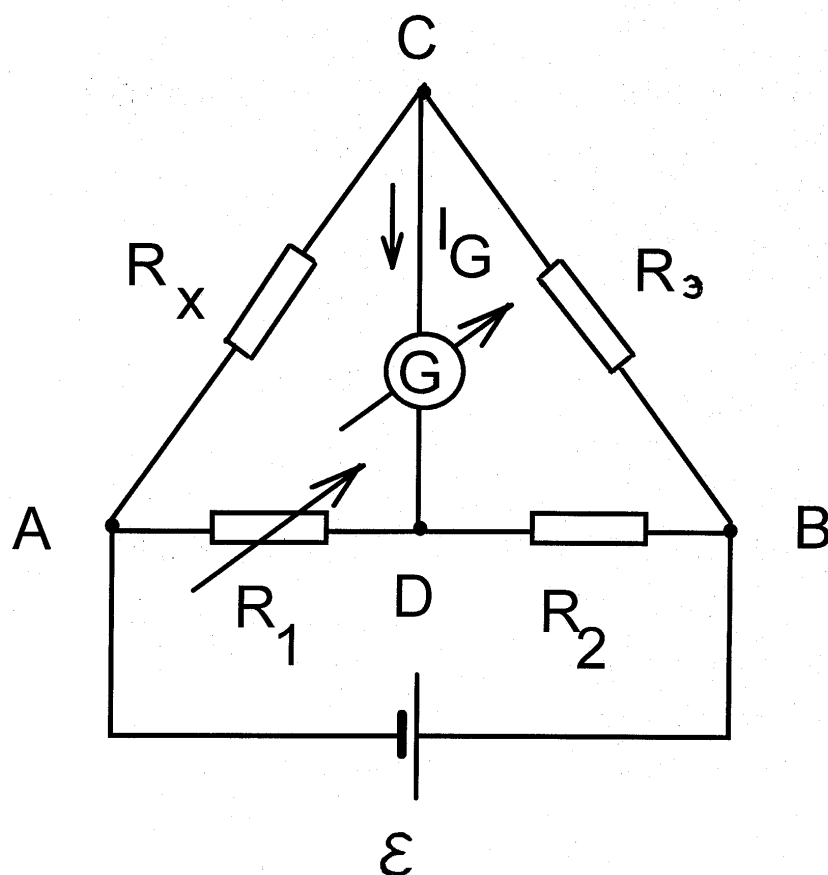


Рис.2.2. Мост Уитстона для измерения сопротивлений.

Схема моста (рис. 2.2) состоит из четырех плеч, каждое из которых содержит одно сопротивление - неизвестное сопротивление R_x , известное (эталонное) сопротивление R_3 , изменяемые сопротивления R_1 и R_2 . При указанном соединении имеются две параллельные ветви ACB и ADB, между которыми включен гальванометр G, являющийся индикатором равновесия. Точки A, C, B, D называются узлами моста, участки AC, CB, AD, DB - плечами моста, диагональ CD, в которую включен гальванометр, называется собственно мостом (от него получила название и вся схема).

При подключении к диагонали AB источника постоянного тока ε в участках цепи возникает ток. Однако для любых R_x и R_3 можно подобрать такие значения сопротивлений R_1 и R_2 , что потенциалы точек C и D будут одинаковы. В этом случае ток через гальванометр G не течет, и говорят, что мост уравновешен или сбалансирован. При этом токи, текущие через R_x и R_1 , в узлах C и D не разветвляются:

$$I_{R_x} = I_{R_3} = I_1; I_{R_1} = I_{R_2} = I_2. \quad (2.2)$$

Можно записать:

$$U_{AC} = U_{AD}; \quad U_{CB} = U_{DB}. \quad (2.3)$$

Согласно закону Ома для участка цепи имеем:

$$U_{AC} = I_1 R_X, \quad U_{AD} = I_2 R_1, \quad U_{CB} = I_1 R_{\Sigma}, \quad U_{DB} = I_2 R_2. \quad (2.4)$$

Учитывая равенства (2.3), получаем условие равновесия моста:

$$\frac{R_X}{R_{\Sigma}} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{или} \quad R_X = R_{\Sigma} \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.5)$$

Таким образом, чтобы измерить неизвестное сопротивление, необходимо подобрать такие значения сопротивлений R_1 и R_2 , чтобы стрелка гальванометра установилась на ноль, после чего вычислить сопротивление R_X по формуле (2.5). Из этой формулы видно, что на равновесие моста не влияют значения э.д.с. и внутреннего сопротивления источника. Так как в равновесии ток через гальванометр не течет, от его внутреннего сопротивления результат измерения также не зависит. При этом никак не используется градуировка гальванометра, требуется лишь нулевое деление, которое должно быть расположено в середине шкалы (такие приборы с высокой чувствительностью называются нуль-гальванометрами). Таким образом, в классической мостовой схеме не используются никаких электроизмерительных приборов (G играет роль индикатора равновесия) и не производится никаких электрических измерений. Определение неизвестной величины производится по принципу сравнения с эталоном. Простой мост Уитстона позволяет измерять сопротивления с точностью до десятых долей Ома. Для еще большего увеличения точности необходимо учитывать систематическую ошибку, вносимую сопротивлением соединительных проводов.

2. Порядок выполнения работы

1. Собрать на макете схему согласно рис. 2.2, используя в качестве сопротивлений:

R_1 - магазин сопротивлений, переменный;

R_X - неизвестное сопротивление;

R_{Σ} - образцовое сопротивление 100 Ом;

R_2 - магазин сопротивлений с фиксированным значением.

2. Поставить значение $R_2 = 100 \text{ Ом}$.
3. Изменяя сопротивление R_1 , добиться равновесия моста.
4. По формуле (2.5) вычислить значение неизвестного сопротивления R_X .
5. Изменить 2-3 раза значение сопротивления R_2 и повторить измерения.
6. Заменить неизвестное сопротивление R_X на другое и повторить пункты 2-5.
7. Результаты измерений представить в виде таблицы. Рассчитать ошибку эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Опишите метод измерения сопротивлений с помощью вольтметра и амперметра. При каких условиях в каждой схеме можно определять неизвестное сопротивление при помощи формулы (2.1)?
2. Как определяется неизвестное сопротивление методом замещения?
3. Что представляет собой мост Уитстона?
4. Выведите формулу для вычисления неизвестного сопротивления в мостовом методе.
5. Сформулируйте недостатки моста Уитстона?

Литература

1. *Электрические измерения неэлектрических величин*: учебное пособие / Под ред. Н. Н. Евтихьева. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. *Миронов Э.Г.* Измерение активных сопротивлений: Методические указания к лабораторным работам. Екатеринбург: УПИ, 2009.

Лабораторная работа №3

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: изучение компенсационного метода измерения э.д.с. Ознакомление с устройством и работой промышленных потенциометров. Измерения неизвестных э.д.с., токов, сопротивлений.

Приборы и принадлежности: потенциометр постоянного тока ПП-63, источник неизвестной э.д.с., нормальный элемент, образцовое и неизвестные сопротивления.

1. Краткая теория

1.1. Понятие разности потенциалов и э.д.с.

При перемещении заряда в электрическом поле силы поля совершают работу. Величина, численно равная работе по перемещению единичного положительного заряда $q=1$ из одной точки поля в другую называется разностью потенциалов между этими точками:

$$\Delta\varphi \equiv \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (3.1)$$

Если два тела с потенциалами φ_1 и φ_2 соединить проводником, то заряды с одного тела начнут перемещаться к другому - возникнет электрический ток. Через некоторое время потенциалы тел сравняются и ток прекратится. Для того чтобы в проводнике протекал постоянный ток, необходимо поддерживать между двумя этими телами постоянную разность потенциалов. Это значит, что необходимо каким-то образом отводить электрические заряды с одного тела и перемещать их на другое против сил электрического поля. Такое перемещение может быть осуществлено лишь силами неэлектрической природы. Эти силы получили название сторонних сил $F_{\text{стор}}$. Например, в гальванических элементах разделение зарядов

происходит под действием химических сил, в генераторах - механических, в термоэлементах - под действием тепловой энергии. Величина, численно равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда через всю цепь, называется электродвижущей силой (э.д.с.) \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = \oint \frac{F_{\text{стор}}}{q} dl. \quad (3.2)$$

Величина э.д.с. выражается в тех же единицах, что и разность потенциалов – в Вольтах. Если сторонние силы действуют на всем пути следования электрического тока, э.д.с. называется распределенной (например, э.д.с. индукции и самоиндукции). Если действие сторонних сил распространяется лишь на отдельные участки цепи, то э.д.с. называется сосредоточенной (э.д.с. гальванического элемента). При разомкнутой цепи в этом случае электростатические силы уравниваются сторонними, и разность потенциалов на концах разомкнутой цепи будет численно равна э.д.с.

Величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда по участку электрической цепи, называется падением напряжения, или просто напряжением U_{12} на данном участке цепи:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (3.3)$$

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется однородным. Участок, на котором на носители тока действуют сторонние силы, называется неоднородным. Для однородного участка цепи

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (3.4)$$

1.2. Компенсационный метод измерения э.д.с.

Суть компенсационного метода измерения э.д.с. и напряжений заключается в компенсации измеряемого напряжения эталонным, что показано на рис.3.1. Источник измеряемого напряжения U_x включается встречно регулируемому образцовому источнику $U_{обр}$. Меняя напряжение образцового источника, можно добиться

нулевых показаний индикатора А (чувствительного амперметра или нуль-гальванометра) и при данных условиях произвести измерение $U_X = U_{обр}$.

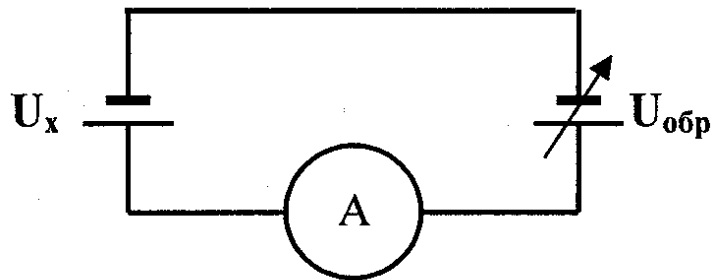


Рис. 3.1. Идеализированная схема компенсационного метода.

К сожалению, регулируемых эталонов напряжения не существует. Поэтому измерение проводится в два этапа, как показано на рис. 3.2, а,б. Схемы состоят из двух контуров, при этом верхний контур, состоящий из источника напряжения U и линейного сопротивления R_0 , является неизменным.

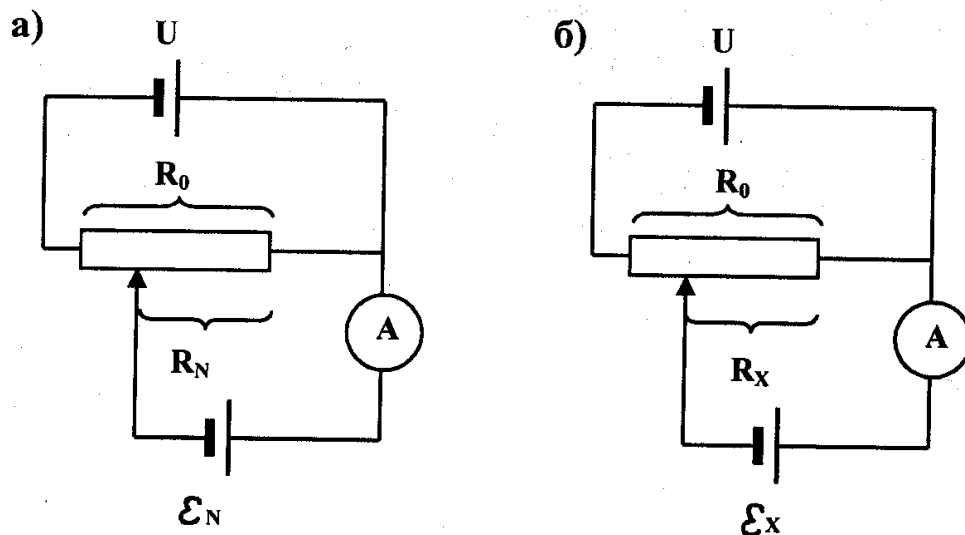


Рис. 3.2. Два шага измерения неизвестной э.д.с. компенсационным методом

На первом этапе в нижний контур помещается эталонный источник э.д.с. (нормальный элемент \mathcal{E}_N). При условии U больше \mathcal{E}_N , перемещая контакт переменного сопротивления, можно найти точку, когда показания измерителя тока будут равны нулю. В этом случае напряжение, снимаемое с делителя, равно напряжению подключенного к нему источника (\mathcal{E}_N). На втором этапе в нижний

контур помещают источник неизвестной э.д.с. (ε_X) и повторяют все действия. Пусть компенсация ε_N и ε_X произошла при сопротивлениях делителя R_N (рис. 3.2,а) и R_X (рис. 3.2,б). Поскольку ток в верхнем контуре остается постоянным (ток в нижнем контуре равен нулю), то справедливы выражения:

$$\frac{U}{R_0} R_N = \varepsilon_N, \quad \frac{U}{R_0} R_X = \varepsilon_X. \quad (3.5)$$

Отсюда величина неизвестной э.д.с. может быть определена как:

$$\varepsilon_X = \varepsilon_N \frac{R_X}{R_N}. \quad (3.6)$$

Данная методика реализована в потенциометрах – приборах, предназначенных для измерения э.д.с. и напряжений компенсационным методом.

1.3. Принцип работы потенциометра ПП-63

Принципиальная схема потенциометра ПП-63 приведена на рис. 3.3. Схема состоит из трех контуров. Контур 1 и контур 3 соответствуют элементам на рис.3.2,б. Настроечный контур 2,

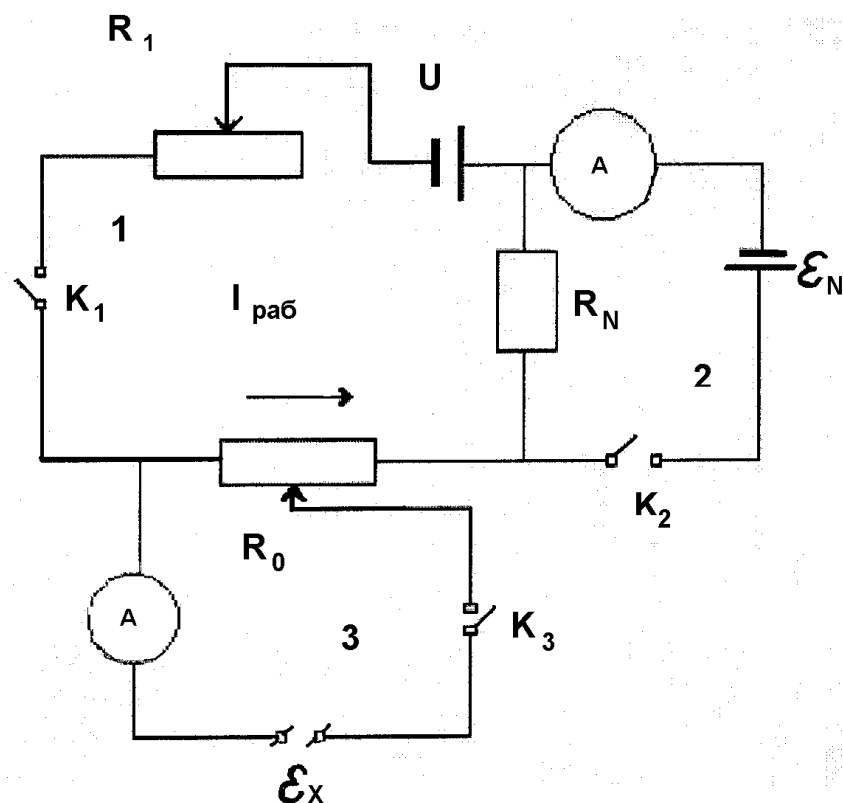


Рис.3.3. Схема потенциометра ПП-63.

содержащий нормальный элемент, предназначен для операции калибровки – установки строго определенного тока (называемого рабочим током) в контуре 1. Студенту предлагается самостоятельно проанализировать работу схемы и объяснить порядок действий при измерении неизвестной величины ε_x .

Компенсационный метод измерения э.д.с. обладает рядом существенных достоинств. Во-первых, сила тока через элементы близка к нулю, поэтому практически нет падения напряжения внутри источника э.д.с., соответственно нет падения напряжения в подводящих проводах. Во-вторых, гальванометр работает как нуль-индикатор и не требует градуировки. В-третьих, имеет место высокая точность измерений, обусловленная использованием эталонных сопротивлений и нормального элемента, э.д.с. которого известна с точностью до четвертого знака после запятой. Следует отметить, что от нормального элемента нельзя брать ток свыше 10^{-5} - 10^{-6} А, поэтому необходимо соблюдать особую осторожность при сборке и включении схемы.

2. Описание потенциометра постоянного тока ПП-63

Переносной потенциометр постоянного тока ПП-63 класса точности 0,05 предназначен для измерения э.д.с. и напряжений компенсационным методом.

На панели прибора смонтированы:

- гальванометр магнитоэлектрической системы с подвижной рамкой, укрепленный на растяжках;
- измерительное сопротивление потенциометрической схемы прибора, выполненное в виде ступенчатого переключателя на 24 положения и реохорда, рукоятки которых выведены на лицевую сторону панели;
- регулировочное сопротивление, выполненное в виде сдвоенного ползункового реостата, имеющего две рукоятки: для грубой и плавной регулировки рабочего тока;
- штепсельный переключатель пределов потенциометра, имеющий три положения: "X0,5" - предел 0-25 мВ, "X1" - предел 0-50 мВ и "X2"-предел 0-100 мВ;
- переключатель схемы потенциометра на два положения: "К"-установка рабочего тока потенциометра и "И"- измерения э.д.с. или напряжения;

- две кнопки: "грубо" и "точно" - для включения гальванометра;
- зажимы "Х" для подключения измеряемых э.д.с. или напряжения;
- зажимы "НЭ" для подключения нормального элемента.

3. Порядок выполнения работы

Для проведения измерений подсоединить нормальный элемент к клеммам "НЭ" потенциометра, соблюдая полярность. Переключатель "НЭ" установить в положение "Н". Переключатели "Г", "БП", "БИ" установить в положение "В".

3.1. Измерение неизвестных напряжений

Измерение напряжений проводить в следующем порядке:

1. Подключить к зажимам "Х" потенциометра источник неизвестной э.д.с., соблюдая полярность.
2. Установить переключатель "РОД РАБОТЫ" в положение "ПОТЕНЦИОМЕТР".
3. Установить переключатель "ПИТАНИЕ" в положение "ВКЛ".
4. Установить переключатель пределов в одно из следующих положений: "Х0,5" при измерении э.д.с. до 25 мВ,

"Х1"	- "	-	до 50 мВ,
"Х2"	- "	-	до 100 мВ.
5. Провести установку рабочего тока потенциометра, для чего:
 - а) установить переключатель в положение "К",
 - б) установить стрелку гальванометра на "0" вращением верхней рукоятки реостата "РАБОЧИЙ ТОК" при нажатой кнопке "ГРУБО", затем вращением нижней рукоятки при нажатой кнопке "ТОЧНО".
6. Провести измерение напряжения, для чего:
 - а) установить переключатель в положение "И",
 - б) установить стрелку гальванометра на "0" вращением рукояток секционного переключателя и реохорда вначале при нажатой кнопке "ГРУБО", а затем "ТОЧНО". Значение измеренного напряжения в милливольтках будет равно сумме показаний шкал, умноженной на значение множителя, установленного при помощи штепселя.

7. Провести измерения несколько раз при разных положениях переключателя пределов. Определить ошибку измерений.

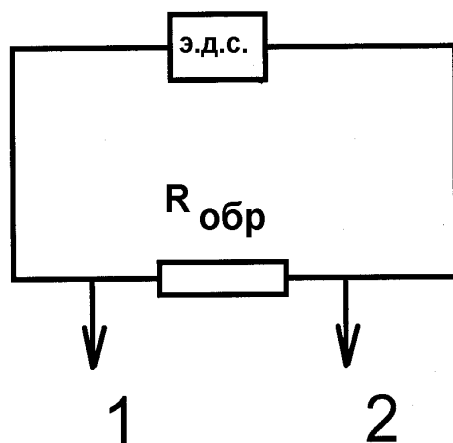
3.2. Измерение силы тока

Потенциометры могут измерять только напряжения. Поэтому измерение силы тока основано на измерении падения напряжения на эталонном резисторе и применении закона Ома для участка цепи.

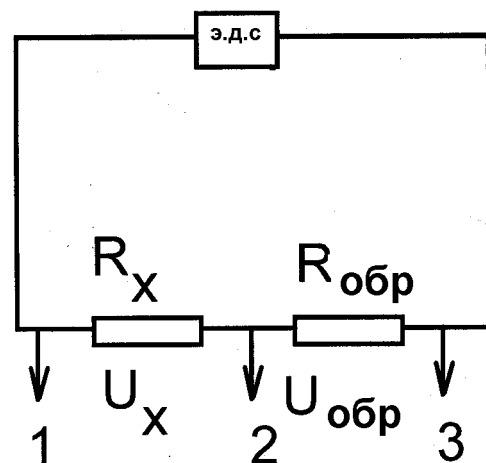
1. Собрать цепь (рис. 3.4,а), где $R_{обр}$ - известное образцовое сопротивление, равное 470 Ом.
2. Контакты 1-2 соединить с клеммами "X" потенциометра с соблюдением полярности.
3. Провести измерения падения напряжения на образцовом сопротивлении $U_{обр}$ в соответствии с п.6 "Измерение напряжений".

4. Вычислить величину тока
$$I = \frac{U_{обр}}{R_{обр}}.$$

5. Провести измерения несколько раз при разных положениях переключателя пределов. Вычислить ошибку измерений.



а



б

Рис. 3.4. Схема для измерения неизвестного тока (а) и неизвестного сопротивления (б).

3.3. Измерение сопротивлений

Для измерения сопротивления в данной работе используется метод вольтметра и образцовой меры, упоминавшийся в описании Лабораторной работы №2. Основой этого метода является формирование электрической цепи, когда неизвестное и образцовое сопротивления соединяются последовательно и измеряются падения напряжения на них.

1. Собрать цепь (рис. 3.4,б), где $R_{обр}$ - известное сопротивление, R_x - неизвестное сопротивление.
2. Контакты 1-2 подключить к клеммам "X". Измерить падение напряжения на R_x в соответствии с п. 6 "измерение напряжений".
3. Контакты 2-3 подключить к клеммам "X", измерить падение напряжений на $R_{обр}$.
4. Так как ток через $R_{обр}$ и R_x идет один и тот же, то величина R_x

определяется по формуле
$$R_x = \frac{U_x R_{обр}}{U_{обр}}.$$

5. Провести измерения при разных положениях переключателя пределов. Вычислить ошибку измерений.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается метод компенсационных измерений?
2. Назовите достоинства компенсационного метода.
3. Что представляет собой нормальный элемент?
4. Объясните схему принцип действия потенциометра ПП-63.

Литература

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики, М.: Высшая школа, 1989.
2. Багинский А.В., Брагин О.А. Компенсационные методы измерений. Методическое пособие к лабораторным работам. Новосибирск: изд-во НГУ, 2006.

Лабораторная работа №4

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

***Цель работы:** изучение физических процессов в контактах разнородных металлов, градуировка термопар в температурном интервале 300-380К.*

***Приборы и принадлежности:** лабораторный макет, температурная ячейка, понижающий трансформатор, вольтметр переменного тока тип 434321, цифровой милливольтметр, термометр, термопары.*

1. Краткая теория

В 1797 году Вольтой (A.Volta) было обнаружено, что при соприкосновении двух различных металлов между ними возникает разность потенциалов, получившая название *контактной разности потенциалов*. Вольта установил, что если несколько металлов привести в контакт друг с другом, то разность потенциалов между крайними металлами не будет зависеть от того, какими промежуточными металлами они разделены. Это положение получило название *закона последовательных контактов Вольты*. Рассмотрим физические процессы, происходящие на границе двух контактирующих металлов.

1.1. Контактная разность потенциалов

Приведем в тесный контакт два металла, как это показано на рис. 4.1. Каждый металл характеризуется своей концентрацией свободных электронов n и работой выхода A . При соприкосновении начнется переход электронов из одного металла в другой и обратно, однако преобладающее направление будет определяться величиной работы выхода и концентрацией носителей по обе стороны границы. Пусть для определенности $A_1 < A_2$, $n_1 > n_2$. Тогда преимущественным движением будет переход электронов из металла 1 в металл 2, приграничный слой металла 2 будет заряжаться отрицательно, металла 1 – положительно. В месте контакта возникает тонкий двойной электрический слой толщиной $\sim 10^{-8}$ см. Такое

разделение зарядов эквивалентно появлению внутреннего источника э.д.с. с разностью потенциалов ε_{12} . Точные расчеты показывают, что контактная разность потенциалов может быть вычислена по формуле:

$$\varepsilon_{12} = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (4.1)$$

где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура. Из ф. (4.1) следует, что величину ε_{12} определяют различия в работах выхода электронов для двух металлов и различия в концентрациях электронов n_1 и n_2 . Важно отметить, что контактная разность потенциалов является температурозависимой величиной, при повышении температуры ε_{12} увеличивается.

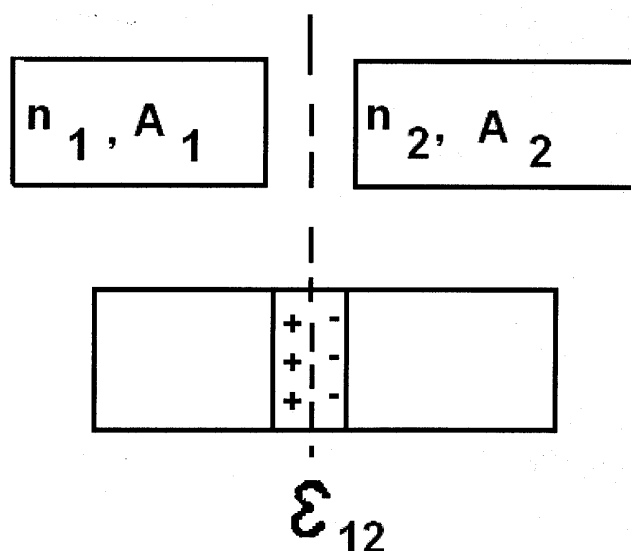


Рис. 4.1. Возникновение контактной разности потенциалов

Если рассмотреть цепь, состоящую из нескольких металлов, то суммируя контактные разности потенциалов для каждого контакта ф. (4.1), легко показать, что за счет сокращений результирующая контактная разность определяется только крайними металлами цепи, что соответствует закону последовательных контактов Вольты.

1.2. Физические принципы работы дифференциальной термопары

Дифференциальные термопары широко используются в современном физическом эксперименте, в лабораторных условиях и промышленности как точные измерители температуры и низковольтные источники тока. Они представляют замкнутую цепь

из двух разнородных металлов (рис.4.2), в которой выполнен разрыв для проведения измерений э.д.с. Места соединения металлов называются спаями, которые обычно выполняются методами высокотемпературной сварки. Если температуры спаев одинаковы, то э.д.с. термопары равна нулю, если температуры спаев различны, то э.д.с. термопары отлична от нуля. Действие термопары основано на эффекте Зеебека (T.Seebeck) – возникновении электродвижущей силы в цепи, состоящей из разнородных проводников, контакты между которыми имеют различную температуру.

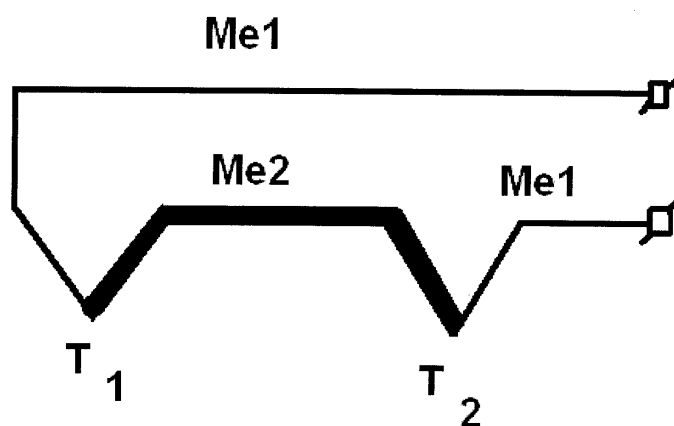


Рис.4.2. Дифференциальная термопара

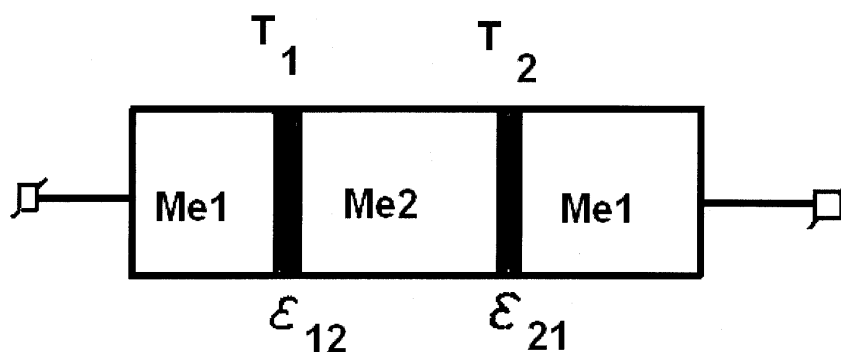


Рис.4.3. Эквивалентная электрическая схема. Широкими темными полосами показан двойной электрический слой

Рассмотрим физические основы работы дифференциальной термопары. Эквивалентная схема этого устройства показана на рис. 4.3. В ней существуют два источника э.д.с. ε_{12} и ε_{21} , направленных навстречу друг другу. При равенстве температур спаев величины ε_{12} и ε_{21} одинаковы, результирующая э.д.с. на концах термопары является нулевой. Если мы поднимем температуру левого спая, то

величина ε_{12} увеличится, величина ε_{21} останется прежней и на концах термопары появится э.д.с., равная разности ε_{12} и ε_{21} .

Подсчитаем результирующую электродвижущую силу ε :

$$\varepsilon = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} - \frac{A_2 - A_1}{e} - \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_1 - T_2), \quad (4.2)$$

или

$$\varepsilon = \alpha (T_1 - T_2). \quad (4.3)$$

Коэффициент α для двух данных металлов называется постоянной термопары или удельной термо-э.д.с. Он равен термоэлектродвижущей силе, возникающей в цепи при разности температур спаев в один градус Кельвина:

$$\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}. \quad (4.4)$$

Для металлов величина α составляет несколько десятков мкВ/град.

Важно отметить, что в общем случае термо-э.д.с. в контуре дифференциальной термопары складывается из трех составляющих. Первая составляющая обусловлена температурной зависимостью контактной разности потенциалов, вторая — диффузией носителей заряда от горячих спаев к холодным, третья — увлечением электронов квантами тепловой энергии — фононами, поток которых также распространяется к холодному концу. Однако в силу малости второго и третьего факторов их влияние не рассматривается.

Точное измерение температуры при помощи дифференциальной термопары основано на зависимости величины э.д.с. от разницы температур спаев. Если один из спаев поместить в объем, находящийся при определенной фиксированной температуре (например, смесь воды и льда, 0°C), а второй — в объем, температуру которого надо определить, то по величине измеренной э.д.с. на основании предварительной градуировки термопары можно определить неизвестную температуру. Точность определения температуры составляет десятые доли градуса. Дополнительными достоинствами этого метода измерения температуры являются широкий интервал температур, малая инерционность, обусловленная малым объемом спая, возможность применения в автоматизированных системах контроля производственных процессов. В качестве примера можно привести

термопары медь – константан, которые широко применяются для измерения температуры в интервале от 70 до 570 К.

Если постоянно поддерживать разность температур между спаями, то эту систему можно использовать в качестве источников постоянного напряжения. Особенностью таких источников являются малые напряжения и небольшие мощности. Величину напряжения можно увеличить, собирая термопары последовательно, для увеличения мощности применяют батареи с параллельным соединением термопар.

2. Порядок выполнения работы

1. Соберите установку по схеме, показанной на рис. 4.4.

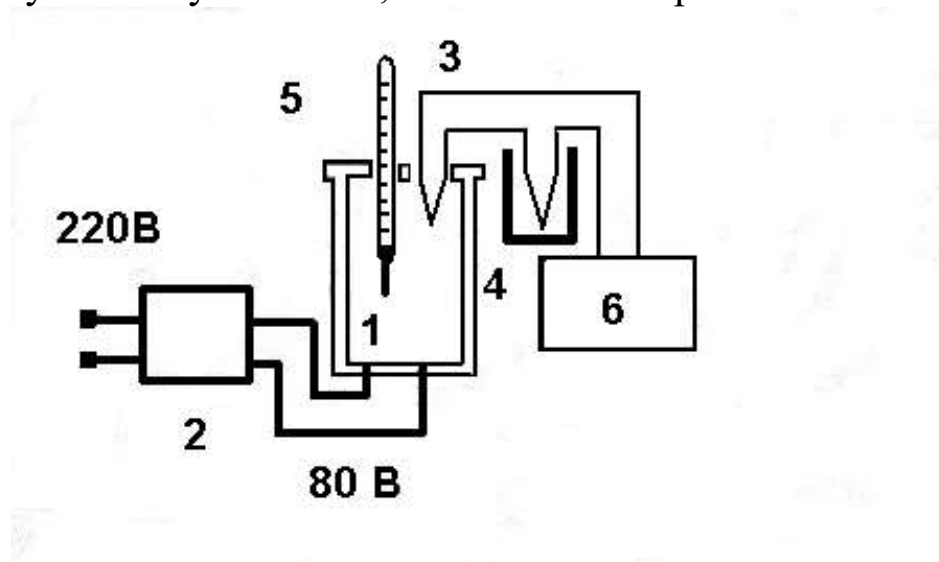


Рис.4.4. Схема экспериментальной установки

Один спай термопары 3 поместить в тепловую ячейку 1. Вторым спаем поместить в стакан 4, имеющий комнатную температуру. Питание тепловой ячейки осуществляется от понижающего трансформатора 2 с напряжением на выходе 80В. Температура в объеме ячейки контролируется термометром 5. Э.Д.С. на концах термопары определяется цифровым милливольтметром 6.

2. Перед началом измерений прогреть цифровой вольтметр в течение 20 минут, провести установку нуля.

3. Измерить э.д.с. термопары в исходном состоянии.

4. Подать напряжение 80В на тепловую ячейку. В интервале температур от комнатной до 80°C шагом в 2 градуса измерить величину термо-э.д.с. для термопары хромель-копель. Результаты занести в таблицу.

6. При включенной теплой ячейке установить термопару константан-хромель. Провести стабилизацию температуры 5-7

минут. Выключить питание ячейки и в режиме остывания выполнить измерения термо-э.д.с. в интервале от 80°C до комнатной температуры шагом 2 градуса. Результаты записать в таблицу.

7. Для каждой термопары построить график зависимости термо-э.д.с. от температуры горячего спая. Определить величину удельной термо-э.д.с.

8. Провести обсуждение полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Объясните появление контактной разности потенциалов при контакте двух металлов.
2. Что такое дифференциальная термопара?
3. Поясните физические процессы при работе дифференциальной термопары.
4. Что такое удельная термо-э.д.с. и в каких единицах она измеряется?
5. Каково практическое применение термопар?

Литература

1. *Калашников С.Г.* Электричество. М: Наука, 1985.
2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Том 3. Электричество. М: Физматлит, 2004.
3. *Олейник Б.Н., Лаздина С.И., Лаздин В.П.* Приборы и методы температурных измерений. М.: Изд-во стандартов, 1987.
4. *Гордов А.Н., Малков Я.В., Эргардт Н.Н., Ярышев Н.А.* Точность контактных методов измерения температуры. М.: Изд-во стандартов, 1976.

Лабораторная работа №5

ПРОВЕРКА ПРАВИЛ КИРХГОФА ДЛЯ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальная проверка правил Кирхгофа и расчет электрических цепей на их основе.

Приборы и принадлежности: лабораторный макет, источник постоянного напряжения, соединительные провода.

1. Краткая теория

Разветвленные электрические цепи являются основой многих современных приборов и устройств. Понимание фундаментальных процессов протекания токов в таких цепях, умение производить расчеты параметров схем составляют важную задачу для студента. Разветвленные электрические цепи постоянного тока содержат, как правило, комбинации сопротивлений и источников электродвижущей силы (э.д.с.). Обычно величины сопротивлений и э.д.с., входящих в различные соединения проводников, известны. Поэтому задача расчета электрической цепи заключается в определении токов, текущих через сопротивления, и падений напряжения на соответствующих сопротивлениях, входящих в схему.

Существует несколько подходов для расчетов электрических цепей. Для участка цепи, содержащего проводник с сопротивлением R , применяют закон Ома, согласно которому сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения U на этом проводнике и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (5.1)$$

Для замкнутой цепи, состоящей из внешнего сопротивления R , источника э.д.с. с напряжением ε и внутренним сопротивлением r , закон Ома примет вид:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (5.2)$$

Сложные разветвленные цепи можно попытаться свести к параллельному и последовательному соединению проводников. Если это удалось, то схема заметно упрощается и расчеты параметров возможны с применением законов Ома.

Если цепи не сводятся к параллельному и последовательному соединению проводников, то для расчета таких разветвленных цепей следует пользоваться правилами, сформулированными Кирхгофом (G.Kirchhoff). Этих правил два. Первое из них относится к узлам цепи. Узлом называется точка, в которой сходятся более двух проводников. Ток, текущий к узлу, считается положительным, текущий от узла - отрицательным. **Первое правило** гласит, что алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (5.3)$$

Это правило вытекает из закона сохранения электрического заряда, и нарушение его привело бы к накоплению заряда в узле цепи.

Второе правило относится к любому выделенному в разветвленной цепи замкнутому контуру: алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивление в ветвях замкнутого контура равна алгебраической сумме э.д.с., встречающихся в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i. \quad (5.4)$$

Это правило является следствием потенциальности электрического поля и закона сохранения энергии. Внутренние сопротивления источников э.д.с. учитываются в левой части формулы (5.4). Знаки токов и э.д.с. в уравнении (5.4) следует определять в соответствии с выбранным направлением обхода контура. Если токи по направлению совпадают с выбранным направлением обхода, то они берутся положительными. Если при обходе контура встречается источник э.д.с., который «выдает» во внешнюю цепь ток, совпадающий с направлением обхода, то знак выбирается положительным.

Необходимо отметить, что если для какого-либо участка цепи направление тока заранее неизвестно, то его указывают

произвольно. Если при дальнейшем расчете значение данного тока получается со знаком минус, то направление тока на данном участке цепи противоположно направлению, выбранному в начале расчета.

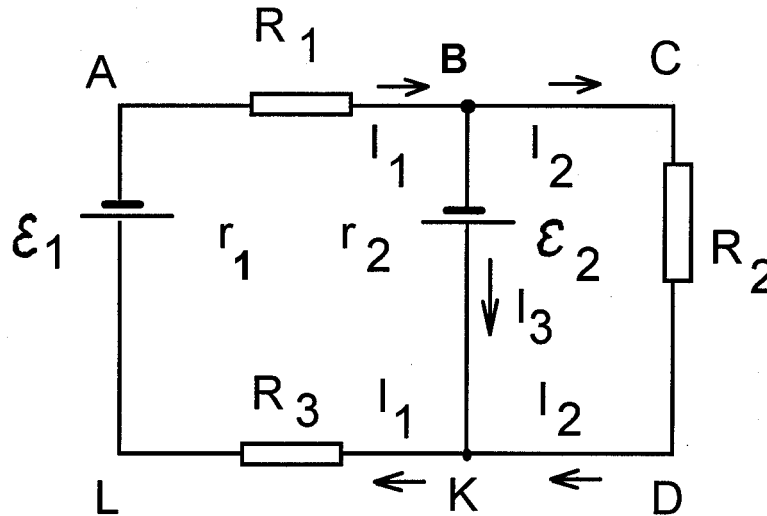


Рис.5.1. Пример разветвленной цепи

Рассмотрим в качестве примера цепь, изображенную на рис. 5.1. Обозначим токи, текущие в отдельных ветвях цепи через I_1 , I_2 , I_3 , приписав им соответствующие направления. Согласно первому правилу, для узла В получим:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (5.5)$$

Аналогичное уравнение (с поправкой на знаки) получается для точки К, так как ток I_2 , протекает по участку ВС и по участку DK, а ток I_1 - по участку АВ и по участку KL. В общем случае, число независимых уравнений, составленных по первому правилу Кирхгофа, всегда на единицу меньше числа узлов. Для данной схемы мы имеем два узла - В и К и, следовательно, одно уравнение.

Уравнения, соответствующие второму правилу Кирхгофа, можно составить для трех контуров: ABKL, ACDL и BCDK, однако независимыми будут только два, т.е., как и в этом случае, число независимых уравнений на единицу меньше числа контуров. Направление обхода выберем по часовой стрелке. Для контура ABKL получим:

$$I_1 R_1 + I_3 r_2 + I_1 R_3 + I_1 r_1 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 . \quad (5.6)$$

Для контура ACDL:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_1 R_3 + I_1 r_1 = -\varepsilon_1 . \quad (5.7)$$

Для контура BCDK уравнение будет являться следствием двух предыдущих. Решая уравнения (5.5) - (5.7), можно определить токи в различных участках цепи.

2. Описание экспериментальной установки

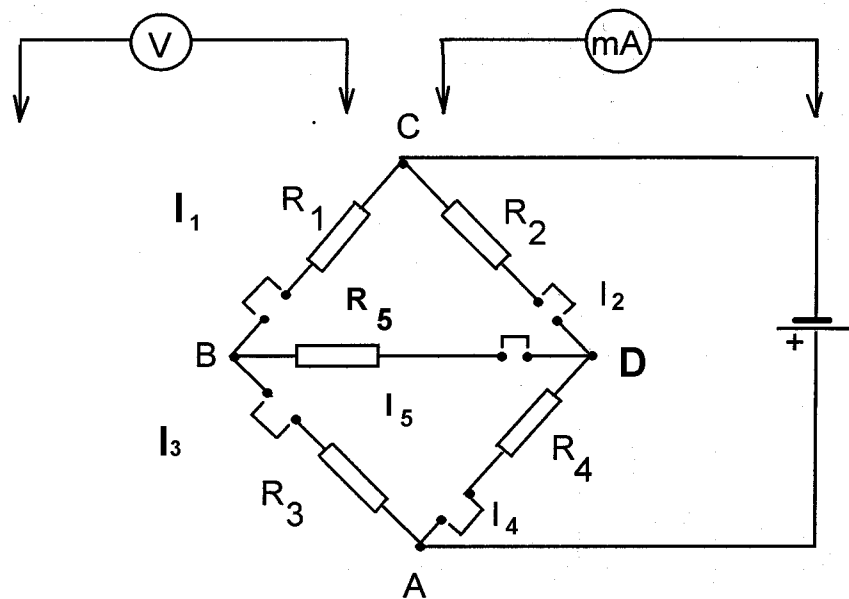


Рис.5.2. Схема экспериментальной установки

Схема установки для выполнения работы изображена на рис. 5.2 . Она состоит из макета, источника питания, вольтметра и амперметра. Номиналы резисторов R_1 - R_5 определяются по маркировке на каждом резисторе. Буква R в номинале обозначает основную единицу измерения - Ом, другие буквы - это сокращенные обозначения десятичных приставок: к - кило, м - мега, г - гига. Если число стоит перед буквой, то оно обозначает целое число единиц указанного буквой разряда, если число стоит после буквы, то оно обозначает дробные доли указанного разряда. Например: 24к - 24 кОм, м12 - 0,12 МОм, 1к6 - 1,6 кОм.

3. Порядок выполнения работы

1. Нарисовать схему макета с указанием номиналов резисторов, входящих в схему.
2. Подключить общее напряжение на схему $U_6 = 10 \text{ В}$.
3. При помощи вольтметра, измерить падение напряжения на всех резисторах схемы. Результаты измерений занести в таблицу:

	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
измеренные значения												
расчетные значения												

4. Измерить токи во всех ветвях цепи. Для этого нужно вынуть соответствующую перемычку и вставить вместо нее контакты миллиамперметра.
5. На основании уравнений Кирхгофа по известным сопротивлениям рассчитать токи и падения напряжений.
6. Сравнить расчетные данные с экспериментально измеренными.
7. Оцените экспериментальные ошибки. Объяснить возможные причины расхождений.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте и поясните закон Ома для полной цепи.
2. Сформулируйте правила Кирхгофа. К каким цепям они применяются?
3. Будут ли справедливы правила Кирхгофа для цепи, включающей в себя полупроводниковые диоды?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2, М.: Наука, 1987.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 8-е изд. М.: Высшая школа, 1984.

Лабораторная работа №6

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: экспериментальное исследование электростатического поля в области между заряженными электродами различной конфигурации и описание его при помощи эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

Приборы и принадлежности: стенд ЮУрГУ, соединительные провода.

1. Краткая теория

1.1. Электростатическое поле. Напряженность поля

Электростатическое поле представляет собой частный случай электромагнитного поля и создается неподвижными электрическими зарядами. Электростатическое поле в каждой точке характеризуется значениями *напряженности* E и *потенциала* φ , которые являются силовой и энергетической характеристиками поля в данной точке.

Действие электростатического поля проявляется в том, что помещенный в какую-либо точку пространства пробный заряд q оказывается под действием некоторой силы F со стороны поля. За напряженность поля E принимается векторная величина, по определению равная:

$$E = F/q , \quad (6.1)$$

и характеризующая электрическое поле в данной точке. Согласно формуле (1) напряженность электрического поля численно равна отношению силы, действующей на помещенный в данную точку поля точечный заряд, к величине этого заряда, а направление вектора E совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

Напряженность поля, созданного точечным зарядом q в вакууме, как следует из закона Кулона, в системе "СИ" определяется формулой:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}, \quad (6.2)$$

где ϵ_0 - электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, r - расстояние от заряда до данной точки, $\mathbf{r}/|\mathbf{r}|$ - единичный вектор, направленный от заряда к данной точке.

Для электрического поля справедлив принцип суперпозиции:

$$\mathbf{E} = \sum \mathbf{E}_i, \quad (6.3)$$

где \mathbf{E} - напряженность поля системы зарядов, \mathbf{E}_i - напряженность поля, создаваемого отдельным зарядом.

Таким образом, электрическое поле можно описать, указав для каждой точки пространства величину и направление вектора напряженности \mathbf{E} . Совокупность этих векторов образует некоторое векторное поле. Силовые линии или линии вектора напряженности проводят так, что касательные к ним в каждой точке совпадают с направлением вектора \mathbf{E} в этой точке, а количество линий, пронизывающих единицу поверхности перпендикулярной направлению вектора \mathbf{E} численно равно значению E .

1.2. Потенциал

Поскольку силы, действующие между зарядами, являются центральными, а поле центральных сил консервативно (работа по перемещению заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы пути), можно наряду с напряженностью поля \mathbf{E} ввести для описания поля величину φ , называемую потенциалом. Потенциал φ данной точки поля есть скалярная физическая величина, численно равная работе, которую совершает поле при перемещении единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечно удаленную, потенциал которой принимают за нуль:

$$\varphi \equiv \varphi - \varphi_\infty = \frac{A}{q}. \quad (6.4)$$

Работа по перемещению заряда q из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 будет равна $q(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Связь напряженности электрического поля и потенциала определяется выражением:

$$\mathbf{E} = - \text{grad } \varphi. \quad (6.5)$$

Знак минус в формуле показывает, что вектор напряженности поля направлен в сторону, противоположную вектору градиента потенциала

При графическом изображении электрического поля наряду с силовыми линиями поля используются эквипотенциальные поверхности, которые получаются, если соединить все точки, обладающие одним и тем же потенциалом. Силовые линии ортогональны (перпендикулярны) эквипотенциальным поверхностям. В случае равномерно заряженной сферы, эквипотенциальные поверхности будут сферами, а силовые линии направлены по радиусам этих сфер. Электрическое поле, созданное между положительным зарядом и проводящей поверхностью показано на рис. 6.1. Примеры изображения других электростатических полей при различной конфигурации электродов можно найти в учебниках.

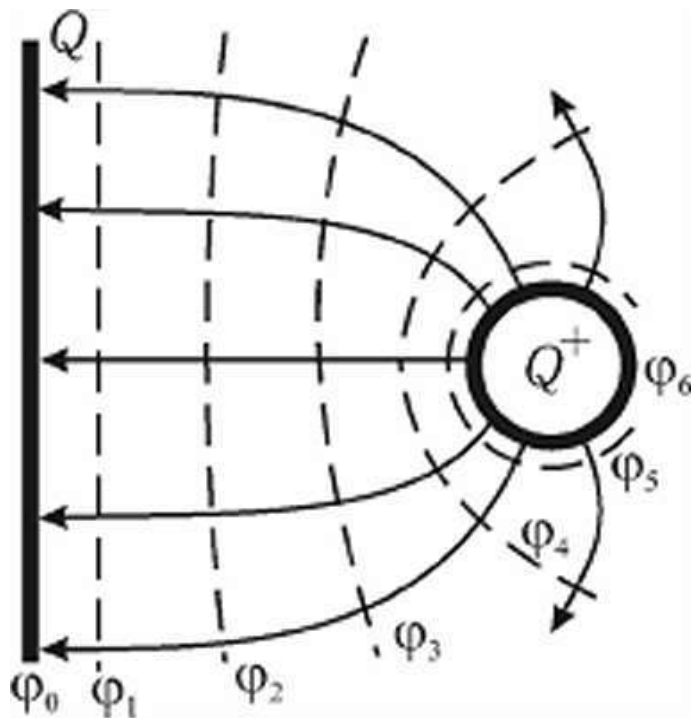


Рис. 6.1. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности для электростатического поля между положительным зарядом и проводящей поверхностью.

Исходя из свойств взаимной ортогональности силовых линий и эквипотенциальных поверхностей, можно по силовым линиям поля найти поверхности равного потенциала, и, наоборот, по положению эквипотенциальных поверхностей можно построить

силовые линии поля. Если перемещать заряд вдоль любого направления по эквипотенциальной поверхности, то работа будет равна нулю.

2. Метод исследования поля

При конструировании многих электронных приборов требуется изучение электростатического поля в пространстве, заключенном между электродами. Изучить поле - это значит определить в каждой его точке значения E и φ . Теоретический расчет E и φ возможен лишь в случае полей, создаваемых электродами простой конфигурации. Сложные электростатические поля исследуют экспериментально.

Для изучения полей используют экспериментальные методы их моделирования. Один из них основан на применении слабопроводящей пластины с электродами. Электростатическое поле заменяют электрическим полем, в котором на электроды подают такие же потенциалы, как и в моделируемом поле. Несмотря на движение заряженных частиц, плотность зарядов на электродах постоянна, так как на место зарядов, уходящих по слабопроводящей пластинке, непрерывно поступают новые. Поэтому заряды электродов создают в пространстве такое же электрическое поле, как и неподвижные заряды той же плотности, а *электроды являются эквипотенциальными поверхностями*. Использование пластины позволяет применять токоизмерительные приборы, более простые и надежные в работе, чем электростатические.

При исследовании поля снимаем карту распределения потенциала, используя для измерения метод зонда. Электрический зонд представляет собой остроконечный проводник, который помещают в ту точку, где нужно измерить потенциал. В проводящей среде потенциал зонда равен потенциалу исследуемой точки поля.

Полученная картина эквипотенциальных поверхностей исследуемого поля позволяет провести силовые линии (ортогонально поверхностям) и вычислить значение модуля напряженности E в любой точке. Вычисления усредненного значения напряженности на участке длины Δl выполняются по формуле (6.6):

$$E \approx \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta n} \right| = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta n}, \quad (6.6)$$

где φ_1 и φ_2 - потенциалы соседних эквипотенциальных поверхностей, Δn - кратчайшее расстояние между ними (по нормали).

3. Порядок выполнения работ

1. Соберите электрическую схему, показанную на рис. 6.2, подключив входы блока моделирования полей согласно рис. 6.3.

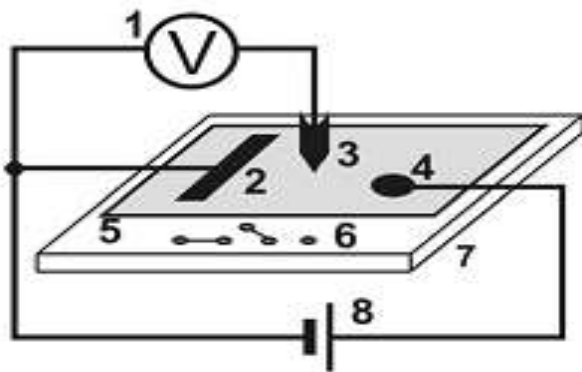


Рис. 6.2. Электрическая схема. 1 – стрелочный вольтметр; 2, 4 – электроды; 3 – зонд; 5 – пластина; 6 – входы для подключения блока моделирования полей (рис. 4); 7 – блок моделирования полей; 8 – источник постоянного напряжения «0...+15 В»

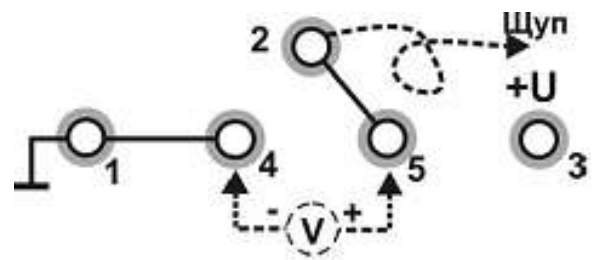


Рис. 6.3. Входы для подключения блока моделирования полей: 1, 3 — входы для подключения источника постоянного напряжения «0...+15 В»; 2 – вход для подключения зонда; 4, 5 – входы для подключения стрелочного вольтметра

2. Включите кнопкой «Сеть» питание блока генераторов напряжения. Нажмите кнопку «Исходная установка».
3. Касаясь электродов зондом, определите, какой электрод имеет нулевой потенциал φ_0 .
4. Кнопками установки напряжения «0...+15 В» установите потенциал другого электрода $\varphi=15\text{В}$, контролируя его вольтметром.
5. Помещая зонд в центр каждой клетки на пластине, снимите карту распределения потенциалов. Результаты запишите в виде таблицы.

6. Изобразите на листе распределение потенциалов. Различные значения потенциалов закрасьте разными цветами.
7. Постройте семейство эквипотенциальных линий, проведя их через центральные области закрашенных участков.
8. Постройте семейство силовых линий, стрелками укажите направления.
9. В выводах по работе сделайте анализ исследуемого поля и выясните, где располагается область более сильного поля.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения напряженности поля, потенциала.
2. Запишите уравнение, связывающее величины E и φ .
3. Дайте определения силовых линий и эквипотенциальной поверхности. Каковы их свойства?
4. Как проводят эквипотенциальные и силовые линии на картине исследуемого поля?
5. Как определяют направление силовых линий, используя свойства вектора градиента потенциала?
6. Каким образом в работе находят напряженность в точках исследуемого поля?

Литература

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики, М.: Высшая школа, 1989.
2. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1977.

Лабораторная работа №7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ЕМКОСТЬ

Цель работы: изучить закон изменения напряжения при разряде конденсатора, определить постоянную времени RC -цепи и ее сопротивление R .

Приборы и принадлежности: стенд ЮУрГУ, регулируемый источник постоянного напряжения, секундомер, мультиметр, миниблоки «Ключ» и «Конденсатор».

1. Краткая теория

RC -цепи, состоящие из сопротивления R и конденсатора C , являются одним из важнейших объектов современной схемотехники. Они используются в качестве интегрирующих и дифференцирующих элементов (фильтров низких и высоких частот), формирователей импульсов и т.д. В рамках данной работы для RC -цепи мы изучим процессы разрядки конденсатора и установим основные физические закономерности этого процесса.

1.1. Понятие квазистационарного тока

При включении ключа K на схеме, показанной на рис.7.1, произойдет зарядка конденсатора C . Напряжение на конденсаторе увеличится до значения, равного ε .

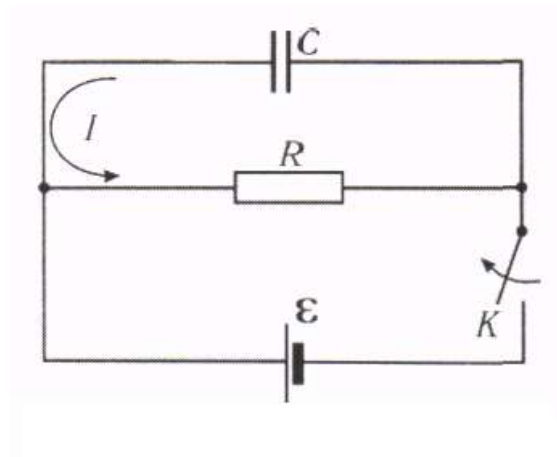


Рис. 7.1. Процессы разрядки конденсатора

При размыкании ключа K начнется разрядка конденсатора, в цепи потечет изменяющийся электрический ток. Если этот ток I изменяется не слишком быстро и так, что в каждый момент времени величина I одинакова во всех точках контура, то для мгновенных значений I справедливы законы постоянного тока. Такие медленно изменяющиеся токи называют *квазистационарными*.

Ток в контуре длины L будет квазистационарным, если он устанавливается практически мгновенно, т.е. если время его установления, равное L/c ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость распространения электромагнитного поля), много меньше, чем τ - характерное для данной цепи время изменения тока. В случае изменения тока по экспоненциальному закону величина τ называется постоянной времени цепи - время, за которое ток изменяется в $e = 2,71$ раза, а в случае электрических колебаний условие квазистационарности токов есть $L/c \ll T$, где T - период колебаний.

1.2. Процессы разрядки конденсатора

Выведем для RC-цепи формулу для напряжения на конденсаторе в процессе его разрядки. Величина протекающего тока:

$$I = -\frac{dQ}{dt}, \quad (7.1)$$

где Q - заряд конденсатора, пропорциональный напряжению U на его обкладках:

$$Q = CU. \quad (7.2)$$

Согласно закону Ома квазистационарный ток может быть записан:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (7.3)$$

Используя соотношения (7.1)-(7.3), составляем дифференциальное уравнение, описывающее изменение напряжения конденсатора с течением времени t :

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U}{RC}.$$

Разделяя в этом уравнении переменные и решая его интегрированием от начального момента $t=0$ (напряжение U_0) до текущего t (напряжение U)

$$\int_{U_0}^U \frac{dU}{U} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt,$$

получаем зависимость напряжения конденсатора от времени (рис. 7.2):

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \text{ или } U = U_0 e^{-t/\tau}, \quad (7.4)$$

где τ - постоянная времени цепи, содержащей емкость и сопротивление,

$$\tau = RC. \quad (7.5)$$

Линеаризуем зависимость (4) путем логарифмирования:

$$\ln U = \ln U_0 - \frac{1}{\tau} t. \quad (7.6)$$

График этой линейной зависимости представлен на рис. 7.2.

Таким образом, исследуя зависимость напряжения на конденсаторе от времени, можно экспериментально определить:

- постоянную времени RC -цепи,
- сопротивление цепи R , если известна емкость C ,
- емкость конденсатора, если известно сопротивление R .

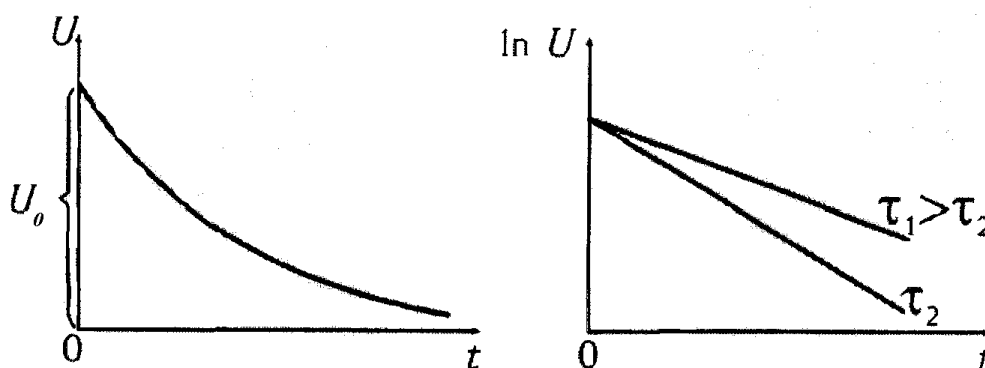


Рис.7.2. Зависимость напряжения на конденсаторе и его натурального логарифма от времени

В данной работе проводится измерение постоянной времени RC -цепи и определение сопротивления R , в качестве которого выступает вольтметр.

2. Описание экспериментальной установки

Электрическая схема установки показана на рис. 7.3, монтажная схема - на рис. 7.4.

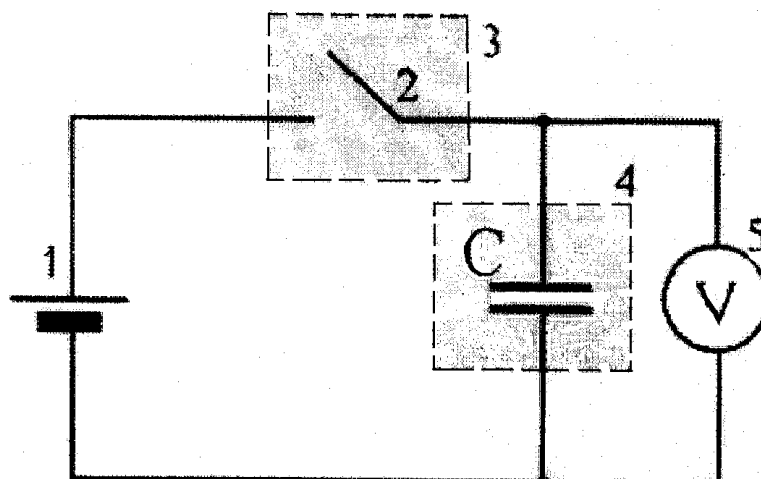


Рис. 7.3. Электрическая схема

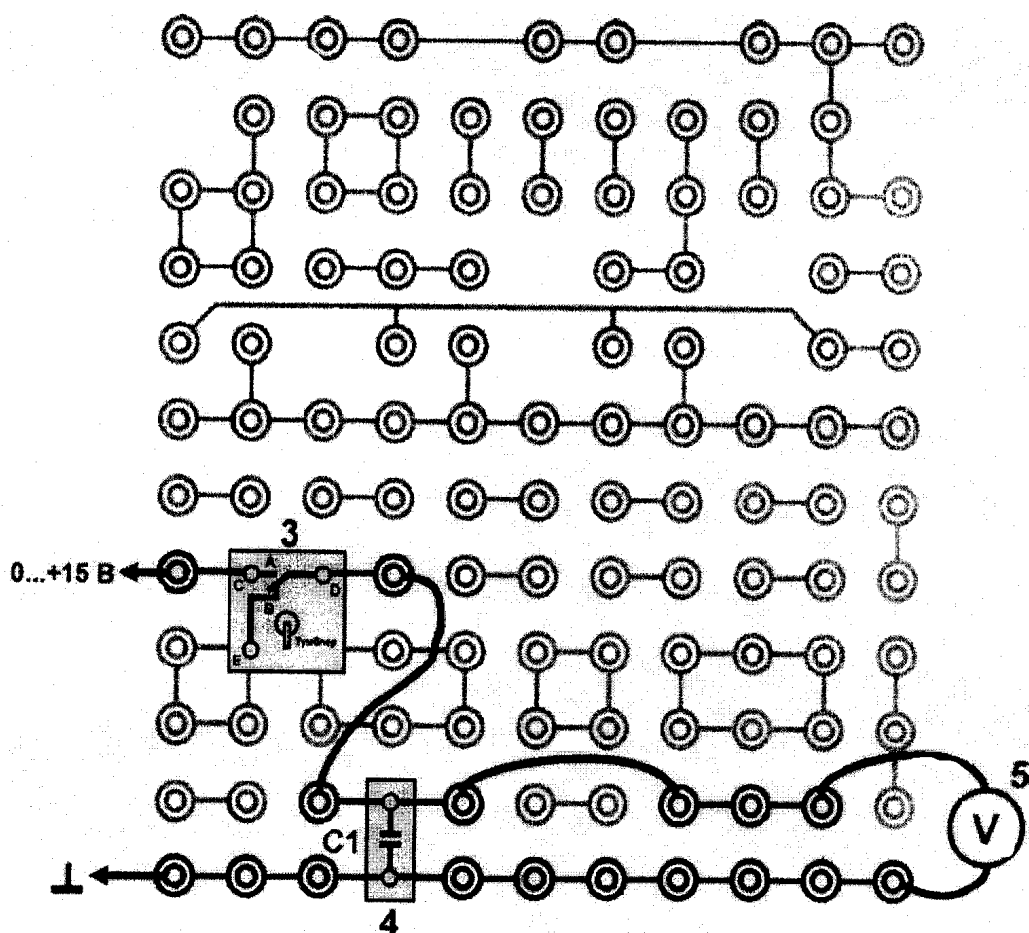


Рис. 7.4. Монтажная схема

- 1 - регулируемый источник постоянного напряжения (0... +15 В);
- 2 - ключ;
- 3 - миниблок «Ключ»;
- 4 - миниблок «Конденсатор»;
- 5 - мультиметр (*режим V 20 В, входы COM, VΩ*)

Конденсатор C заряжается до напряжения U_0 от источника постоянного напряжения 1. Затем ключ 2 размыкают, и конденсатор начинает разряжаться через подключенный к нему вольтметр 5, имеющий большое входное сопротивление R . По вольтметру 5 можно следить за текущим значением напряжения на конденсаторе, которое изменяется по установленному выше закону (7.4).

3. Выполнение работы

1. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 7.4. Емкость конденсатора 1 мкФ.
2. Включите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров. Нажмите кнопку «Исходная установка».
3. Кнопками установки напряжения «0... 15 В» установите на конденсаторе напряжение от 10 до 15 В (по заданию преподавателя).
4. Отключите конденсатор от регулируемого источника постоянного напряжения, переведя ключ в положение «В», и по мере разряда конденсатора через каждые 5 секунд записывайте показания вольтметра в таблицу.
5. Подсоедините параллельно к конденсатору $C_1=1$ мкФ второй конденсатор $C_2=0,1$ мкФ и повторите аналогичные измерения для параллельно соединенных конденсаторов $C_{\text{парал}}$.
6. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров.

4. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте и запишите в таблицу емкость конденсатора $C_{\text{парал}}$ по формуле для параллельного соединения:

$$C_{\text{парал}} = C_1 + C_2 = \dots \text{мкФ}$$

2. На одном поле чертежа постройте графики зависимостей

$U_1 = f(t)$ и $\ln U_1 = f(t)$ для конденсатора C , а на другом $U_{\text{парал}} = f(t)$ и $\ln U_{\text{парал}} = f(t)$ для конденсатора $C_{\text{парал}}$, располагая ось напряжения U с левой стороны, а ось $\ln U$ - с правой.

3. Определите по графикам $\ln U_1 = f(t)$ и $\ln U_{\text{парал}} = f(t)$ угловые коэффициенты K_1 и K_2 линейных зависимостей и по ним рассчитайте постоянные времени τ_1 и $\tau_{\text{парал}}$ для каждого значения C_1 и $C_{\text{парал}}$.

$t, \text{сек}$	$C_1 = \dots \text{ мкФ}$		$C_{\text{парал}} = \dots \text{ мкФ}$	
	$U_1, \text{В}$	$\ln U_1$	$U_{\text{парал}}, \text{В}$	$U_{\text{парал}}, \text{В}$
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

4. Рассчитайте сопротивление вольтметра R по формуле (7.5) для каждого значения емкости:

$$R_1 = \frac{\tau_1}{C_1} = \dots \text{ Ом}, \quad R_{\text{парал}} = \frac{\tau_{\text{парал}}}{C_{\text{парал}}} = \dots \text{ Ом}.$$

5. Оцените относительную погрешность измеренных величин.

6. В выводе по работе сделайте анализ полученных экспериментальных зависимостей и оцените точность метода определения постоянной времени.

Контрольные вопросы

1. Какой ток называют квазистационарным? Сформулируйте условие квазистационарности электрического тока.
2. Какие физические законы и формулы используются для получения зависимости напряжения от времени при разряде конденсатора?
3. Какую величину называют постоянной времени цепи RC -цепи и что она показывает?
4. Как связана постоянная времени RC -цепи с параметрами этой цепи?
5. Укажите режим работы мультиметра при проведении измерений: измеряемая величина, режим и входы для подключения прибора.
6. С какой целью в работе строят график зависимости $\ln U = f(t)$?
7. Каким образом можно показать, что опытная зависимость является экспоненциальной?
8. Как экспериментально определяют постоянную времени цепи, содержащей R и C ?
9. Каким способом в данной работе измеряют сопротивление вольтметра?

Литература

1. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. М: Энергия. Т. 1, 1966.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том III. Электричество. М.: Наука, 1977.
3. Волынский Б.А. и др. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1987.

Лабораторная работа №8

ПРОВЕРКА ЗАКОНА БОГУСЛАВСКОГО-ЛЕНГМЮРА ДЛЯ ВАКУУМНОГО ДИОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: изучить принцип действия вакуумного диода, провести экспериментальную проверку закона Богуславского-Ленгмюра, определить удельный заряд электрона.

Приборы и принадлежности: лабораторный макет, радиолампа 2Ц2С, амперметр переменного тока, миллиамперметр и вольтметр постоянного тока, реостат, источник питания.

1. Краткая теория

1.1. Электрический ток в вакууме

В общем случае протекание электрического тока в абсолютном вакууме невозможно вследствие отсутствия носителей заряда. Электрический ток в вакуумном объёме возникнет только тогда, когда в него будут дополнительно введены электроны или ионы. При наличии внешнего электрического поля произойдет движение этих носителей заряда, приводящее к протеканию тока в вакуумном объёме.

Впервые эффект прохождения электрического тока через вакуум наблюдал Т.Эдисон (T. Edison) в 1883 году. Источником электронов в экспериментах являлась нагретая нить вакуумной лампы накаливания. В течение более двадцати последующих лет открытие Эдисона никто не пытался использовать для практических целей. Первым это сделал Д.Флеминг (D.Fleming), который в 1904 году изобрел «пустотный клапан» и предложил использовать его для детектирования. Этот прибор в дальнейшем стал называться вакуумным диодом или двухэлектродной лампой.

1.2. Физические процессы в двухэлектродной лампе

Вакуумный диод – электронная лампа, содержащая два электрода: катод и анод. Термоэлектронный катод служит для испускания электронов, а анод является коллектором, то есть электродом, который собирает электроны. Оба электрода помещаются в стеклянный, металлический или металлокерамический баллон, в котором создается вакуум 10^{-6} - 10^{-7}

мм рт. ст. Каждый электрод лампы имеет выводы через стенку баллона для подключения к электрической схеме.

В электронных лампах используется поток быстролетящих электронов, испускаемых нагретым катодом за счет явления термоэлектронной эмиссии. В простейшем случае катод представляет собой тонкую проволочку из тугоплавкого металла, накаливаемую электрическим током. Так, в мощных генераторных лампах катод изготавливается из тонкой вольфрамовой нити. Эмиссия электронов с поверхности вольфрамового катода начинается при температуре около 2300К и поэтому рабочая температура катода находится в пределах 2300-2600К. Подавляющее большинство современных ламп имеет оксидный катод, при изготовлении которого на металлическое основание (никель, вольфрам) наносится покрытие, состоящее из оксидов бария, стронция или кальция. Наличие атомов щелочноземельных металлов на поверхности катода обеспечивает малую работу выхода электронов, высокую эмиссионную способность катода и относительно низкие температуры (1000-1300К).

В простейшем случае анод представляет собой металлический цилиндр, окружающий катод. В пространстве «катод-анод» электроны двигаются под воздействием электрического поля. Для создания электрического поля между анодом и катодом прикладывается постоянное напряжение, называемое анодным напряжением (U_a). Если анодное напряжение положительно, то электроны, вылетевшие из катода, движутся к аноду и за счет этого через лампу проходит ток, называемый анодным током (I_a). Если анодное напряжение отрицательно, то электроны, вылетевшие из катода, попадают в тормозящее поле и возвращаются на катод. Ток во внешней цепи равен нулю. Таким образом, внутри диода ток может протекать только в одном направлении, что характеризует лампу как вентильный прибор.

1.3. Вольтамперная характеристика вакуумного диода

Кривая, изображающая зависимость силы анодного тока от анодного напряжения в вакуумном диоде, показана на рис. 8.1. При нулевом потенциале анода ток очень мал. При увеличении положительного потенциала на аноде ток возрастает до некоторого значения, называемого током насыщения. При повышении температуры катода (при увеличении тока, протекающего через

катод) величина тока насыщения увеличивается (рис.8.1). При этом увеличивается и то анодное напряжение, при котором устанавливается ток насыщения. При токе насыщения в диоде все выходящие из катода электроны переносятся электрическим полем на анод лампы. При подаче отрицательного потенциала на анод величина анодного тока быстро падает до нуля.

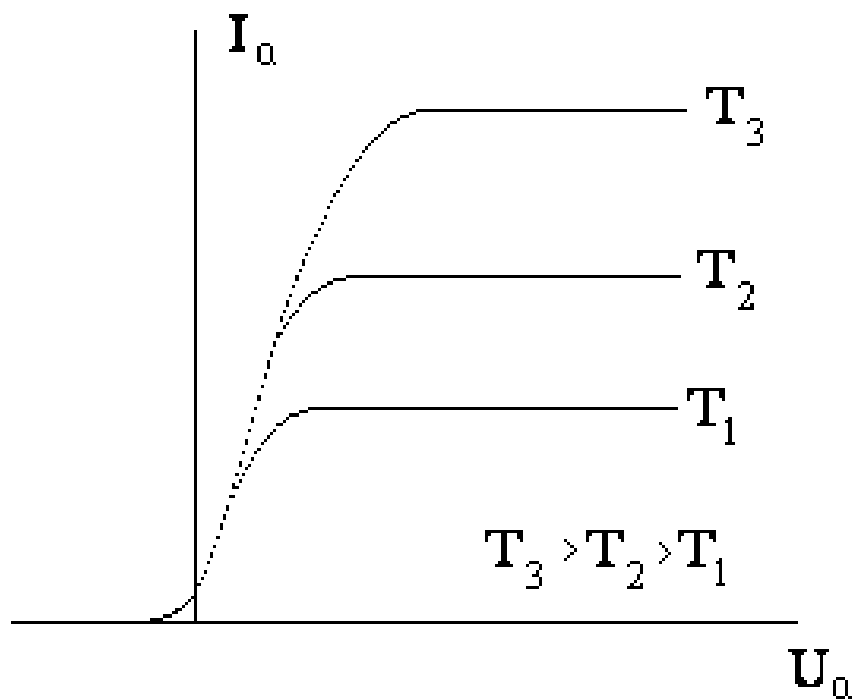


Рис.8.1. Вольт-амперная характеристика диода при различных температурах катода

1.4. Закон Богуславского-Ленгмюра

Закон Богуславского-Ленгмюра, или закон «степени трех вторых», устанавливает взаимосвязь между анодным током и анодным напряжением в вакуумном диоде. Эта зависимость для электродов простейших конструкций была исследована в 1911 г. американским ученым К. Чайлдом (K.Child), в 1913 г. — американским физиком И. Ленгмюром (I.Langmuir), а впоследствии перенесена на более сложные случаи С. А. Богуславским (1923 г., Россия), И. Ленгмюром (1923 г.), К.Блоджетт (K.Blodgett, 1924 г., США). В зарубежной литературе закон носит имя Чайлда-Ленгмюра.

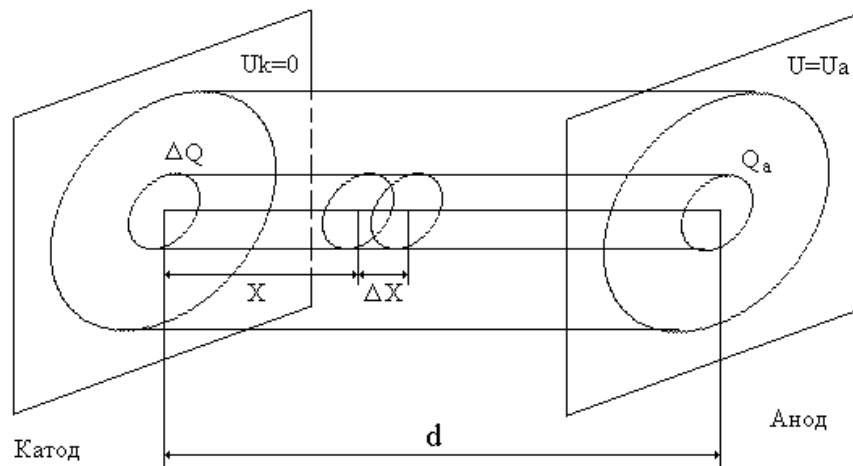


Рис.8.2. К выводу закона «степени трех вторых»

Определим зависимость анодного тока от анодного напряжения в диоде, образованном двумя плоскими, безграничными, параллельными друг другу пластинами (рис. 8.2). В этом случае можно пренебречь краевым эффектом и считать поле между анодом и катодом однородным. Примем следующие допущения. Пусть у поверхности катода ($x=0$) $U_k=0$, $\frac{\partial U}{\partial x} = -E_x = 0$, начальная скорость электронов $V_0=0$. Скорость электрона в любой точке междуэлектродного пространства с потенциалом U , если $V_0=0$, определяется выражением:

$$V = \sqrt{2 \frac{e}{m} U} . \quad (8.1)$$

Учитывая, что в междуэлектродном пространстве существует объемный заряд, воспользуемся уравнением Пуассона, которое для вакуума и при условии, что $E_Y=E_Z=0$, можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_0} . \quad (8.2)$$

Здесь ρ – объемная плотность заряда (Кл/м³), а $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Как известно, объемная плотность заряда связана с плотностью тока соотношением:

$$\rho = - \frac{j}{V} , \quad (8.3)$$

или с учетом (8.1):

$$\rho = -j \frac{\sqrt{\frac{m}{2e}}}{\sqrt{U}}. \quad (8.4)$$

Подставив выражение для ρ в (8.2), запишем уравнение Пуассона в виде:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{j}{\varepsilon_0} \frac{\sqrt{\frac{m}{2e}}}{\sqrt{U}}. \quad (8.5)$$

Умножая обе части равенств на $2\partial U / \partial x$ и интегрируя от 0 до x , получаем:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 = \frac{4j}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} U. \quad (8.6)$$

Постоянные интегрирования равны нулю, так как при $x=0$ $U_K=0$ и $dU/dx=0$.

Интегрирование (8.6) после извлечения корня из обеих частей равенства и разделения переменных приводит к следующему результату:

$$\frac{4}{3} \sqrt[4]{U^3} = 2 \sqrt{\frac{j}{\varepsilon_0}} \sqrt[4]{\frac{m}{2e}} x. \quad (8.7)$$

Отсюда легко определить плотность тока, одинаковую для любого сечения междуэлектродного пространства:

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{\sqrt{U^3}}{x^2}. \quad (8.8)$$

Подставив $x=d$ и $U=U_a$, запишем для плотности тока у поверхности анода:

$$j_a = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U_a^{3/2}}{d^2}. \quad (8.9)$$

Чтобы найти значение анодного тока, умножим (8.9) на величину Q_a той части поверхности анода, куда попадают электроны:

$$I_a = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{Q_a}{d^2} U_a^{3/2}, \quad (8.10)$$

или

$$I_a = KU_a^{3/2}. \quad (8.11)$$

Выражение (8.11), отображающее аналитически функцию $I_a=f(U_a)$, носит название закона «степени трех вторых».

1.5. Определение удельного заряда электрона

В случае коаксиальных цилиндрических электродов формула (8.11) остается справедливой, однако коэффициент K , преобразуется к виду [1]

$$K = \frac{2\sqrt{2}}{9} \frac{l\varepsilon_0 4\pi}{r\beta^2} \sqrt{\frac{e}{m}}, \quad (8.12)$$

где r – радиус анода, l – длина катода, β^2 – коэффициент, зависящий от соотношения радиуса анода и катода. Для определения удельного заряда электрона (e/m) поступим следующим образом. Построим вольтамперную характеристику диода в координатах $I_a=f(U_a^{3/2})$. В этом случае график зависимости имеет вид прямой линии, а угловой коэффициент будет определяться формулой (8.12). Тогда удельный заряд электрона может быть вычислен при помощи выражения

$$\frac{e}{m} = \left[\frac{9r\beta^2}{2\sqrt{2}l\varepsilon_0 4\pi} K \right]^2, \quad (8.13)$$

где K – тангенс угла наклона экспериментальной прямой в координатах $I_a=f(U_a^{3/2})$.

В реальных радиолампах ряд факторов приводит к отклонению от закона трех вторых, что приводит к погрешности при определении e/m :

1. начальные скорости эмиссионных электронов отличны от нуля; это приводит к перераспределению пространственного заряда и электрическое поле у катода не равно нулю;
2. существует контактная разность потенциалов анода и катода;
3. неэквипотенциальность катода (прямой накал);
4. асимметрия системы электродов;
5. наличие остатков газа в лампе.

2. Порядок выполнения работы

В настоящей работе используется лампа с подогревным оксидным катодом. Внешнее поле сильно влияет на величину тока эмиссии такого катода, поэтому у него не наблюдается резкого насыщения анодного тока. Данные радиолампы 2Ц2С: длина катода $l=0,9\text{см}$, радиус анода $r=0,95\text{см}$, $\beta^2=0,98$.

1. Собрать схему, изображенную на рис. 8.3. Цепь накала подключается к клеммам переменного напряжения 6.3В; $R_1=6\text{ Ом}$. Амперметр измеряет ток накала, миллиамперметр – анодный ток, вольтметр – анодное напряжение.

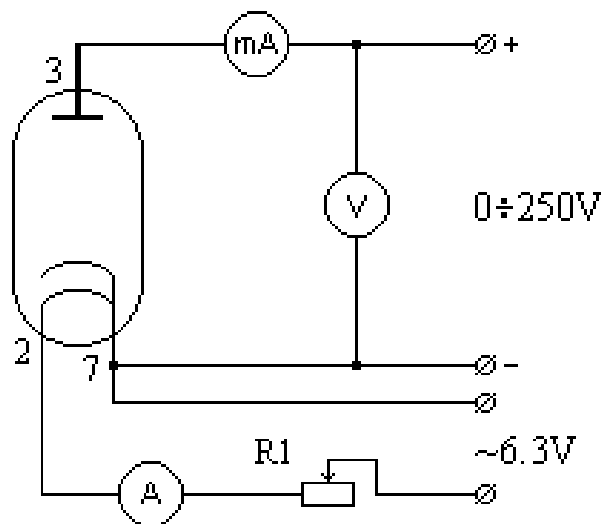


Рис.8.3. Схема экспериментальной установки

2. Изучить зависимость анодного тока от анодного напряжения, изменяя его от 0 до 100В через каждые 10В при токах накала 0.32, 0.34, 0.36 А.
3. Построить графики зависимости анодного тока от анодного напряжения в степени $3/2$ ($I_a=f(U_a^{3/2})$) при разных токах накала.
4. Проанализировать выполнение закона Богуславского-Ленгмюра.
5. По лучшему из графиков определить K и рассчитать величину удельного заряда электрона. Все расчеты выполнять в системе СИ.

Контрольные вопросы

1. Какова конструкция вакуумных диодов?
2. Поясните эффект термоэлектронной эмиссии.

3. Что такое катодный ток, анодный ток, анодное напряжение?
4. При каких предположениях верен закон «степени трех вторых»?
5. Вывод закона Богуславского-Ленгмюра.
6. При каких токах накала полученные вами кривые ближе к закону трех вторых? Почему?
7. Объясните полную вольтамперную характеристику диода с участком насыщения.
8. Сравните вольтамперные характеристики вакуумного и полупроводникового диодов.

Литература

1. *Капцов Н.А.* Электрические явления в газах и в вакууме. М-Л: ГИТТЛ, 1950.
2. *Физический практикум* / Под ред. В.И.Ивероновой. М.: Физматгиз, 1968.
3. *Калашников С.Г.* Электричество. 5-е изд. М.: Наука, 1985.
4. *Дулин В.Н.* Электронные приборы. М.: Энергия, 1977.

Лабораторная работа №9

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

***Цель работы:** экспериментальное изучение поведения электрического сопротивления металлов и полупроводников в температурном интервале 300-380К.*

***Приборы и принадлежности:** лабораторный макет, температурная ячейка, понижающий трансформатор, вольтметр переменного тока тип 434321, цифровой омметр, термометр, образцы.*

1. Краткая теория

С точки зрения электрических свойств твердые тела делятся на три класса: металлы, полупроводники и диэлектрики. Одним из основных критериев этой классификации является величина удельного сопротивления материала ρ . У металлов она составляет $10^{-8} \dots 10^{-6}$ Ом·м, у диэлектриков превышает 10^{12} Ом·м. Вещества с удельным сопротивлением от 10^{-6} до 10^{12} Ом·м относятся к полупроводникам. Важно отметить, что удельное сопротивление не является однозначным критерием для деления на металлы, полупроводники и диэлектрики, а указанные рамки являются условными. В каждом классе существует свой комплекс физических свойств, в частности имеет место принципиальное различие в зависимости величины удельного сопротивления от температуры. Анализ зависимостей $\rho(T)$ на примере металлов и полупроводников и будет выполнен в рамках данной работы.

Для характеристики электрических свойств материалов существует еще одна величина – электропроводность σ . Связь удельного сопротивления и электропроводности дается формулой:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (9.1)$$

1.1. Электрическое сопротивление металлов

Все металлы характеризуются высокой электропроводностью, которая составляет 10^6 - 10^8 Ом⁻¹·м⁻¹. Причина этого кроется в специфических условиях связи валентных электроном атомов металла с его ядром. При образовании кристаллической решетки валентные электроны отрываются от своих атомов и начинают свободно перемещаться по всему объему металла (свободные электроны). Важно отметить, что отрыв валентных электронов происходит без какого-либо внешнего воздействия на них. Концентрация свободных электронов n будет определяться концентрацией атомов металла и степенью ионизации. Для одновалентного металла концентрация электронов может быть определена как:

$$n = \frac{D}{M} N_A, \quad (9.2)$$

где D – плотность металла, M - молярная масса, N_A – число Авогадро.

Согласно классической электронной теории металлов Друде-Лоренца (Drude-Lorentz), свободные электроны ведут себя подобно молекулам идеального газа. Характер их теплового движения хаотичный, в процессе своего движения электроны испытывают многочисленные столкновения с ионами кристаллической решетки. Эти столкновения приводят к установлению теплового равновесия между электронным газом и кристаллической решеткой. Для невырожденного электронного средняя скорость теплового движения электронов вычисляется по известной формуле молекулярно-кинетической теории газов:

$$V_T = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (9.3),$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура в градусах Кельвина, m – масса электрона.

При включении электрического поля E на свободные электроны действует внешняя сила eE , которая упорядочивает их движение (в этой работе в силу одномерности задачи все записи сделаны в скалярной форме). Электроны приобретают дрейфовую скорость V_D , направление которой определяется внешним полем. Она

намного меньше скорости теплового хаотического движения электронов, но именно дрейфовая скорость определяет силу тока в проводнике. Дрейфовая скорость – это средняя скорость направленного движения носителей заряда.

На своем пути электроны испытывают столкновения с ионами решетки. На протяжении длины свободного пробега λ электрон движется ускоренно и увеличивает свою кинетическую энергию. В момент столкновения с ионом часть кинетической энергии теряется. Каждый свободный электрон претерпевает на своем пути большое число столкновений с ионами кристаллической решетки, при каждом столкновении скорость по направлению движения резко снижается. Эти явления, «мешающие» движению носителей заряда, обуславливают существование в каждом проводнике электрического сопротивления R . Если проводник имеет форму цилиндра или прямоугольника с длиной l и поперечным сечением S , то связь между R и ρ определяется формулой:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (9.4)$$

1.2. Температурная зависимость сопротивления металлов

Выведем ряд соотношений, которые помогут нам определить зависимость удельного сопротивления металлов от условий эксперимента. Рассмотрим проводник однородного сечения S с концентрацией электронов n . Под действием электрического поля с напряженностью E электроны движутся со скоростью V_D . Если взять произвольную плоскость, перпендикулярную проводнику, то за промежуток времени Δt через эту плоскость пройдет заряд Δq :

$$\Delta q = enSV_D\Delta t. \quad (9.5)$$

Сила тока в проводнике I :

$$I \equiv \frac{\Delta q}{\Delta t} = enSV_D,$$

а плотность тока

$$j \equiv \frac{I}{S} = enV_D. \quad (9.6)$$

От столкновения до столкновения электрон проходит длину свободного пробега λ за время τ ($\tau = \frac{\lambda}{V_T}$). Он движется с ускорением $a = \frac{eE}{m}$. К моменту следующего соударения максимальная скорость электрона составляет $V_{\max} = \frac{eE}{m}\tau$, а средняя дрейфовая скорость может быть определена как:

$$V_D = \frac{eE}{2m}\tau = \frac{e\lambda}{2mV_T}E. \quad (9.7)$$

Плотность тока, проходящего по проводнику, равна:

$$j = enV_D = \frac{e^2 n \lambda}{2mV_T}E. \quad (9.8)$$

Согласно закону Ома в дифференциальной форме:

$$j = \sigma E = \frac{1}{\rho}E, \quad (9.9)$$

откуда получаем искомое выражение для удельного сопротивления металла:

$$\rho = \frac{2mV_T}{e^2 n \lambda}. \quad (9.10)$$

Согласно выражению (9.10) величина удельного сопротивления в общем случае определяется концентрацией электронов, длиной свободного пробега и скоростью теплового движения. При увеличении температуры концентрация электронов не изменяется, но увеличивается скорость теплового движения и уменьшается величина свободного пробега. Последнее связано с тем, что при повышении температуры колебания ионов кристаллической решетки происходят с большей амплитудой. Анализ ф. (9.3) показывает, что при температурах вблизи комнатной в небольшом интервале изменением тепловой скорости можно пренебречь. Основной вклад в изменение удельного сопротивления металлов будет вносить изменение длины свободного

пробега, которая, как показывают точные расчеты, обратно пропорциональна температуре ($\lambda \sim \frac{1}{T}$). Таким образом, сопротивление металлов теоретически должно возрастать с увеличением температуры по закону, близкому к линейному.

Экспериментально установлено, что сопротивление металлического проводника в интервале температур вблизи комнатной прямо пропорционально температуре и аппроксимируется известной формулой:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (9.11)$$

где R_0 – сопротивление металлического проводника при 0 °С;

t – температура, °С;

α – температурный коэффициент сопротивления металла, который характеризует относительное приращение сопротивления при увеличении температуры на один градус.

Важно отметить, что работоспособность ф. (9.11) ограничивается для большинства металлов температурным интервалом вблизи комнатной температуры. Это обусловлено тем, что при других температурах изменяются режимы колебаний кристаллической решетки и принципиально другими становятся процессы рассеяния.

Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры имеет практическое значение для экспериментальной физики и техники. На основе этой зависимости базируются методы измерения температуры с применением термометров сопротивления. В качестве примера можно привести платиновые термометры сопротивления, которые работают в интервале от -263 до + 1000°С и имеют погрешность в сотые доли градуса.

1.3. Температурная зависимость сопротивления для полупроводников

Механизм электропроводности в полупроводниках резко отличается от случая для металлов. Если в металлах всегда имеются свободные электроны, то в полупроводниках валентные электроны достаточно сильно связаны с ядрами. Поэтому при построении кристаллической решетки валентные электроны продолжают входить в состав своих атомов и не участвуют в

процессах переноса. Для того, чтобы создать в материале носители заряда необходимо сообщить дополнительную энергию $E_{и}$, равную энергии ионизации. Энергия может быть передана путем теплового нагрева, светового излучения, сильным электрическим полем и т.д. Если у нас имеется собственный полупроводник (см. описание лабораторной работы №15), то процесс ионизации приводит к появлению в материале одинаковых концентраций отрицательно заряженных носителей (электронов) и положительно заряженных носителей (дырок). Если полупроводник является примесным, то в материале p -типа при подведении энергии формируются дополнительные дырки, а в материале n -типа – электроны. Концентрация носителей заряда в полупроводниках (10^{10} - 10^{19} см⁻³) намного меньше концентрации электронов в металлах, что обуславливает более высокое удельное сопротивление полупроводников по сравнению с металлами.

Концентрация носителей заряда (электронов, дырок) экспоненциально возрастает с ростом температуры:

$$n = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (9.12)$$

где A и B – константы, определяемые видом полупроводника, T – температура в градусах Кельвина. Сопротивление полупроводника в зависимости от температуры обычно записывается формулой:

$$R = R_{\infty} \exp\left(-\frac{E_{и}}{2kT}\right), \quad (9.13)$$

где R_{∞} – постоянная, имеющая размерность сопротивления и формально равная сопротивлению образца при бесконечно большой температуре.

В полупроводниках, как и в металлах, длина свободного пробега носителей тока также зависит от температуры, но характер температурной зависимости сопротивления определяется более сильной зависимостью концентрации носителей тока от температуры.

Если построить зависимость (9.13) в координатах $\ln R = f(1/T)$, то она будет иметь вид прямой линии:

$$\ln R = \ln R_{\infty} + \frac{E_{и}}{2k} \frac{1}{T}. \quad (9.14)$$

Тангенс угла наклона этой прямой позволяет рассчитать величину энергии ионизации. В собственном полупроводнике

величина E_{II} в ф. (9.13) и (9.14) соответствует энергии ионизации атомов полупроводника (ширине запрещенной зоны), в примесном полупроводнике – той энергии, которая необходима для ионизации атомов примеси.

2. Порядок выполнения работы

1. Собрать установку, показанную на рис.9.1.

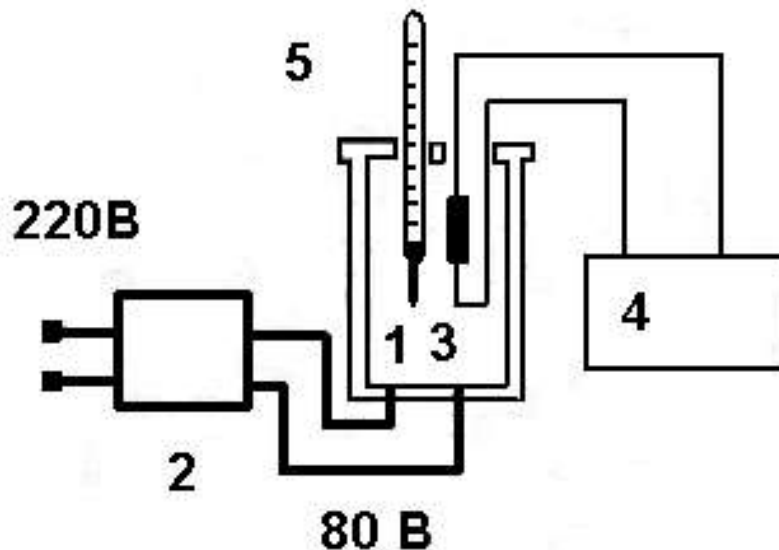


Рис.9.1. Схема установки

Температурная ячейка 1 питается от понижающего трансформатора 2 при величине напряжения 70-80 В. В ячейку помещается образец металла или полупроводника 3, сопротивление которого измеряется омметром 4. Температура в ячейке определяется термометром 5.

2. Прогреть омметр в течение 20 минут.

3. Поместить в ячейку металлический медный провод. Записать в тетрадь геометрические параметры образца. Диаметр провода 0,1 мм, длина 35 м. Измерить сопротивление при комнатной температуре.

4. Подать на ячейку напряжение 80В. Проводить измерение сопротивления образца в интервале от комнатной температуры до 80°C через каждые 2 градуса. Результаты записать в таблицу.

5. Построить график зависимости сопротивления металла от температуры $R(t)$. Рассчитать величину температурного коэффициента сопротивления.

6. Зная геометрические размеры образца, определить величину удельного сопротивления меди. Сравнить с табличным значением.
7. При помощи формул (9.2) и (9.3) сделать для комнатной температуры оценку концентрации электронов в меди и величину средней тепловой скорости. На основании формулы (9.10) вычислить длину свободного пробега при комнатной температуре.
8. При включенной тепловой ячейке заменить образец металла на образец полупроводника. Провести стабилизацию температуры в течение 7 минут, выключить питание трансформатора. Проводить измерение сопротивления образца в режиме остывания в интервале от 80°C до комнатной температуры до через каждые 2 градуса. Результаты записать в таблицу.
9. Построить графики зависимости $R(t)$ и $\ln R(1/T)$. Определить величину энергии ионизации в эВ.
10. Провести обсуждение полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Какова физическая природа возникновения электрического сопротивления в проводниках?
2. Сформулируйте понятия длины и времени свободного пробега носителей.
3. Чем обусловлено увеличение сопротивления металлов с ростом температуры?
4. Почему электропроводность полупроводников меньше электропроводности металлов?
5. Какова физическая природа температурной зависимости сопротивления полупроводника?
6. Сделайте вывод формулы (9.2).
7. Зачем для полупроводника нужно построение зависимости $\ln R(1/T)$?

Литература

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1985.
2. Неменов Л.Л., Соминский М.С. Основы физики полупроводников. Л.: Наука, 1974.
3. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977.

Лабораторная работа №10

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ, ЕМКОСТИ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: ознакомление с методами измерения реактивных сопротивлений, экспериментальная проверка закона Ома для переменного тока.

Приборы и принадлежности: генератор ГЗ-33, источник постоянного тока ВС-24М, два цифровых вольтметра В7-16, конденсатор, катушка индуктивности, эталонное сопротивление, соединительные провода.

1. Краткая теория

Рассмотрим цепь, составленную из последовательно соединенных омического сопротивления R , индуктивности L и емкости C (рис. 10.1), по которой под действием внешнего источника течет квазистационарный переменный ток

$$I = I_0 \cos \omega t, \quad (10.1)$$

где I_0 - амплитуда тока, а ω - круговая частота. Возникающее при этом напряжение на каждом элементе и во всей цепи можно найти как при помощи метода векторных диаграмм, так и в комплексном

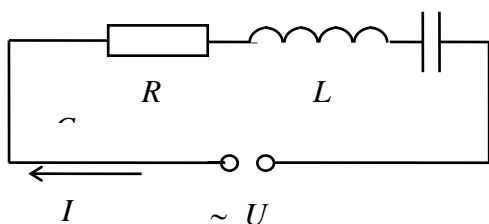


Рис.10.1. Электрическая схема

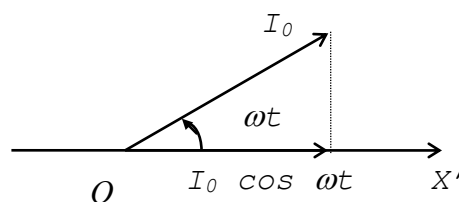


Рис.10.2. Векторная диаграмма

представлении (метод импедансов). В первом случае любую гармонически меняющуюся величину (например, ток) представляют в виде проекции на ось X' некоторого вспомогательного вектора, равного по модулю амплитуде этой величины (I_0) и образующего с осью X' угол, равный фазе ωt (рис. 10.2.). Так как все токи и напряжения в цепи меняются с одной и

той же частотой, то вся система соответствующих векторов с течением времени будет вращаться как целое вместе с вектором тока. Поэтому удобнее перейти в систему координат OX , вращающуюся синхронно с ними с той же частотой ω и совпадающую в начальный момент времени с неподвижной. В этой системе все векторы неподвижны и образуют с осью OX' углы, равные соответствующим начальным фазам.

В методе импедансов гармонически меняющиеся величины представляют на основе формулы Эйлера:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi \quad (10.2)$$

в виде действительных частей вспомогательных комплексных функций, которые обозначаются соответствующими буквами с тильдами. Например, ток (10.1) запишется в виде:

$$I = \operatorname{Re} \tilde{I}, \quad \tilde{I} = I_0 e^{i\omega t}. \quad (10.3)$$

Рассмотрим отдельно каждый элемент цепи.

1.1. Активное сопротивление

В силу квазистационарности тока напряжение на сопротивлении R можно найти по закону Ома для постоянного тока:

$$U_R = I R = I_0 R \cos \omega t, \quad (10.4)$$

то есть:

$$U_R = U_{R0} \cos \omega t, \quad U_{R0} = I_0 R. \quad (10.5)$$

Аналогичные соотношения в комплексном представлении запишутся:

$$\tilde{U}_R = U_{R0} e^{i\omega t}, \quad U_R = \operatorname{Re} \tilde{U}_R. \quad (10.6)$$

Согласно (10.4), мгновенные значения напряжения U_R и тока I пропорциональны между собой, то есть изменяются синфазно. Их векторная диаграмма изображена на рис. 10.3.

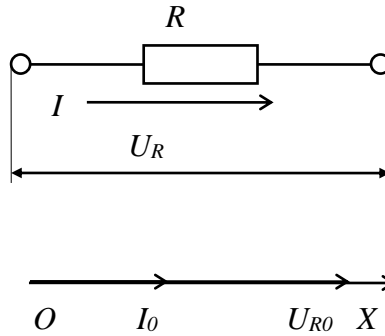


Рис.10.3. Векторная диаграмма

Отсутствие сдвига фаз между током и напряжением означает, что в любой момент времени заряды движутся в направлении уменьшения своей потенциальной энергии. Другими словами, при прохождении тока через активное сопротивление происходит непрерывная потеря энергии тока, которая в омических сопротивлениях переходит в тепловую энергию. Однако выделение джоулева тепла не является единственной причиной возникновения активного сопротивления. Так, например, активное сопротивление дросселей или трансформаторов является следствием потерь не только на нагревание обмоток, а также потерь на нагревание сердечников вследствие их перемагничивания. В конденсаторах активное сопротивление обусловлено током утечки и нагреванием диэлектрика вследствие его переполаризации. В роторах электродвигателей энергия электрического тока переходит в механическую энергию.

Итак, активное сопротивление возникает в результате необратимых потерь энергии тока, которая восполняется за счет работы источника тока. Потери на активном сопротивлении или мгновенная мощность переменного тока будут определяться следующим соотношением:

$$P = I U_R = I_0 U_{R0} \cos^2 \omega t. \quad (10.7)$$

Поскольку среднее значение квадрата косинуса за период равно $1/2$, среднее значение мощности будет равно:

$$P = \frac{I_0 U_{R0}}{2} = \frac{I_0^2 R}{2}. \quad (10.8)$$

Для удобства работы, чтобы формула расчета мощности переменного тока совпадала по форме с аналогичной формулой для постоянного тока ($P = I^2 R = I U$), вводятся понятия действующих (эффективных) значений силы тока и напряжения. Действующее (эффективное) значение силы тока равно силе такого постоянного тока, при котором средняя мощность, выделяющаяся в проводнике в цепи переменного тока, равна мощности, выделяющейся в том же проводнике в цепи постоянного тока:

$$I_{\text{эф.}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{эф.}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (10.9)$$

Именно эти величины соответствуют градуировке измерительных приборов.

1.2. Индуктивное сопротивление

В случае протекания переменного тока через катушку индуктивности в контуре возникает э.д.с. самоиндукции, которая в случае отсутствия активного сопротивления будет в любой момент времени численно равна и противоположна по знаку напряжению на концах катушки:

$$E = -U_L = -L \frac{dI}{dt} = I_0 \omega L \sin \omega t, \quad (10.10)$$

то есть

$$U_L = I_0 \omega L \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_{L0} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_0 X_L \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (10.11)$$

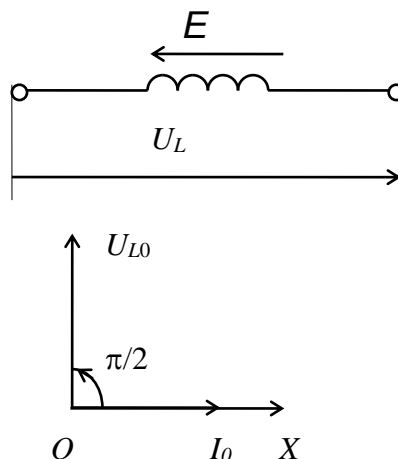


Рис. 10.4. Векторная диаграмма для случая с индуктивностью

где величина

$$X_L = \frac{U_{L0}}{I_0} = L \omega \quad (10.12)$$

носит название индуктивного сопротивления. Векторная диаграмма, соответствующая данному случаю, изображена на рис. 10.4. Как видно из (10.1) и (10.11), колебания напряжения на концах катушки опережают по фазе колебания силы тока на $\pi/2$, поэтому только половину периода они имеют одинаковый знак, ток течет в направлении уменьшения потенциала, и происходит потеря энергии тока. В другой половине периода ток течет в направлении увеличения потенциала и заряды при этом увеличивают свою потенциальную энергию. Таким образом, сдвиг по фазе колебаний напряжения и силы тока на идеальной катушке приводит к тому, что средняя мощность переменного тока на катушке в течение периода равна нулю.

В комплексном представлении можно записать:

$$\tilde{U}_L = -\tilde{E} = L \frac{d\tilde{I}}{dt} = L \frac{d}{dt}(I_0 e^{i\omega t}) = i\omega L I_0 e^{i\omega t} = i\omega L \tilde{I} . \quad (10.13)$$

Таким образом, в комплексном представлении для мгновенных значений тока и напряжения можно написать соотношение, аналогичное закону Ома:

$$\tilde{U}_L = \tilde{I} \tilde{X}_L, \quad (10.14)$$

где величина

$$\tilde{X}_L = \frac{\tilde{U}_L}{\tilde{I}} = i\omega L \quad (10.15)$$

называется комплексным сопротивлением (импедансом) индуктивности. Так как $i = e^{i\pi/2}$, то:

$$X_L = \omega L e^{i\pi/2} = X_L e^{i\pi/2} . \quad (10.16)$$

Следовательно, модуль импеданса индуктивности совпадает с индуктивным сопротивлением, а аргумент - с разностью фаз между током и напряжением.

1.3. Емкостное сопротивление

Ток в цепи конденсатора возникает в результате чередующихся процессов его зарядки и разрядки в соответствии с изменениями приложенного к нему напряжения. Так как сам конденсатор представляет собой разрыв цепи и ток проводимости проходить через него не может, то на его обкладках возникает заряд, периодически накапливающийся и снимаемый переменным током I :

$$q = \int I(t) dt . \quad (10.17)$$

При этом на конденсаторе возникает напряжение

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I(t) dt = \int I_0 \cos \omega t dt = \frac{I_0}{C\omega} \sin \omega t. \quad (10.18)$$

Таким образом,

$$U_C = \frac{I_0}{C\omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = U_{C0} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_0 X_C \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (10.19)$$

где величина

$$X_C = \frac{U_{C0}}{I_0} = \frac{1}{\omega C} \quad (10.20)$$

называется емкостным сопротивлением. Соответствующая векторная диаграмма изображена на рис. 10.5. Напряжение на

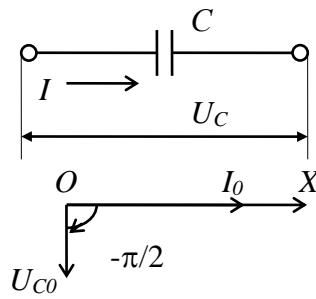


Рис.10.5. Векторная диаграмма для случая с емкостью.

конденсаторе, согласно (10.19), отстает от тока на $\pi/2$, поэтому, как и в случае индуктивности, ток на конденсаторе периодически теряет (при зарядке) и получает (при разрядке) энергию. При этом среднее значение мощности переменного тока на идеальном конденсаторе за период будет равно нулю.

В комплексном представлении напряжение на конденсаторе находится в соответствии с формулами:

$$\tilde{U}_C = \frac{\tilde{q}}{C} = \frac{1}{C} \int I_0 e^{i\omega t} dt = \frac{I_0}{i\omega C} e^{i\omega t} = \frac{1}{i\omega C} \tilde{I}. \quad (10.21)$$

Аналогично индуктивности здесь также можно записать закон Ома в виде:

$$\tilde{U}_C = \tilde{I} \tilde{X}_C, \quad (10.22)$$

где величина

$$\tilde{X}_C = \frac{\tilde{U}_C}{\tilde{I}} = \frac{1}{i\omega C} = \frac{1}{\omega C} e^{-i\pi/2} = X_C e^{-i\pi/2} \quad (10.23)$$

носит название комплексного сопротивления, или импеданса емкости. Согласно (10.23), модуль импеданса совпадает с емкостным сопротивлением, а аргумент - с разностью фаз между током I и напряжением U_C .

1.4. Последовательная RLC-цепочка

Вернемся к исходной цепи, изображенной на рис. 10.1. Так как все элементы цепи соединены последовательно, то мгновенное напряжение на всей цепи равно в каждый момент времени сумме мгновенных напряжений на каждом из них:

$$U = U_R + U_L + U_C . \quad (10.24)$$

В методе векторных диаграмм каждое слагаемое в (10.24)

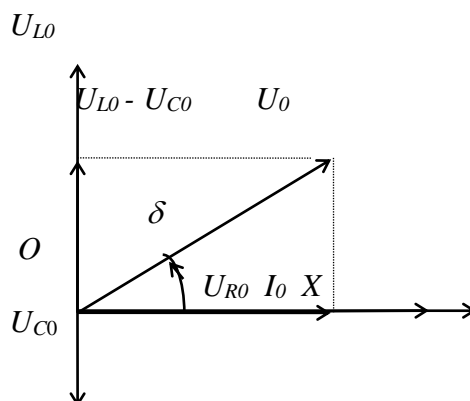


Рис. 10.6. Векторная диаграмма для RLC-цепи

в любой момент времени представляется в виде проекции соответствующего вектора на неподвижную ось OX . Но поскольку сумма проекций векторов равна проекции их суммы, в (10.24) вместо проекций можно складывать сами вектора, а проекцию найти в конце вычислений и, таким образом, от сложения тригонометрических функций перейти к более наглядному сложению векторов. В использовании этого приема и состоит метод векторных диаграмм (рис. 10.6).

Построив векторную диаграмму для RLC-цепи, находим амплитуду U и начальную фазу δ напряжения:

$$U_0 = \sqrt{U_{R0}^2 + (U_{L0} - U_{C0})^2} = I_0 \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I_0 \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}, \quad (10.25)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_{L0} - U_{C0}}{U_{R0}} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (10.26)$$

Зная U_0 и δ , можно записать выражение для мгновенного значения напряжения:

$$U = U_0 \cos(\omega t + \delta). \quad (10.27)$$

Согласно (10.25), (10.26), амплитуда напряжения U_0 прямо пропорциональна амплитуде тока I_0 , а сдвиг фаз δ от тока не зависит (закон Ома для переменного тока). Коэффициент пропорциональности

$$Z = U_0 / I_0 \quad (10.28)$$

называется полным сопротивлением цепи.

Для последовательной RLC -цепочки из (10.25) получаем:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (10.29)$$

Как видно из (10.29), для цепей переменного тока зависимость полного сопротивления Z от сопротивлений отдельных элементов более сложная, чем для цепей постоянного тока.

В методе импедансов используется аналогичный прием: в комплексном представлении каждое слагаемое в (10.24) записывается в виде действительной части соответствующей комплексной функции, поэтому сначала можно сложить функции $\tilde{U}_R, \tilde{U}_L, \tilde{U}_C$, а затем найти действительную часть:

$$\tilde{U} = \tilde{U}_R + \tilde{U}_L + \tilde{U}_C = \tilde{I}(R + \tilde{X}_L + \tilde{X}_C), \quad U = \operatorname{Re} \tilde{U}. \quad (10.30)$$

Таким образом, комплексное представление позволяет записать закон Ома не только для амплитудных, но и для мгновенных комплексных значений тока и напряжения:

$$\tilde{U} = \tilde{I} \tilde{Z}, \quad (10.31)$$

где величина

$$\tilde{Z} = \tilde{R} + \tilde{X}_L + \tilde{X}_C = R + i(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (10.32)$$

называется комплексным сопротивлением (импедансом) цепи. В (10.32) импеданс записан в алгебраической форме $\tilde{Z} = R + iX$, где $R = \operatorname{Re} \tilde{Z}$ представляет активное сопротивление цепи, а мнимая часть $X = \operatorname{Im} \tilde{Z} = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ - реактивное сопротивление.

В показательной форме импеданс цепи записывается:

$$\tilde{Z} = Z e^{i\delta} , \quad (10.33)$$

где модуль

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (10.34)$$

совпадает с полным сопротивлением цепи (10.29), а аргумент δ - с разностью фаз между током и напряжением (10.26):

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} . \quad (10.35)$$

Как видно из (10.32), импеданс \tilde{Z} для цепей переменного тока в отличие от полного сопротивления Z находится по тем же правилам, что и сопротивление цепей постоянного тока. Этот факт представляет собой одно из основных достоинств метода импедансов.

2. Важные частные случаи

При выполнении лабораторных работ №№ 10 и 11 будут важны следующие частные случаи:

1. Катушка индуктивности, имеющая активное сопротивление R_L . В этом случае:

$$R_C = 0, Z = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2} . \quad (10.36)$$

Из этого соотношения можно определить реактивное сопротивление и индуктивность:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R_L^2} ; L = \frac{\sqrt{Z^2 - R_L^2}}{\omega} . \quad (10.37)$$

2. Безиндуктивная цепь:

$$R_L = 0, Z = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{R_C^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}} . \quad (10.38)$$

Из этого соотношения можно выразить реактивное сопротивление и емкость:

$$X_C = \sqrt{Z^2 - R_C^2} , C = \frac{1}{\omega \sqrt{Z^2 - R_C^2}} . \quad (10.39)$$

Если сопротивлением подводящих проводов и потерями в диэлектрике конденсатора пренебречь, то

$$R_C = 0 , X_C = Z , C = \frac{1}{\omega Z} . \quad (10.40)$$

В обоих случаях полное сопротивление Z можно определить исходя из показаний амперметра $I_{\text{эфф.}}$ и вольтметра $U_{\text{эфф.}}$:

$$Z = \frac{U_{\text{эфф.}}}{I_{\text{эфф.}}} . \quad (10.41)$$

3. Порядок выполнения работы

В данной работе необходимо последовательно выполнить несколько упражнений, каждое из которых решает задачу измерения тех или иных параметров изучаемой цепи, изображенной на рис. 10.1. После этого все полученные величины анализируются вместе в рамках выполнимости закона Ома для переменного тока.

3.1. Упражнение 1. Измерение емкостного сопротивления и емкости конденсатора

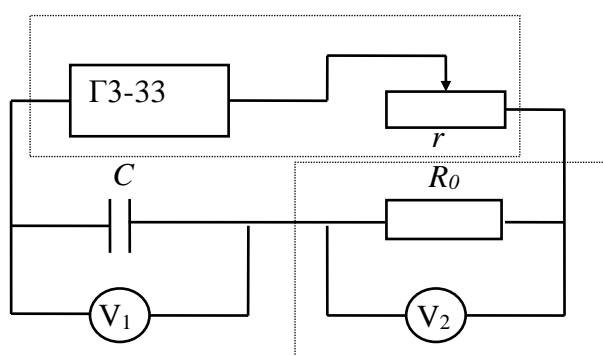


Рис.10.7. Схема для измерения активного сопротивления и емкости конденсатора

1. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 10.7, в которой:
 - в качестве источника переменного тока используется генератор сигналов звуковой частоты ГЗ-33,
 - переменным сопротивлением r является внутренний потенциометр генератора,
 - для измерения напряжения на конденсаторе используется вольтметр V_1 , для измерения силы тока - параллельно соединенные эталонное сопротивление R_0 и вольтметр V_2 . Величина эталонного сопротивления равна 1 Ом, поэтому напряжение на нем, измеренное вольтметром V_2 и выраженное в вольтах, численно равно силе тока, выраженной в амперах. В качестве вольтметров используются универсальные цифровые приборы В7-16.

2. Включить и прогреть генератор и вольтметры, установить частоту $\nu = 700$ Гц и, меняя ток через конденсатор с помощью реостата r , выполнить не менее трех измерений силы тока и напряжения. По формулам (10.39) вычислить реактивное сопротивление конденсатора, его емкость. При расчетах круговую частоту определяют по формуле $\omega = 2\pi\nu$. Результаты представить в виде таблицы:

Таблица 10.1.

Измерение реактивного сопротивления и емкости конденсатора

$U_{\text{ЭФФ.}}, \text{В}$	$I_{\text{ЭФФ.}}, \text{мА}$	$X_C, \text{Ом}$	$(X_C)_{\text{СР}}, \text{Ом}$	$C_{\text{СР}}, \text{мкФ}$

3.2. Упражнение 2. Измерение активных и реактивных сопротивлений катушек индуктивности

В отличие от конденсаторов, катушки индуктивности обычно имеют значительные потери, связанные в основном с активным сопротивлением обмотки. Для его измерения катушка включается в цепь постоянного тока (в этом случае реактивное сопротивление отсутствует). Полное и реактивное сопротивления измеряют при включении в цепь переменного тока.

3.2.1. Измерение активных сопротивлений катушек

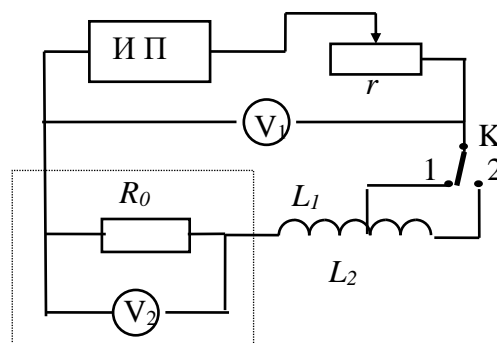


Рис.10.8. Схема для измерения активных сопротивлений катушек

1. Собрать согласно рис. 10.8 схему, в которой:

- в качестве источника питания (ИП) использовать выпрямитель ВС-24М,
- вольтметры V_1 и V_2 , как и в первом упражнении, служат для измерения напряжения и силы тока соответственно,
- ключ К в положении "1" включает в цепь часть катушки, имеющую индуктивность L_1 , а в положении "2" - всю катушку, имеющую индуктивность L_2 .

2. Поставить вольтметры в режим измерения постоянного напряжения и, меняя с помощью реостата силу тока через катушку, провести для каждой индуктивности не менее трех измерений напряжения и силы тока. По результатам измерений вычислить активные сопротивления катушек. Результаты измерений представить в виде таблицы:

Таблица 10.2

Измерение активных сопротивлений катушек

	$U_{\text{пост.}}, \text{В}$	$I_{\text{пост.}}, \text{мА}$	$R_L, \text{Ом}$	$(R_L)_{\text{ср}}, \text{Ом}$
L_1 ("127 В")				
L_2 ("220 В")				

3.2.2. Измерение реактивных сопротивлений и индуктивности катушек

1. Отключить от цепи выпрямитель ВС-24М и подключить цепь к генератору ГЗ-33. Установить частоту $\nu = 700$ Гц.

2. Перевести вольтметры в режим измерения переменных напряжений и выполнить не менее трех измерений $U_{\text{ЭФФ.}}$ и $I_{\text{ЭФФ.}}$ для каждой катушки L_1 и L_2 . По формулам (10.37), (10.41) вычислить их полные и реактивные сопротивления, индуктивность и проверить справедливость закона Ома для переменного тока, текущего через катушку индуктивности.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу:

Таблица 10.3

Измерение реактивных сопротивлений и индуктивностей катушек

	$U_{\text{ЭФФ.}}$, В	$I_{\text{ЭФФ.}}$, мА	Z_L , Ом	$(Z_L)_{\text{СР.}}$, Ом	$(X_L)_{\text{СР.}}$, Ом	$L_{\text{СР.}}$, мГн
L_1 ("127 В")						
L_2 ("220 В")						

3.3. Упражнение 3. Проверка закона Ома в последовательной RLC - цепи и определение ее полного сопротивления

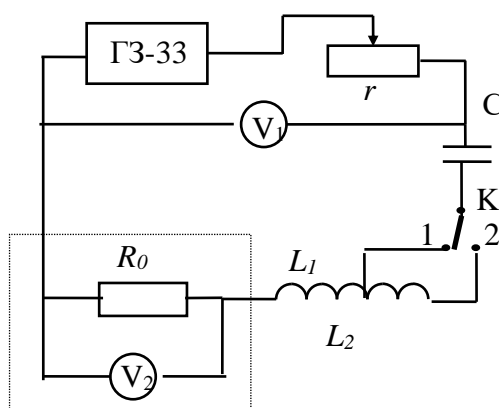


Рис.10.9. Схема RLC-цепи

1. Собрать схему согласно рис. 10.9. В ней эталонное сопротивление R_0 , катушка L_1 (или L_2) и конденсатор C образуют последовательную RLC-цепь. Назначение элементов аналогично предыдущим упражнениям.
2. Изменяя силу тока в цепи с помощью реостата, провести по три измерения напряжения для каждого подключения катушки и определить экспериментальные значения полного сопротивления по формуле (10.40).
3. Используя результаты вычисления C , L и R_L из упражнений 1 и 2 и учитывая эталонное сопротивление R_0 по формуле (10.34), вычислить теоретическое значение полного сопротивления и

сравнить его с экспериментальным. Результаты измерений и вычислений представить в виде таблицы:

Таблица 10.4

Измерение полного сопротивления RLC - цепи

	$U_{\text{эфф.}}$, В	$I_{\text{эфф.}}$, мА	$Z_{\text{эксп.}}$, Ом	$(Z_{\text{эксп.}})_{\text{ср.}}$, Ом	$Z_{\text{теор.}}$, Ом
RCL_1 ("127 В")					
RCL_2 ("220 В")					

4. Оценить погрешности эксперимента. Сформулировать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое эффективное значение тока и напряжения? Как они вычисляются?
2. Запишите закон Ома для переменного тока в вещественной форме. Что такое полное сопротивление?
3. Запишите закон Ома для переменного тока в комплексной форме. Что такое импеданс цепи?
4. Какой смысл имеет действительная и мнимая части импеданса, его модель и аргумент?
5. Изобразите векторные диаграммы для разных случаев.
6. Запишите формулы для реактивных сопротивлений.
7. Как измеряются активные и реактивные сопротивления в рамках данной работы?

Литература

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1987.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3. Электричество. М.: Наука, 2004.
3. Лабораторные занятия по физике / Под. ред. Л.Л. Гольдина. М.: Наука, 1983.

Лабораторная работа №11

МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы: ознакомление с классическими методами измерения реактивных сопротивлений при помощи мостовых схем.

Приборы и принадлежности: лабораторный макет, генератор ГЗ-109, милливольтметр ВЗ-39, два магазина сопротивлений МСР-63, конденсатор, катушка индуктивности, два эталонных сопротивления, соединительные провода.

1. Краткая теория

Мостовые схемы широко используются в различных областях электроники. Так, в системах управления они устанавливают наличие разбаланса между двумя напряжениями, на основе чего вырабатывается сигнал коррекции отклонения контролируемого параметра от заданной величины. Кроме того, они могут применяться в системах считывания переменных, в источниках питания, некоторых схемах детектирования. Однако наибольшее применение мостовые схемы получили при измерениях сопротивлений, емкостей и индуктивностей, а также частоты сигнала.

1.1. Мосты переменного тока

Для измерения реактивных сопротивлений существует множество разнообразных мостовых схем, различающихся видом измеряемой нагрузки и уравнивающих элементов (резистивные, емкостные или индуктивные), а также способом их включения. Все они позволяют определять обе характеристики реактивного сопротивления: Z и δ или R и X .

1.1.1. Мост Максвелла

Рассмотрим более подробно мост Максвелла (рис. 11.1), который используется в данной работе для измерения активной и реактивной составляющих полного импеданса катушки индуктивности. В нем катушка с неизвестными индуктивностью L_x

и активным сопротивлением R_X уравнивается резистивно-емкостным сопротивлением R_1, C . Компенсация моста заключается в том, что при заданном эталонном сопротивлении R_3 последовательно подбираются такие сопротивления R_1 и R_2 , чтобы ток через гальванометр не протекал. Однако для этого потенциалы точек C и D должны совпадать как по амплитуде, так и по фазе. Поэтому, чтобы уравновесить мост по обоим параметрам, необходимо подбирать оба сопротивления R_1 и R_2 , а не одно, как в мосте Уитстона постоянного тока. Мост с помощью одного уравнивания позволяет определить оба параметра нагрузки (например, R и X). Для расчета моста перейдем к эквивалентной схеме (рис. 11.2), заменив сопротивление каждого плеча соответствующим импедансом:

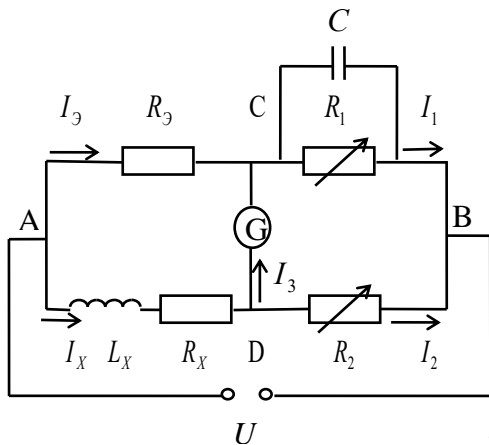


Рис.11.1. Мост Максвелла

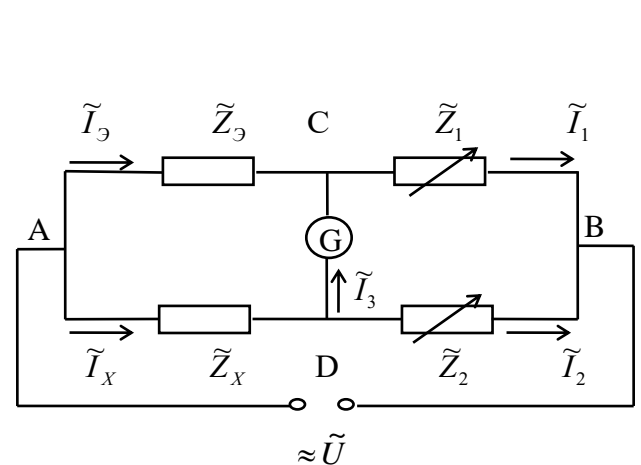


Рис.11.2. Эквивалентная схема

$$\begin{aligned}\tilde{Z}_3 &= R_3, \\ \tilde{Z}_x &= R_x + \tilde{X}_L = R_x + i\omega L_x, \\ \frac{1}{\tilde{Z}_1} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{\tilde{X}_C} = \frac{1}{R_1} + i\omega C, \\ \tilde{Z}_2 &= R_2.\end{aligned}\tag{11.1}$$

При выбранном направлении токов условие равновесия моста запишется:

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi}_C &= \tilde{\varphi}_D; \tilde{I}_3 = 0, \\ \tilde{I}_3 &= \tilde{I}_1, \tilde{I}_x = \tilde{I}_2, \\ \tilde{U}_{AC} &= \tilde{U}_{AD}; \tilde{U}_{CB} = \tilde{U}_{DB}.\end{aligned}\tag{11.2}$$

Из этих равенств в соответствии с законом Ома для переменного тока получаем:

$$\begin{aligned}\tilde{U}_{AC} &= \tilde{I}_1 \tilde{Z}_3, \quad \tilde{U}_{AD} = \tilde{I}_2 \tilde{Z}_X, \\ \tilde{U}_{CB} &= \tilde{I}_1 \tilde{Z}_1, \quad \tilde{U}_{DB} = \tilde{I}_2 \tilde{Z}_2,\end{aligned}\quad (11.3)$$

откуда следует условие равновесия моста:

$$\frac{\tilde{Z}_X}{\tilde{Z}_2} = \frac{\tilde{Z}_3}{\tilde{Z}_1} \quad \text{или} \quad \tilde{Z}_X = \tilde{Z}_3 \frac{\tilde{Z}_2}{\tilde{Z}_1}. \quad (11.4)$$

Подставляя в полученное выражение значения импедансов (11.1), получим:

$$R_X + i\omega L_X = R_3 R_2 \left(\frac{1}{R_1} + i\omega C \right). \quad (11.5)$$

Приравнявая слева и справа действительные и мнимые части друг другу, получим формулы для расчета R_X и L_X :

$$R_X = R_3 \frac{R_2}{R_1}, \quad L_X = R_3 R_2 C. \quad (11.6)$$

Кроме того, катушка характеризуется безразмерным параметром

$$Q = \operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L_X}{R_X} = \omega R_1 C, \quad (11.7)$$

называемым добротностью катушки, зависящим от частоты.

Отметим, что существует единственное значение R_1 и R_2 , при которых достигается равновесие моста, причем это условие не зависит ни от частоты, ни от амплитуды переменного напряжения.

1.1.2. L и C - мосты Уитстона

Мостик Уитстона на переменном токе может быть использован как для измерения сопротивлений, так и для измерения индуктивности или емкости. Индуктивный мост изображен на рис. 11.3,а. При наличии переменного тока индуктивное реактивное сопротивление вызовет падение напряжения на катушке индуктивности аналогично тому, как напряжение падает на резисторах в плечах моста. Поэтому, если падение напряжения на R_2 равно падению напряжения на L_X , мост будет уравновешен и неизвестную величину L_X , можно определить по формуле:

$$L_X = L_{\text{э}} \frac{R_2}{R_1}, \quad (11.8)$$

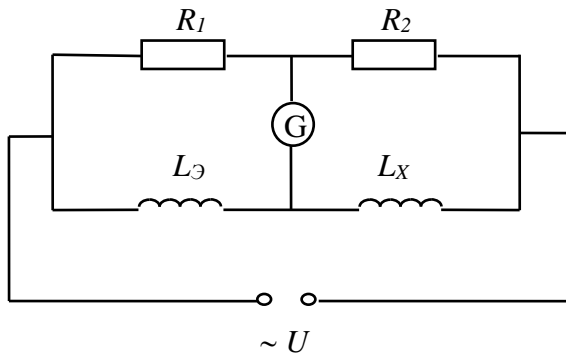


Рис. 11.3,а. Индуктивный мост

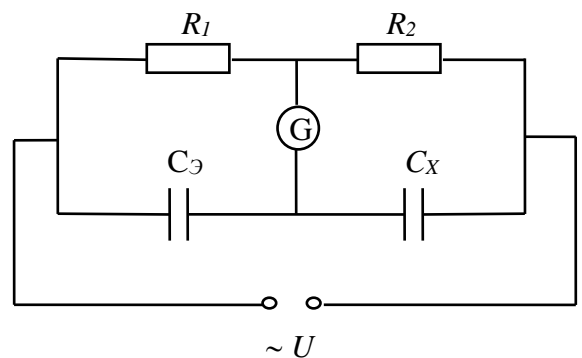


Рис. 11.3,б. Емкостной мост

где $L_{\text{э}}$ - известная величина индуктивности. Для емкостного моста, показанного на рис. 11.3,б, необходимо учитывать, что емкостное сопротивление обратно пропорционально величине емкости. Поэтому в состоянии равновесия отношение сопротивлений R_1 и R_2 обратно отношению емкостей, то есть

$$C_X = C_{\text{э}} \frac{R_1}{R_2}, \quad (11.9)$$

где $C_{\text{э}}$ - известное значение емкости.

1.1.3. Мост Овена

Работа моста Овена, типичная схема которого представлена на рис. 11.4, основана на сопоставлении индуктивности и емкости. В этой схеме L_X - неизвестная индуктивность, а R_X - резистивная составляющая индуктивного сопротивления. Для уравнивания моста можно изменять емкость конденсатора C_1 или же последовательно включенный резистор R_1 . В состоянии равновесия моста величину индуктивности можно найти по формуле:

$$L_X = R_1 R_{\text{э}} C_2, \quad (11.10)$$

где $R_{\text{э}}$ - известное эталонное сопротивление. Величина резистивной составляющей индуктивного сопротивления определяется выражением:

$$R_X = \frac{C_2}{C_1} R_{\text{э}}. \quad (11.11)$$

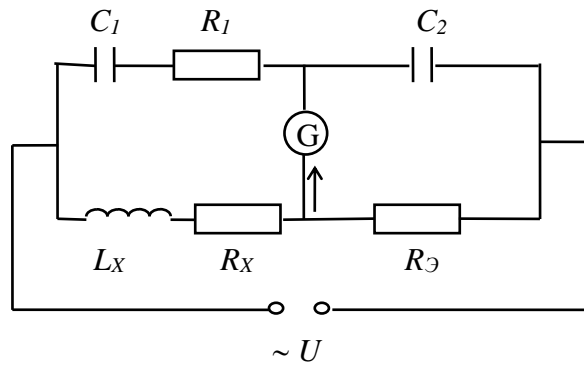


Рис. 11.4. Мост Овена

1.1.4. Мост Вина

Мост Вина (рис. 11.5) применяется для измерения частоты. Его также можно использовать для проверки величины емкости по данным сопротивлений и частоте приложенного переменного напряжения. Если $C_X = C_3$, $R_X = R_3$ и $R_2 = 2R_1$, то измеряемая частота определяется следующим соотношением:

$$f = \frac{1}{2\pi R_X C_X} . \quad (11.12)$$

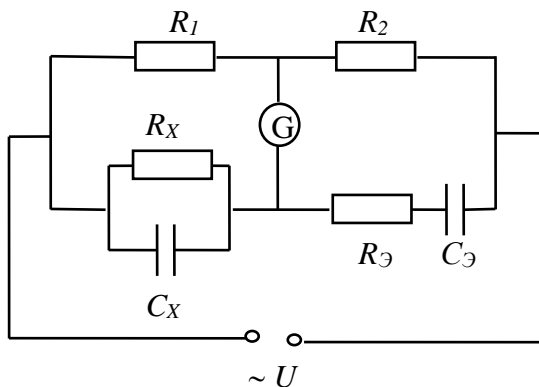


Рис. 11.5. Мост Вина

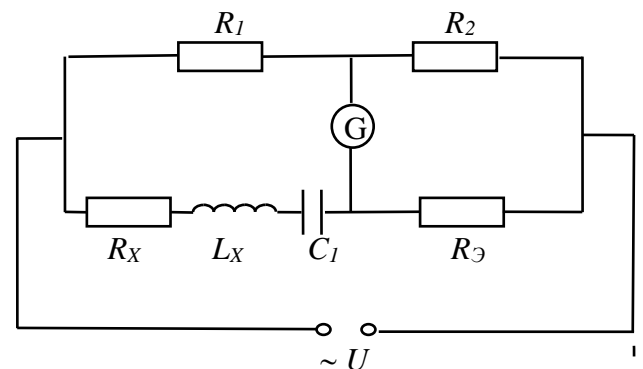


Рис. 11.6. Резонансный мост

1.1.5. Резонансный мост

Схема резонансного моста приведена на рис. 11.6. В уравновешенном состоянии плечо моста, состоящее из элементов R_X , L_X , C_1 , на частоте приложенного сигнала находится в резонансе, поэтому схема становится чисто резистивной. Это объясняется тем, что резонансной частоте реактивное сопротивление конденсатора равно по величине и противоположно

$$L_X = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (11.13)$$

Неизвестная величина R_X определяется по формуле:

2. Порядок выполнения работы

- ## Измерение характеристик катушки индуктивности

[illegible]

6. Сформулировать выводы по работе.
7. Провести оценку погрешности измерений.

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры активного и реактивного сопротивлений. Всегда ли активное сопротивление является омическим (резистивным)? Каковы физические причины их возникновения?
2. Каковы единицы измерения индуктивности, емкости, сопротивления в системе СИ? Дайте их определения.
3. Где используются и для чего предназначены мостовые схемы?
4. В чем принципиальное отличие мостов постоянного и переменного тока?
5. Нарисуйте схему моста Максвелла и сделайте вывод основной рабочей формулы.
6. Объясните, как работают схемы мостов Уитстона, Овена, Вина, резонансного.
7. Почему при уравнивании моста напряжение не снижается до нулевой отметки?

Литература

1. *Калашников С.Г.* Электричество. М.: Наука, 1987.
2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т.3. Электричество. М.: Наука, 1977.
3. *Лабораторные занятия по физике* / Под. ред. Л.Л. Гольдина. М.: Наука, 1983.
4. *Карандеев К.Б.* Мостовые методы измерений. М.: Машиностроение, 1953.

Лабораторная работа №12

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: экспериментальное получение резонансной кривой, измерение индуктивности и емкости резонансным методом.

Приборы и принадлежности: стенд ЮУрГУ, генератор сигналов специальной формы, миниблоки «Катушка», «Конденсатор» и «Сопротивление», мультиметр, соединительные провода.

1. Краткая теория

Резонансом в электрических цепях называют явление возрастания амплитуды установившихся вынужденных колебаний при определенной частоте внешнего воздействия, близкой к собственной частоте системы. Электрические резонансы наблюдаются в колебательном контуре - цепи, состоящей из катушки индуктивности L с активным сопротивлением R и конденсатора емкости C . Для поддержания незатухающих колебаний в контур вводят источник переменного напряжения $U = U_m \cos \omega t$. Физической основой резонанса является обмен реактивной энергией между емкостными и индуктивными элементами (конденсаторами и катушками индуктивности), включенными в данную цепь. Если эта энергия проходит через источник (последовательное включение), то имеет место так называемый *резонанс напряжений*, а если не проходит через источник (параллельное включение), то наблюдается *резонанс токов*. Рассмотрим два вида резонансов в электрических цепях более подробно.

1.1. Резонанс напряжений

Явление резонанса напряжений происходит в цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки индуктивности и емкости, приведенной на рис. 12.1. Запишем для данного контура второе правило Кирхгофа для переменного тока:

$$IR + U_c = -L \frac{dI}{dt} + U_m \cos \omega t,$$

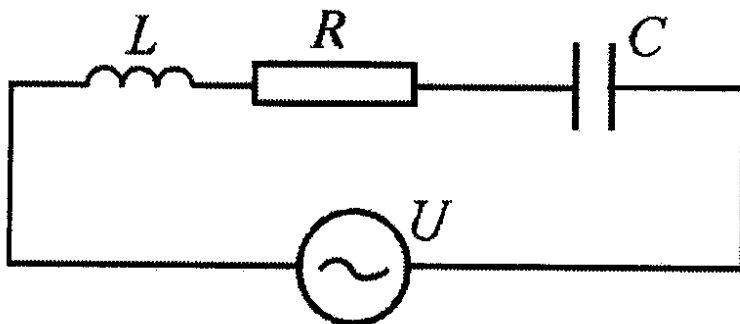


Рис.12.1. Последовательное соединение L , R , C

где IR - падение напряжения на активном сопротивлении; U_c - напряжение на конденсаторе; $-L \frac{dI}{dt}$ - э.д.с. самоиндукции в контуре; $U_m \cos \omega t$ - внешнее напряжение. Отсюда получаем дифференциальное уравнение вынужденных колебаний тока I в цепи:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I = -\omega U_m \sin \omega t.$$

Его решением при установившемся режиме является закон колебаний:

$$I(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi + \pi/2). \quad (12.1)$$

Амплитуда вынужденных колебаний тока I_m в этом уравнении зависит от параметров контура и циклической частоты внешнего напряжения ω :

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U_m}{Z}, \quad (12.2)$$

где U_m - амплитуда внешнего напряжения; Z - полное сопротивление переменному току (импеданс цепи); X - реактивное сопротивление контура:

$$X = X_L - X_C; X_L = \omega L; X_C = 1/\omega C.$$

Как показывает уравнение (12.2), можно подобрать такую частоту, чтобы $\omega L = 1/\omega C$. При этом полное сопротивление цепи будет минимальным: $Z_{min}=R$, а амплитуда тока в контуре – максимальной. Такое явление называют резонансом напряжений. Поскольку напряжения на индуктивности и емкости одинаковы ($U_L=U_C$) и колеблются в противофазе, то их сумма равна нулю, а падение напряжения U_R максимально и равно внешнему напряжению U_m .

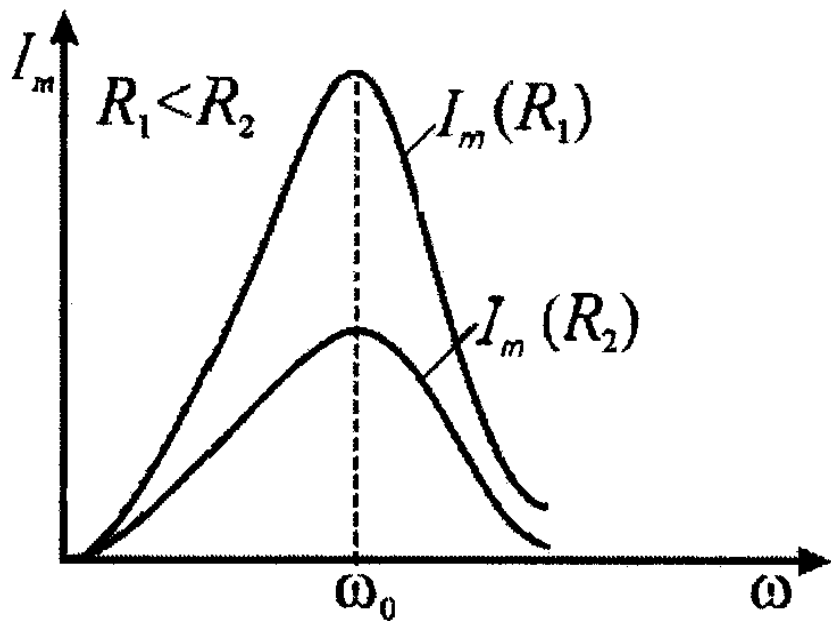


Рис. 12.2. Резонансные кривые

Зависимости $I_m=f(\omega)$ для различных R (графики резонансных кривых) приведены на рис. 12.2. Согласно условию резонанса ($X_L=X_C$) значение резонансной частоты совпадает с собственной частотой контура ω_0 :

$$\omega_{PEZ} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0. \quad (12.3)$$

Ширина резонансной кривой зависит от добротности колебательного контура:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} \cong \frac{\sqrt{L/C}}{R},$$

где λ - логарифмический декремент затухания. Чем меньше величина R , тем уже резонансный пик.

1.2. Резонанс токов

Резонанс токов наблюдается в цепи, состоящей из параллельно включенных емкости и индуктивности (рис. 12.3). Если активное сопротивление контура R равно нулю, то при резонансной частоте

$$\omega_{PE3} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

в соответствии с условием $X_L = X_C$ и законом Ома имеем:

$$I_L = \frac{U}{X_L}; I_C = \frac{U}{X_C},$$

т.е. токи в параллельных ветвях одинаковы ($I_L = I_C$), но их колебания происходят в противофазе. При этом в контуре циркулирует значительный ток, а в подводящих проводах ток I снижается до нуля. Это явление называют резонансом тока.

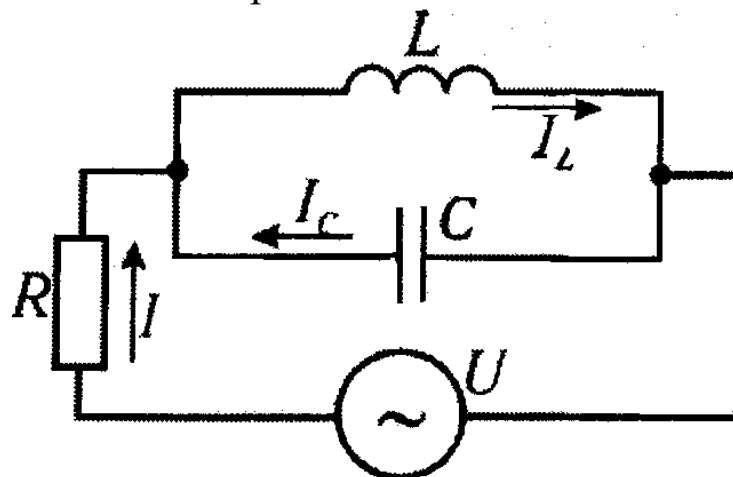


Рис.12.3. Резонанс токов

2. Метод измерений

Изменяя частоту внешнего напряжения, подаваемого на колебательный контур, и измеряя при этом ток или пропорциональное току падение напряжения на активном сопротивлении U_R , можно построить резонансную кривую $U_R = f(\omega)$.

В случае последовательного соединения емкости и индуктивности при резонансной частоте наблюдаются максимумы напряжения на сопротивлении R (U_R) и тока, а напряжение на участке LC минимально. Следовательно, по положению максимума резонансной кривой $U_R = f(\omega)$ можно определить значение

резонансной частоты. Формула (12.3) позволяет по найденной частоте ω_{PE30} определить индуктивность колебательного контура L , если известно значение емкости C_0 :

$$L = \frac{1}{C_0 \omega_{PE30}^2}. \quad (12.4)$$

Заменив конденсатор с известной емкостью на конденсатор с неизвестной емкостью C_x в контуре с той же индуктивностью L и измерив резонансную частоту ω_{PE3} , можно определить емкость конденсатора C_x по формуле:

$$C_x = C_0 \left(\frac{\omega_{PE30}}{\omega_{PE3}} \right)^2. \quad (12.5)$$

При параллельном соединении конденсатора и катушки индуктивности резонанс в цепи можно обнаружить по минимальному напряжению на сопротивлении R в цепи контура или по максимальному напряжению на участке LC . Резонансная частота также совпадает с собственной частотой колебательного контура ω_0 .

3. Описание установки

Схемы электрических цепей для исследования резонансов приведены на рис. 12.4, монтажная схема - на рис. 12.5. Рис. 12.4,а описывает включение для наблюдения резонанса напряжений, рис.12.4,б – резонанса токов.

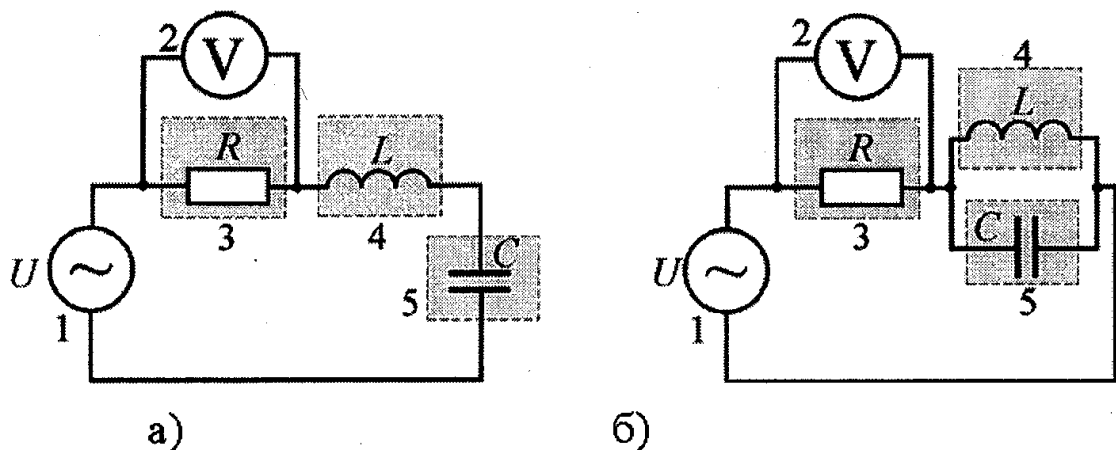


Рис.12.4. Электрические схемы включений

На схемах обозначены:

- 1 - генератор сигналов специальной формы;
- 2 - мультиметр (режим $V \sim 20\text{ В}$, входы COM, $V\Omega$);
- 3 - миниблок «Сопротивление» сопротивлением $R=470\text{ Ом}$;
- 4 - миниблок «Катушка» с индуктивностью L_X ;
- 5 - миниблок «Конденсатор» емкостью C или C_X .

Падение напряжения U_R на сопротивлении R измеряют мультиметром 2. В качестве источника внешнего переменного напряжения используют генератор напряжений специальной формы.

4. Порядок выполнения работы

1. Соберите по монтажной схеме, приведенной на рис. 12.5 электрическую цепь (см. рис. 12.4,а), состоящую из последовательно соединенных конденсатора известной емкости C (ее значение внесите в таблицу) и неизвестной индуктивности L_X .
2. Включите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров. Нажмите кнопку «Исходная установка». Кнопками установки частоты «0.2 - 20 кГц» установите частоту $\nu_I=0.20\text{ кГц}$.

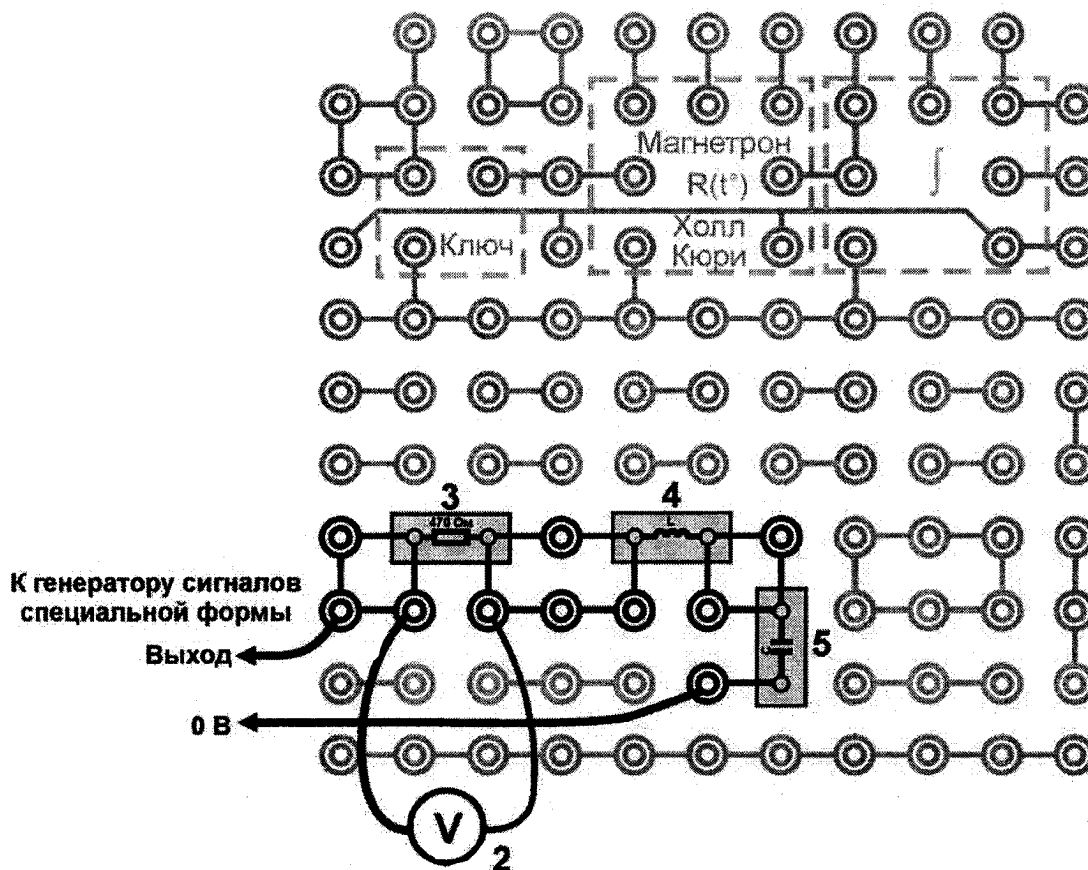


Рис.12.5. Монтажная схема для резонанса напряжений

3. Соедините незадействованный мультиметр (режим $V \sim 20V$, входы $COM, V\Omega$) с гнездами «Выход генератора» и кнопками установки уровня выхода «0-15В» установите напряжение на выходе генератора 2 В.

4. Увеличивая частоту ν выходного сигнала генератора, найти максимальное напряжение на активном сопротивлении U_R и соответствующую ему частоту ν_{PE3} . Продолжая увеличивать частоту ν , найдите такое ее значение, когда напряжение будет примерно в 3-4 раза меньше максимального. Отметьте соответствующую частоту ν_2 .

5. Разделите частотный интервал $\nu_2 - \nu_{PE3} - \nu_1$ на 15 значений и для каждой частоты ν измерьте соответствующее напряжение U_R . Вдали от резонанса измерения можно производить с большим интервалом по частоте. Вблизи резонанса в области крутого подъема и спада кривой интервал следует уменьшить. Результаты измерений запишите в таблицу.

6. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров. Замените конденсатор C в колебательном контуре на C_X и повторите измерения по пп. 2-5 для получения еще одной резонансной кривой.

7. Подключите мультиметр параллельно участку цепи $L_X C_X$. Изменяя частоту генератора в том же интервале, наблюдайте, что вблизи ν_{PE3} , для которой U_R максимально, значения напряжения U_{LC} минимально.

8. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров. Соберите электрическую цепь (см. рис. 12.4,б), состоящую из конденсатора C (ее значение внесите в таблицу) и неизвестной индуктивности L_X . Выполните п.п. 2-5 и проведите измерение U_R в том же частотном диапазоне, что и при последовательном соединении. Результаты измерений запишите в таблицу.

9. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров.

10. По данным таблицы постройте на одном графике 3 резонансные кривые $U_R = f(\nu)$. Отметьте значения резонансных частот контура по положению максимума или минимума кривых.

11. По величине резонансной частоты ν_{PE3} для контура с известной емкостью C найдите по формуле (12.4) индуктивность катушки L_X .

	Последовательное соединение L_x и C $R=470\text{ Ом}$, $L_x=\dots\text{ мГн}$				Параллельное соединен L и C	
	$C = \dots\text{ мкФ}$, $\nu_{рез} = ?\text{ кГц}$		$C_x = ?$ $\nu_{хрез} = ?\text{ кГц}$		$C = \dots\text{ мкФ}$, $L_x = \dots\text{ мГн}$	
№	ν , Гц	U_R , В	ν , Гц	U_R , В	ν , Гц	U_R , В
1						
...						
15						

12. По величине резонансной частоты для случая неизвестной емкости конденсатора по формуле (12.5) рассчитайте неизвестную емкость C_x . Результаты вычислений запишите в таблицу.

13. Проведите анализ полученных данных.

Контрольные вопросы

1. Запишите закон изменения тока в цепи при вынужденных колебаниях.
2. При каком условии наблюдается резонанс в колебательном контуре?
3. Какова величина полного сопротивления контура и тока в нем в случае резонанса напряжений (последовательного резонанса)?
4. Что характерно для величин тока I и напряжений U_{LC} , U_R при резонансе напряжений в колебательном контуре?
5. Чем объясняется, что при резонансе напряжений ток в контуре максимальный, а при резонансе токов в подводящих к колебательному контуру проводах течет небольшой ток?
6. Как явление резонанса может быть использовано для определения неизвестных величин индуктивности L или емкости C ?

Литература

1. Детлаф А.А. Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа. 1989.
2. Калашиников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1985.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3. Электричество. М.: Физматлит, 2004.

Лабораторная работа № 13

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

Цель работы: изучить распределение магнитного поля на оси соленоида, определить зависимость индукции от силы тока, протекающего по соленоиду.

Приборы и принадлежности: источник переменного тока, милливольтметр ВЗ-38, соленоид, соединительные провода, измерительная катушка на линейке.

1. Краткая теория

1.1. Индукция магнитного поля

Из опыта известно, что проводники с током взаимодействуют между собой. Взаимодействие токов осуществляется через поле, называемое магнитным. Это взаимодействие складывается из двух процессов: движущиеся заряды первого проводника создают вокруг себя магнитное поле, которое, в свою очередь, действует на движущиеся заряды второго проводника. Это поле векторное и его принято характеризовать величиной, называемой магнитной индукцией и обозначаемой \mathbf{B} . В системе СИ магнитная индукция измеряется в *Теслах* (Тл). Важным проявлением магнитного поля является то, что если магнитное поле, пронизывающее некоторый контур изменяется по величине, то в контуре наводится э.д.с. индукции ε , величина которой определяется законом электромагнитной индукции:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (13.1)$$

где Φ - магнитный поток, пронизывающий контур:

$$\Phi = \int \mathbf{B} d\mathbf{S}. \quad (13.2)$$

В данной работе это явление положено в основу измерения величины вектора магнитной индукции \mathbf{B} соленоида.

1.2. Магнитное поле на оси соленоида

Соленоидом называется цилиндрическая проволочная катушка, схематично изображенная на рис.13.1. Предполагается, что проволока распределена плотно и равномерно, так что число витков обмотки на единицу длины вдоль цилиндра является величиной постоянной и обозначается n . Таким образом, ток идет по спирали, но если витков много, они расположены плотно друг к другу и шаг спирали мал по сравнению с диаметром соленоида, мы можем пренебречь составляющей тока вдоль оси и рассматривать соленоид как совокупность колец с током, ориентированных строго перпендикулярно оси соленоида.

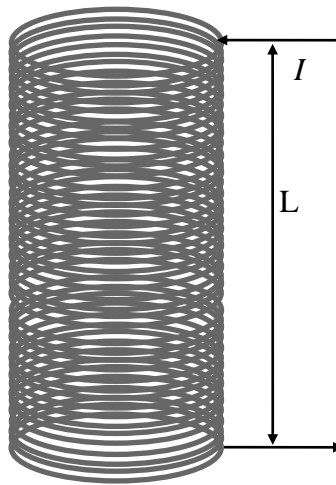


Рис.13.1. Изображение соленоида

Вклад $d\mathbf{B}$ в величину магнитной индукции \mathbf{B} от каждого малого элемента провода $d\mathbf{l}$ определяется уравнением Био-Савара-Лапласа:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{r^3}, \quad (13.3)$$

где I - сила тока, протекающего через элемент провода $d\mathbf{l}$, r - расстояние от $d\mathbf{l}$ до измеряемой точки.

Используя уравнение (13.3), вычислим сначала поле на оси одного кольца с током. Каждый элемент кольца $d\mathbf{l}$ создает свое магнитное поле, вектор магнитной индукции которого $d\mathbf{B}$ (рис. 13.2), перпендикулярен к \mathbf{r} .

Поскольку, в силу симметрии, полное поле на оси должно быть направлено вдоль оси, мы должны рассмотреть только z -компоненту вектора $d\mathbf{B}$:

$$dB_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \cos\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \frac{b}{r}. \quad (13.4)$$

После интегрирования по всему витку получим:

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi b^2 I}{r^3} = \frac{\mu_0}{2} \frac{b^2 I}{(b^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (13.5)$$

где b - радиус соленоида.

Используя полученный результат, рассчитаем поле внутри соленоида. Для этого рассмотрим вклад в индукцию элемента соленоида, расположенного между радиусами, проведенными из точки z и

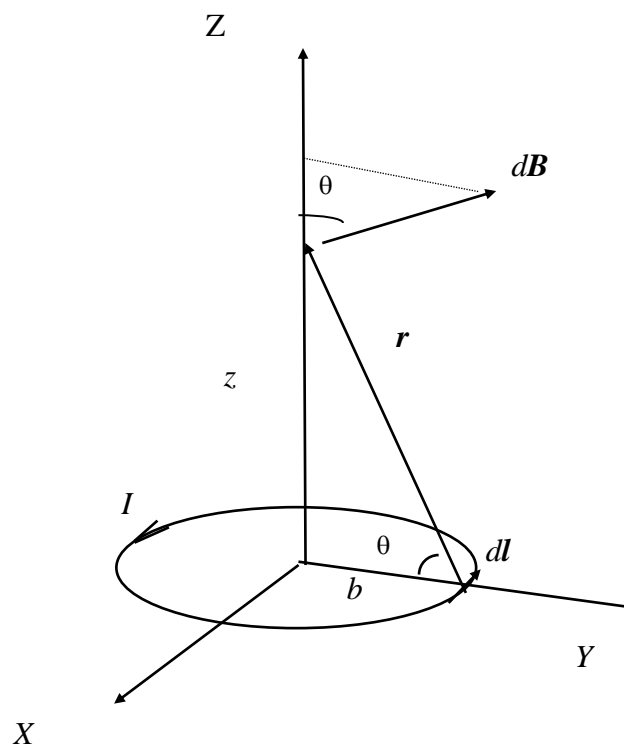


Рис.13.2. К выводу формулы магнитного поля на оси витка с током

образующими с осью z углы от θ до $\theta + d\theta$ (рис.13.3). Длина этого участка соленоида будет равна $r d\theta / \sin\theta$. Этот вклад эквивалентен

вкладу кольца с током, равным $dI = Inr d\theta / \sin\theta$. Поскольку $r = b / \sin\theta$, это кольцо даст следующий вклад в поле на оси:

$$dB_z = \frac{\mu_0 b^2 Inr d\theta}{2 r^3 \sin\theta} = \frac{\mu_0 In}{2} \sin\theta d\theta. \quad (13.6)$$

Интегрируя в пределах от θ_1 до θ_2 , получим:

$$B_z = \frac{\mu_0 In}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta = \frac{\mu_0 In}{2} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2). \quad (13.7)$$

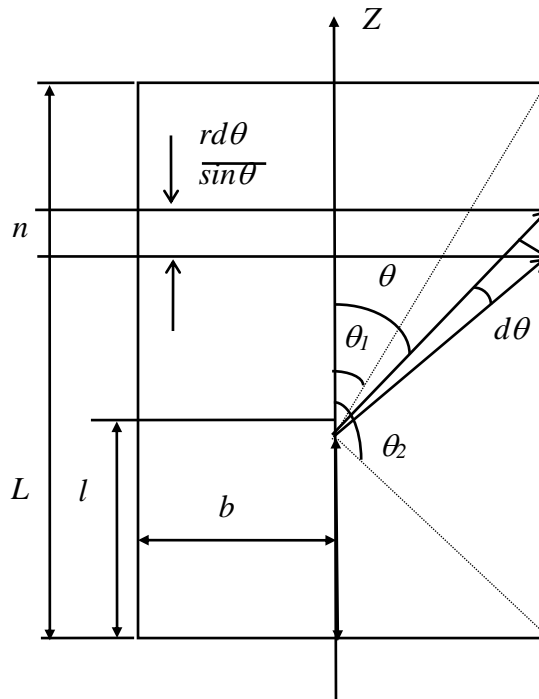


Рис.13.3. К выводу формулы магнитного поля на оси соленоида

Выражая θ_1 и θ_2 через L , b , и l , получим:

$$B = \frac{\mu_0}{2} In \left(\frac{L-l}{\sqrt{b^2 + (L-l)^2}} + \frac{l}{\sqrt{b^2 + l^2}} \right). \quad (13.8)$$

Заметим, что согласно (13.8) \mathbf{B} зависит от I по линейному закону. Поэтому, если через соленоид протекает переменный ток, то эффективное значение магнитной индукции и эффективное значение силы тока будут связаны той же формулой (13.8), что и для постоянного тока.

2. Описание экспериментальной установки

Выполнение лабораторной работы включает исследование индукции магнитного поля на оси соленоида в зависимости от места расположения в соленоиде и от силы протекающего через соленоид тока. Схема установки приведена на рис.13.5. Через соленоид пропускается переменный ток с частотой 50 Гц.

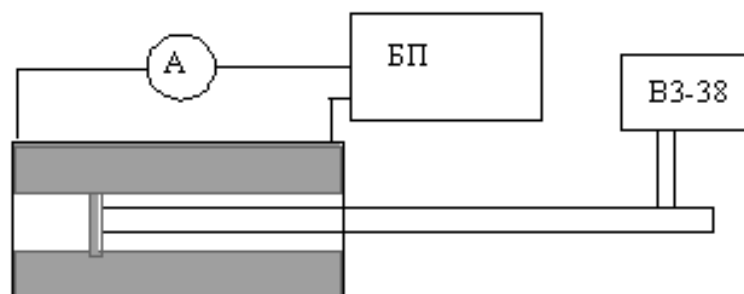


Рис.13.5. Экспериментальная установка для изучения магнитного поля на оси соленоида

Для определения индукции магнитного поля в соленоид помещается измерительная катушка. Измерительная катушка, закрепленная на специальной линейке, способна перемещаться внутри соленоида. Переменный ток, протекающий через обмотку соленоида, создает внутри него переменное магнитное поле, которое приводит к возникновению в измерительной катушке э.д.с. индукции. Измеряя с помощью вольтметра ВЗ-38 эффективное значение напряжения U , наводимого в измерительной катушке, и зная ее параметры, можно вычислить эффективное значение магнитной индукции в месте ее расположения по формуле:

$$B = \frac{U}{\omega N_K S_K}, \quad (13.9)$$

где $\omega = 2 \pi f$ ($f = 50$ Гц), N_K и S_K - соответственно число и площадь витков измерительной катушки. Для данной установки произведение $N_K \cdot S_K = 0,385$ м².

3. Порядок выполнения работы

1. Собрать экспериментальную установку в соответствии со схемой, изображенной на рис. 13.5.
2. Изучить зависимость величины магнитной индукции B от местоположения в соленоиде, исследуя область от края соленоида до его середины. l - расстояние от исследуемой точки до конца

соленоида. Установить ток в соленоиде 1 А и провести измерения индукции через каждые 10 мм. В данной установке $l = 0$, если измерительная катушка вдвинута внутрь цилиндра на 6 см. Не путать показания линейки и длины l . Построить график $B=f(l)$.

3. Пользуясь формулой (13.8), найти теоретическую зависимость магнитной индукции внутри соленоида от расстояния вдоль его оси и построить ее на том же графике. Плотность намотки соленоида n находится по формуле $n = N/L$. Для данного соленоида число витков $N = 270$, длина $L = 20,5$ см. Радиус соленоида $b = 3,5$ см.

4. Для изучения зависимости магнитной индукции внутри соленоида от величины тока в обмотке надо установить измерительную катушку в середине соленоида и, изменяя ток от 0 до 3 А, определять значение магнитной индукции. Построить график зависимости $B_{\text{экспер.}} = f(I)$.

5. Установить измерительную катушку на край соленоида, пропустить ток 1 А. Ввести в соленоид ферромагнитный сердечник. Измерить величину магнитной индукции на выходе из соленоида при наличии и отсутствии сердечника.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятия индукции и напряженности магнитного поля, назовите единицы измерения этих величин.
2. Нарисуйте качественно силовые линии магнитного поля прямолинейного тока, круглого витка с током, длинного и короткого соленоида.
3. Объясните расхождение теоретической и экспериментальной зависимостей магнитной индукции от расстояния вдоль оси соленоида.
4. Расскажите, как измеряется индукция магнитного поля в данном эксперименте.

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Буравихин В.А., Шелковников В.Н., Каробанов В.П. Практикум по магнетизму. М.: Высшая школа, 1979.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2, М.: Высшая школа, 2000.

Лабораторная работа № 14

СНЯТИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА И ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы: снятие основной кривой намагничивания ферромагнетика, построение и анализ зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

Приборы и принадлежности: стенд ЮУрГУ, миниблоки «Ферромагнетик», «Сопротивление», генератор сигналов специальной формы, мультиметры, провода.

1. Краткая теория

Всякое вещество является магнетиком, то есть способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). Если магнетик поместить в однородное магнитное поле в вакууме с индукцией B_0 , то магнитное поле внутри магнетика изменится. Это объясняется тем, что в состоянии намагничивания магнетик даёт добавочную индукцию B^* , которая векторно складывается с первоначальной индукцией B_0 . Векторная сумма

$$B = B_0 + B^* \quad (14.1)$$

называется вектором магнитной индукции внутри магнетика. Вещества, для которых добавка B^* невелика и совпадает по направлению с B_0 , называются парамагнетиками. Внутри них магнитное поле незначительно усиливается. Магнитный момент атомов у парамагнитных веществ отличен от нуля. Вещества, для которых B^* и B_0 противоположны по направлению, называются диамагнетиками. Диамагнетизм обнаруживают только те вещества, у которых атомы не обладают магнитным моментом. Магнитное поле внутри них ослабляется. Ферромагнетиками называются вещества, у которых величина B^* совпадает по направлению с B_0 и в сотни или тысячи раз превышает ее величину за счет спонтанной намагниченности.

Магнитная индукция B связана с напряжённостью магнитного поля H соотношением:

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (14.2)$$

где μ_0 - коэффициент пропорциональности, называемый магнитной постоянной. Величина μ называется магнитной проницаемостью среды. В системе единиц СИ индукция измеряется в Тесла (Тл), а напряжённость магнитного поля в $\frac{A}{m}$. Для диа- и парамагнетиков величина магнитной проницаемости имеет малую величину и не зависит от величины магнитного поля. Для парамагнетиков (алюминий, платина и др.) $\mu > 1$ и находится в интервале 10^{-4} - 10^{-7} , для диамагнетиков (медь, поваренная соль и др.) $\mu < 1$ и варьируется в пределах 10^{-6} - 10^{-8} . Ферромагнетики (железо, никель, кобальт, их сплавы, некоторые редкоземельные элементы при низких температурах) характеризуются большими положительными значениями μ , соответствующими интервалу 10^3 - 10^6 . Характерной чертой ферромагнетиков является сложная нелинейная зависимость $\mu(H)$, которая и исследуется в данной работе.

1.1. Природа ферромагнетизма

Основы теории ферромагнетизма были созданы Я.И. Френкелем и В. Гейзенбергом в 1928 г. Из опытов по изучению магнитомеханических явлений следует, что ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные (спиновые) магнитные моменты электронов. При определённых условиях в кристаллах могут возникать силы, которые заставляют магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу. В результате возникают области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания, которые называют доменами. В пределах каждого домена ферромагнетик спонтанно намагничён до насыщения и обладает определённым магнитным моментом. Направления этих моментов для разных доменов различны, так что в отсутствие внешнего поля суммарный момент всего тела равен нулю. У ряда материалов домены имеют размеры порядка 1-10 мкм.

При действии внешнего магнитного поля имеет место поворот магнитных моментов доменов в направлении поля. При этом

моменты электронов в пределах домена поворачиваются одновременно, без нарушения их строгой параллельности друг другу.

Для каждого ферромагнетика имеется определённая температура T_c , при которой области спонтанного намагничивания распадаются и вещество утрачивает ферромагнитные свойства. Эта температура называется точкой Кюри. Для железа она равна 768°C , для никеля 365°C . При температуре выше точки Кюри ферромагнетик становится обычным парамагнетиком. При охлаждении ферромагнетика ниже точки Кюри в нём снова возникают домены.

Для ферромагнетиков наблюдается явление гистерезиса, заключающееся в том, что магнитная индукция в объеме материала зависит не только от напряженности поля в данный момент, но и от того, каково было значение напряженности магнитного поля ранее. Если ненамагниченный ферромагнетик поместить в среду, магнитное поле в которой постепенно будет увеличиваться, начиная от нуля, то зависимость $B(H)$ (кривая намагничивания) выразится участком OA на рис. 14.1. Ферромагнетику присущи свойства остаточного намагничивания, поэтому при уменьшении магнитного поля до нуля, кривая намагничивания не совпадает с AO , а пойдёт по кривой AC . Величина OC называется остаточной индукцией и является характеристикой ферромагнетика.

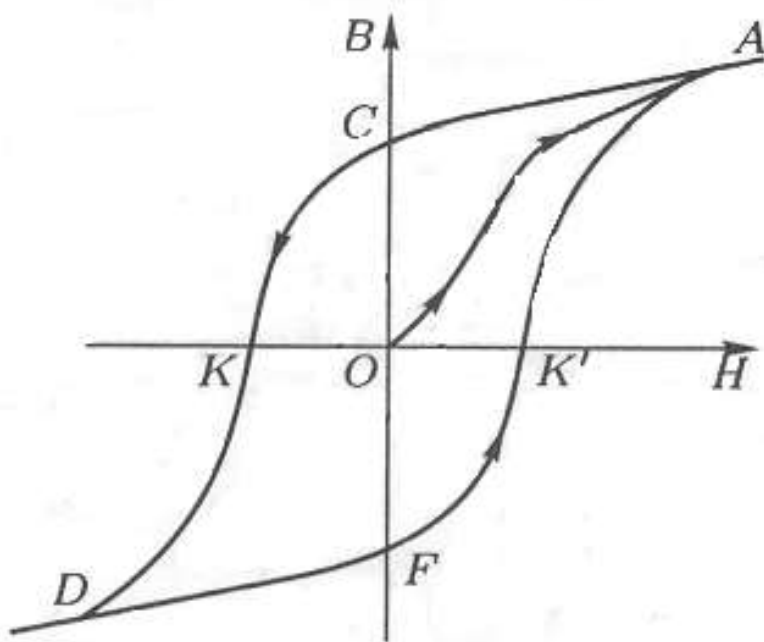


Рис.14.1. Петля гистерезиса ферромагнетика

Для того, чтобы размагнитить ферромагнетик, необходимо изменить направление и величину внешнего магнитного поля. Величина ОК называется коэрцитивной силой и является одной из важнейших характеристик ферромагнетика. Если коэрцитивная сила велика, ферромагнетик называется жёстким. Для него характерна широкая петля гистерезиса. Ферромагнетик с малой коэрцитивной силой (и соответственно узкой петлёй гистерезиса) называется мягким. В зависимости от назначения берутся ферромагнетики с той или иной характеристикой. Так, для постоянных магнитов используются жёсткие ферромагнетики, а для сердечников трансформаторов – мягкие. Как видно из рис.14.1, гистерезис приводит к тому, что намагничивание ферромагнетика не является однозначной функцией внешнего магнитного поля и зависит от «магнитной» предыстории образца.

В связи с неоднозначностью зависимости B от H понятие магнитной проницаемости применяется лишь к основной кривой намагничивания (кривая ОА на рис. 14.1). Магнитная проницаемость ферромагнетиков μ является функцией намагничивающего поля H . Эта зависимость показана на рис.14.2. Объяснение результатов, показанных на рис. 14.1 и 14.2, студенты должны сделать самостоятельно.

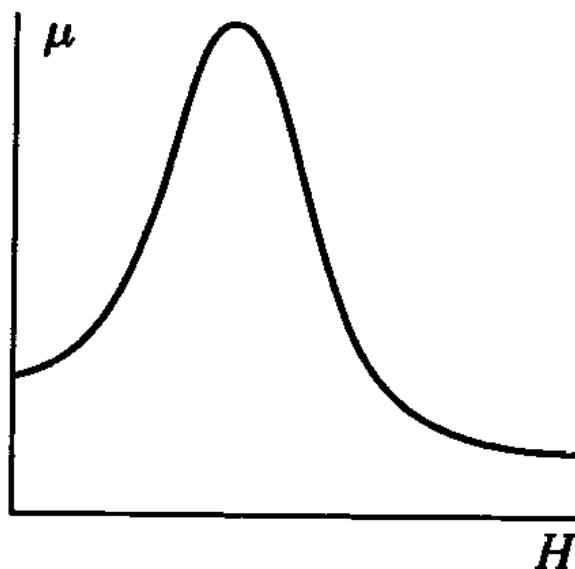


Рис.14.2. Зависимость $\mu(H)$ для ферромагнетика

2. Метод измерений

В данной работе измерение магнитной проницаемости материала сердечника μ , основано на измерениях индуктивности L катушки с сердечником и ее геометрических параметров. Известно, что индуктивность катушки на тороидальном сердечнике:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \quad (14.3)$$

где N - число витков соленоида; S - площадь поперечного сечения сердечника соленоида; l - длина средней осевой линии сердечника.

Индуктивное сопротивление соленоида переменному току X_L :

$$X_L = \omega L, \quad (14.4)$$

где ω - циклическая частота переменного тока. Для определения индуктивности достаточно измерить индуктивное сопротивление катушки переменному току известной частоты ω . Полное сопротивление катушки Z переменному току:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (14.5)$$

а так как обычно $R \ll X_L$, то величиной активного сопротивления катушки R можно пренебречь по сравнению с индуктивным сопротивлением переменному току частоты 200 Гц

Закон Ома позволяет определить величину Z путем измерений тока I и напряжения U на участке цепи, содержащем соленоид:

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (14.6)$$

Расчетная формула для определения магнитной проницаемости, полученная с использованием вышеприведенных выражений, имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{Ll}{\mu_0 N^2 S} = \frac{l}{\omega\mu_0 N^2 S} \frac{U}{I} = K \frac{U}{I}, \quad (14.7)$$

где $K = \frac{l}{\omega\mu_0 N^2 S}$ - постоянная установки.

Напряженность магнитного поля, которое создается в кольцевом сердечнике при протекании по обмотке тока I , можно рассчитать по формуле:

$$H = \frac{NI}{l} \quad (14.8)$$

Таким образом, каждому значению тока I соответствуют определенная напряженность магнитного поля H (ф.(14.8)), магнитная проницаемость сердечника μ (ф.(14.7)) и индукция магнитного поля B (ф.(14.2)).

Определяя величины H , μ и B при различных токах, можно экспериментально установить следующие зависимости:

- а) $B = f(H)$ - основная кривая намагничивания ферромагнетика;
- б) $\mu = f(H)$ - зависимость магнитной проницаемости сердечника от напряженности магнитного поля.

2. Описание установки

Электрическая схема установки показана на рис. 14.3, монтажная - на рис. 14.4.

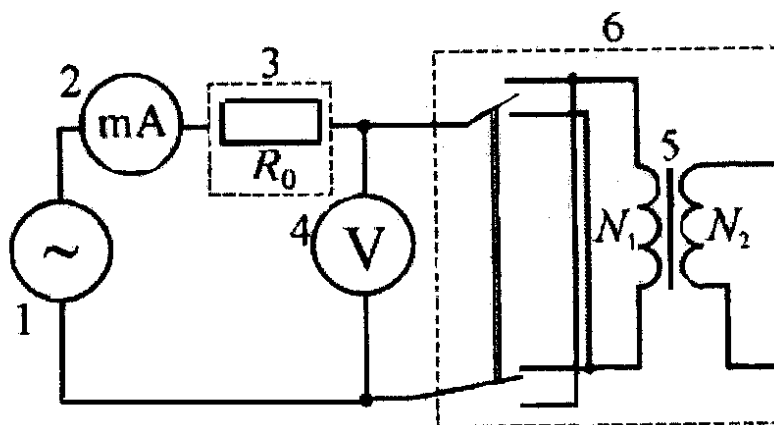


Рис.14.3. Электрическая схема установки

1 - генератор сигналов специальной формы, 2 - мультиметр (режим $A \sim 200 \text{ mA}$, входы COM, A), 3 - блок «Сопротивление», $R_0 = 100 \text{ Ом}$; 4 - мультиметр (режим $V \sim 2 \text{ V}$, входы COM, $V\Omega$), 5 - кольцевой сердечник с обмотками N_1 и N_2 ; 6 - блок «Ферромагнетик».

На кольцевой сердечник 5, изготовленный из исследуемого ферромагнитного материала, намотаны N_1 проволочных витков. Эта обмотка, по которой пропускают переменный ток частоты 200 Гц служит для намагничивания магнетика и по ее параметрам определяют напряженность H намагничивающего поля. Генератор сигналов специальной формы 1 позволяет изменять напряжение U , а следовательно, и ток I в обмотке тороида. Эти величины измеряют соответственно вольтметром 4 и миллиамперметром 2.

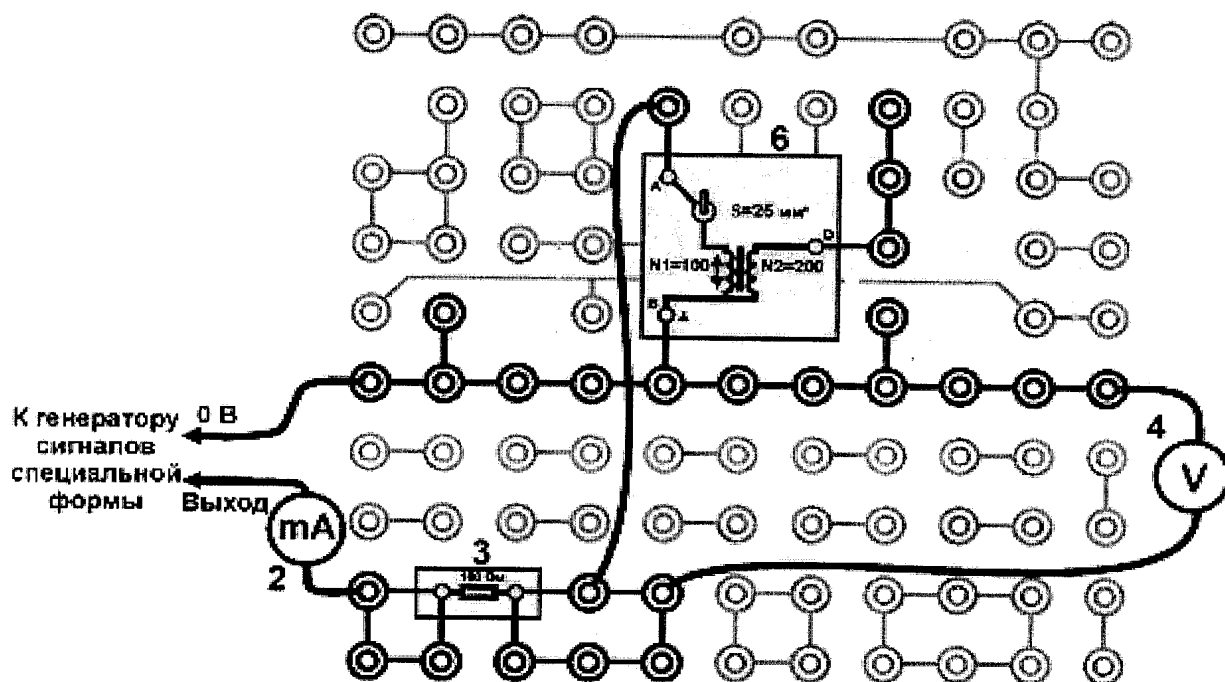


Рис. 14.4. Монтажная схема установки

3. Порядок выполнения работы

1. Запишите в таблицу параметры установки и исследуемого образца: N - число витков обмотки тороида; l - длина средней осевой линии сердечника; S - площадь сечения сердечника.
2. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис.14.4.
3. Включите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжений и блока мультиметров. Нажмите кнопку «Исходная установка».
4. Кнопками установки частоты «0.2-20 кГц» установите 200 Гц.
5. Кнопками установки уровня «0 - 15 В» генератора сигналов специальной формы установите в обмотке тороида ток $I \approx 5$ мА. Запишите в таблицу показания тока и напряжения.
6. Изменяя ток в обмотке тороида с шагом «5 мА до 55 мА, измерьте напряжения. Запишите в таблицу показания тока и напряжения.
7. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжений и блока мультиметров.
8. Вычислите постоянную установки K .
9. Для каждого значения тока рассчитайте величины H , μ и B . Результаты расчетов запишите в таблицу.

Параметры установки	I , мА	U , В	H , А/м	μ	B , мТл
$N=100$ $l=37,7$ мм $S=25$ мм ² $\omega = \dots$	5				
	55				

10. По данным таблицы постройте основную кривую намагничивания $B=f(H)$ и график зависимости $\mu=f(H)$.

11. В выводах по работе отразите особенности формы опытных кривых.

Контрольные вопросы

1. Назовите характерные свойства ферромагнетиков и особенности их намагничивания.
2. Опишите изменения доменной структуры ферромагнетика в процессе его намагничивания (по мере роста напряженности поля).
3. Какая зависимость составляет основу метода определения магнитной проницаемости сердечника?
4. Какие измеряемые величины входят в расчетную формулу для магнитной проницаемости сердечника?
5. Какие формулы используют для определения следующих величин:
 - а) напряженности H магнитного поля в сердечнике
 - б) магнитной индукции B
 - в) магнитной проницаемости материала сердечника?

Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. Т.2. М.: Высшая школа, 1989.
2. Калашников С.Г. Электричество. М: Наука, 1985.
3. Шашов В.В., Кравченко Н.С. Снятие кривой намагничивания. Методические указания. Томск: изд-во ТПУ, 2004.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3. Электричество. М.: Физматлит, 2004.

Лабораторная работа №15

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ. ВЫПРЯМЛЯЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ p - n ПЕРЕХОДА

Цель работы: изучение физических процессов в контакте полупроводников электронного и дырочного типа проводимости, измерение и анализ вольтамперной характеристики p - n перехода.

Приборы и принадлежности: лабораторный макет, блок питания постоянного тока, цифровой измеритель тока, полупроводниковый диод, соединительные провода.

1. Краткая теория

В полупроводниковых материалах валентные электроны сильно связаны с ядрами атомов и при создании кристаллической решетки участвуют в образовании химических связей. Рассмотрим условия появления носителей заряда в полупроводниках на примере классического полупроводника - кремния.

1.1. Собственный полупроводник

Рассмотрим кристалл чистого кремния, не содержащего никаких примесей. Каждый атом кремния имеет 4 валентных электрона. При образовании кристаллической решетки валентные

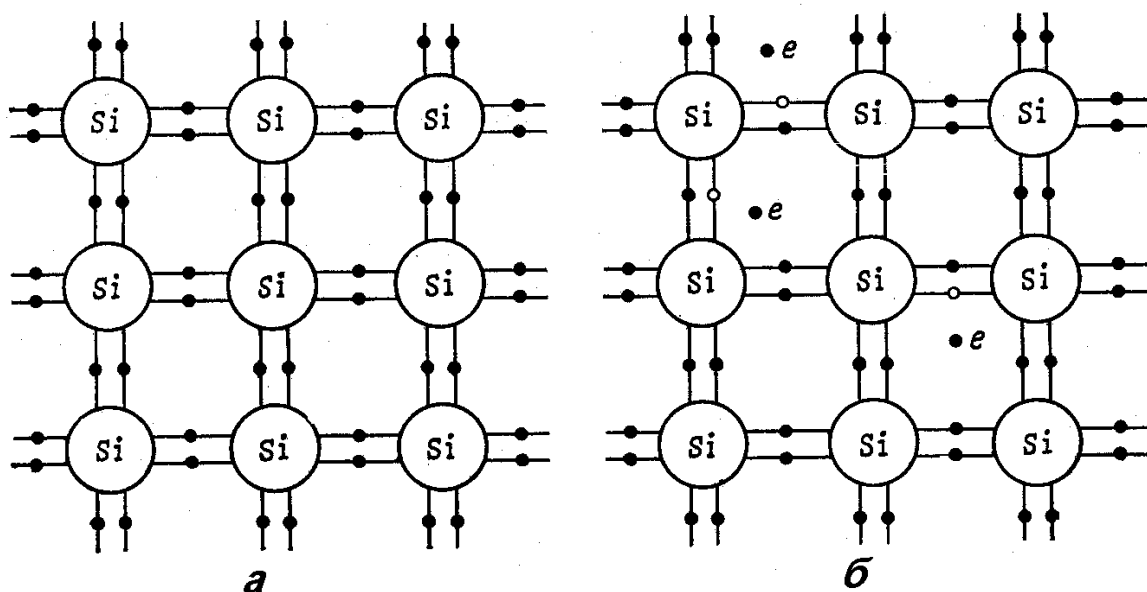


Рис.15.1. Двумерное представления расположения связей в кремнии при низкой (а) и высокой (б) температурах

электроны, представленные на рис.15.1,а в виде черных точек, обеспечивают ковалентную связь. При температурах, близких к абсолютному нулю, все электроны находятся в связанном состоянии, и свободных носителей заряда в полупроводнике нет. При подведении энергии (например, за счет теплового нагрева) появляется возможность разрыва ковалентной связи, в результате чего электрон становится свободным (рис.15.1,б). При уходе электрона ковалентная связь оказывается незавершенной (светлый кружок на рисунке). Эта связь обладает положительным зарядом, равным по модулю заряду электрона. Вакантное место в ковалентной связи называется дыркой. В целом кристалл остается электронейтральным, поскольку число свободных электронов равно числу дырок. Полупроводник, у которого в результате разрыва валентных связей образуется равное число электронов n и дырок p , называется *собственным* ($n=p$). Электроны и дырки способны участвовать в процессе переноса носителей заряда, проводимость полупроводника в этом случае называется *собственной*.

1.2. Примесной полупроводник

Изменить концентрацию электронов или дырок в полупроводнике можно его легированием (введением примесей). Допустим, что часть атомов кремния замещена атомами пятивалентного мышьяка (рис.15.2,а).

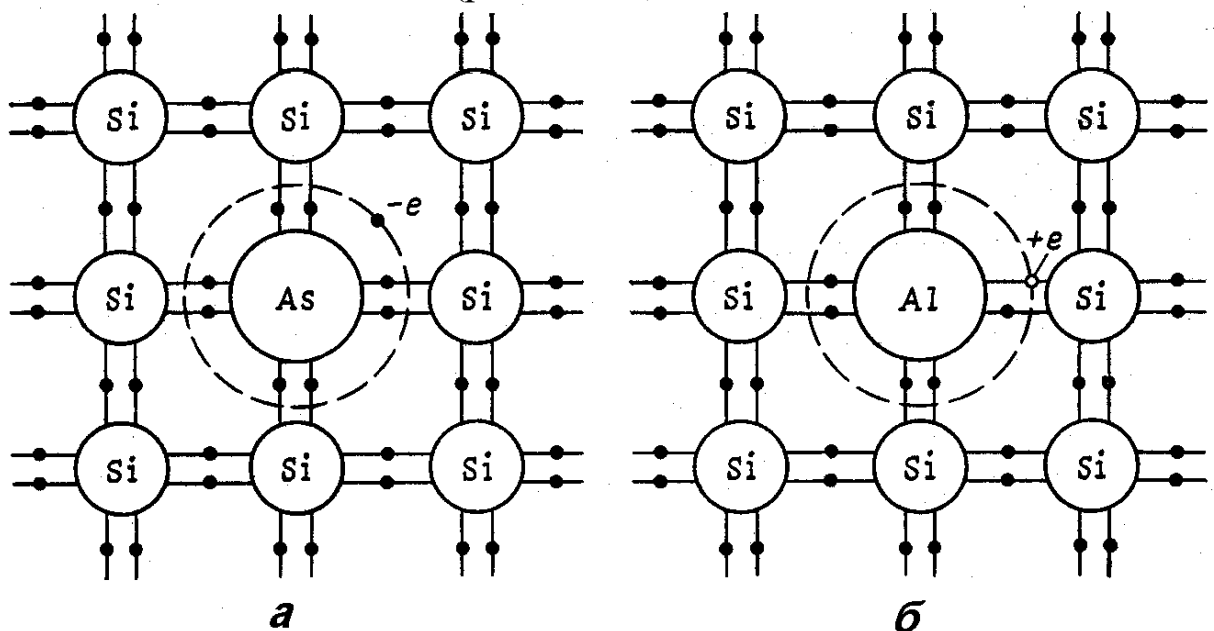


Рис. 15.2. Схематическое изображение кристаллической решетки примесного полупроводника n- (а) и p-типа (б) проводимости

Четыре валентных электрона атома мышьяка участвуют в образовании ковалентной связи, пятый электрон оказывается «лишним». Он слабо связан с атомами мышьяка. При низких температурах он локализован около своего родного атома, но при повышении температуры способен стать свободным. В этом случае каждый введенный атом мышьяка вносит в кристаллическую решетку свободный электрон. Концентрация электронов будет определяться концентрацией введенной примеси. В таком полупроводнике выполняется условие

$$n \gg p. \quad (15.1)$$

В силу доминирующей роли электронов такие полупроводники называются полупроводниками *n*-типа проводимости или полупроводниками с электронной проводимостью.

Введем в кристаллическую решетку кремния атомы элемента 3-й группы периодической системы Менделеева (например, алюминий). Поскольку валентность алюминия равна трем, то одна связь атома кремния будет незавершенной (рис. 15.2,б). Следовательно, каждый введенный в кремний элемент 3-й группы будет вносить один положительный заряд – дырку. В таком материале будет выполняться условие

$$p \gg n \quad (15.2)$$

и электропроводность кристалла будет дырочной. Рассмотренные полупроводники называются полупроводниками *p*-типа проводимости.

Важно отметить, что в примесном полупроводнике существуют основные и неосновные носители заряда. В материале *n*-типа основными носителями являются электроны, неосновными – дырки. В полупроводниках *p*-типа основными носителями являются дырки, неосновными – электроны.

1.3. Выпрямляющие свойства p-n перехода

Контакт двух полупроводников с разным типом проводимости обладает выпрямляющим действием. Это означает, что сопротивление такого контакта зависит от направления тока: в одном направлении оно велико, в другом – мало. Рассмотрим выпрямляющее действие *p-n* перехода. Приведем в плотный контакт два материала с дырочной и электронной проводимостью (рис.15.3). Различие в концентрациях одностипных носителей заряда приведет к возникновению диффузионного потока электронов из *n*-

области в p -область, а дырок из p -области в n . При этом приконтактная область дырочного полупроводника будет заряжаться отрицательно, а электронного – положительно. Возникает двойной электрический слой разделенных зарядов, которому будет соответствовать внутреннее контактное электрическое поле, направленное от плюса к минусу. Иными словами, на границе p и n областей возникает внутренняя контактная разность потенциалов U_K , затрудняющая процессы перехода основных носителей заряда.

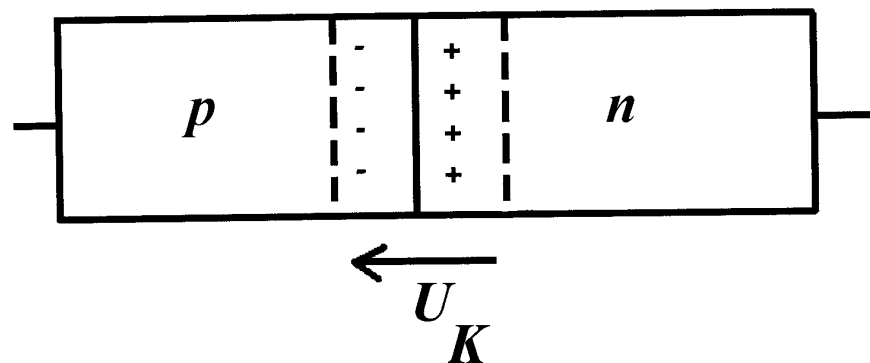


Рис.15.3. Образование контактной разности потенциалов

Подадим на p - n переход внешнее напряжение. Если положительный потенциал приходится на p -область, а отрицательный на n - область (рис.15.4), то такое включение называется прямым и ему соответствует протекание большого тока через p - n переход.

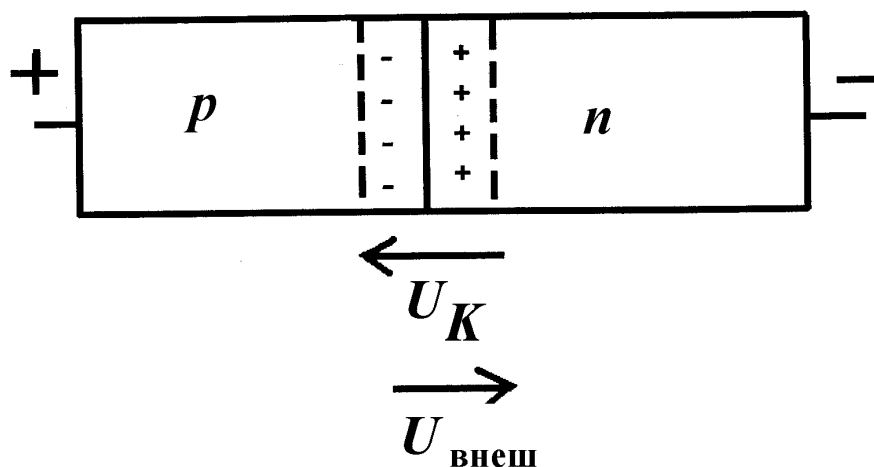


Рис.15.4. P - n переход при прямом смещении

Это обусловлено тем, что внешнее электрическое поле будет ослаблять действие внутреннего электрического поля. Величина потенциального барьера для основных носителей заряда по обе стороны от p - n перехода понизится, уменьшится ширина двойного электрического слоя, и, увлекаемые внешним электрическим полем, электроны n -области и дырки p -области будут двигаться через границу через невысокий потенциальный барьер. Таким образом, протекание большого прямого тока обусловлено движением основных носителей заряда.

Если сменить направление внешнего электрического поля, подавая положительный потенциал на n -область, а отрицательный на p (рис.15.5), то такое смещение называется обратным и характеризуется протеканием малых токов.

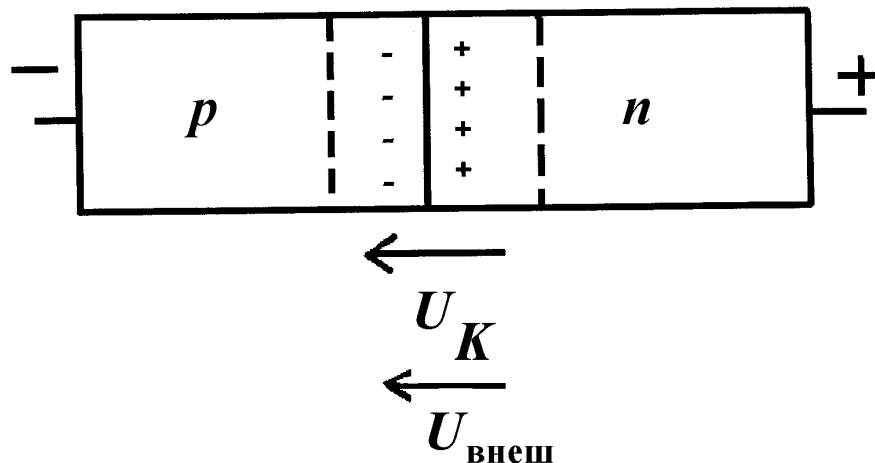


Рис.15.5. Обратное включение p - n перехода

С физической точки зрения это связано с тем, что внешнее электрическое поле будет усиливать внутреннее контактное и барьер для основных носителей заряда еще больше увеличится. Основные носители заряда не могут проникать через границу и участвовать в образовании тока. Однако надо вспомнить, что в каждой области есть небольшое количество неосновных носителей заряда. Для них данная ситуация оказывается благоприятной и, увлекаемые внешним полем и не имея потенциального барьера на границе, они создают небольшой по величине электрический ток. Таким образом, протекание обратного тока через p - n переход обусловлено движением неосновных носителей заряда.

Зависимость силы тока I от внешнего напряжения U , называемая вольтамперной характеристикой (ВАХ), для p - n перехода описывается уравнением:

$$I = I_s \left[\exp\left(\pm \frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (15.3)$$

где знак «+» относится к прямому направлению, знак «-» - к обратному. При прямых смещениях зависимость имеет экспоненциальный характер, поскольку уже при небольших напряжениях единиц в квадратных скобках можно пренебречь. При больших обратных смещениях ток выходит на постоянный уровень, называемый током насыщения I_s .

Вольтамперная характеристика реальных промышленных полупроводниковых диодов изображена на рис.15.6 и имеет небольшие отличия от зависимости, описываемой ф.(15.3).

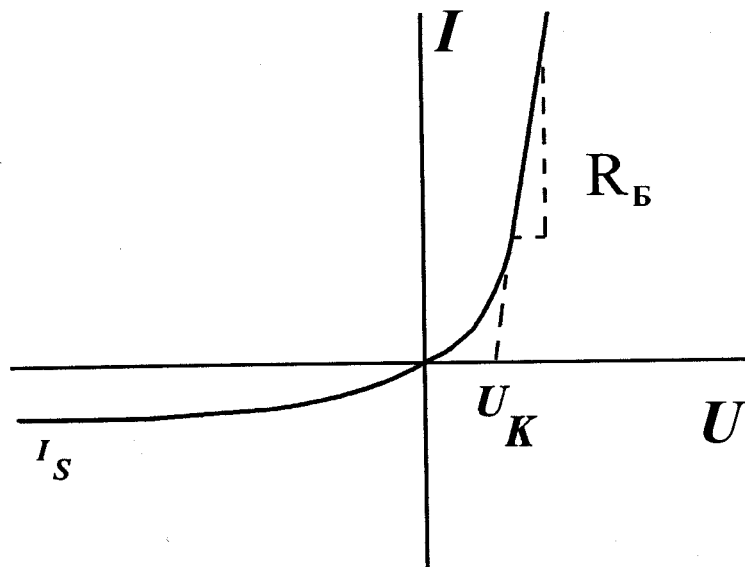


Рис.15.6. ВАХ полупроводникового диода

Эти отличия относятся к области прямых смещений, когда начальный экспоненциальный участок переходит в строгую линейную зависимость. Линейная зависимость обусловлена тем, что при больших прямых смещениях потенциальный барьер для основных носителей полностью исчезает и величину протекающего тока уже определяет электрическое сопротивление p - и n - областей, называемых базовой областью. Сопротивление базовой области R_B определяется по тангенсу угла наклона линейного участка ВАХ:

$$R_B = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (15.4)$$

По этому же участку графика можно определить величину U_K . Если экстраполировать линейный участок до пересечения с осью напряжений (рис. 15.6), то эта точка будет соответствовать величине контактной разности потенциалов p - n перехода. Студенту предлагается самостоятельно доказать это положение.

Выпрямительные свойства диода определяются коэффициентом выпрямления K , который равен отношению прямого тока к обратному при одинаковой величине смещения.

2. Порядок выполнения работы

1. Изучить макет для выполнения измерений. В качестве источника напряжения постоянного тока используется блок питания Б5-50, при работе которого в режиме стабилизации напряжения величина напряжения точно соответствует показаниям на табло прибора.
2. Собрать схему для измерения ВАХ диода согласно обозначениям на макете.
3. Измерить ВАХ полупроводникового диода. Измерения при прямом смещении проводить от 0 до 1,1 В шагом 0,1 В. Измерения при обратном смещении выполнять в интервале от 0 до 10 В шагом 1 В.
4. Построить вольтамперную характеристику диода. Определить величины U_K и R_B .
5. Рассчитать коэффициент выпрямления при напряжении 1 В.
6. Для прямых смещений от 0 до U_K построить зависимость $\ln I = f(U)$. Сделать вывод из полученной зависимости.
7. Провести обсуждение полученных результатов.

Контрольные вопросы











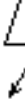





1. Поясните понятия собственного и примесного полупроводника.
2. Объясните выпрямление на p - n переходе.
3. Нарисуйте ВАХ полупроводникового диода и дайте характеристику каждого участка.

Литература

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3. Электричество. М.: Физматлит, 2004.

Обозначения на шкалах приборов

	Наименование	Обозначение
1	Ампер (килоампер миллиампер, микроампер)	A (kA, mA, μ A)
2	Вольт (киловольт, милливольт, микровольт)	V (kV, mV, μ V)
3	Ватт	W
4	Вар	Var
5	Герц	Hz
6	Градус угла сдвига фаз	φ°
7	Коэффициент мощности	$\cos\varphi$
8	Коэффициент реактивной мощности	$\sin\varphi$
9	Ом	Ω
10	Милливебер	mWb
11	Микрофарада	μ F
12	Пикофарада	pF
13	Генри	H
14	Градус температурной шкалы Цельсия	$^\circ$ C
15	Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой	
16	Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом	
17	Электромагнитный прибор	
18	Номинальная (подчеркнуто) и расширенная область применения	10- <u>40-60</u> -120 Гц
19	Электродинамический прибор	
20	Ферродинамический прибор	
21	Индукционный прибор	
22	Электростатический прибор	
23	Вибрационный прибор	
24	Тепловой прибор	
25	Биметаллический прибор	
26	Выпрямитель (полупроводниковый)	

27	Защита от внешних магнитных полей	
28	Защита от внешних электрических полей	
29	Постоянный ток	—
30	Переменный ток (однородный)	~
31	Постоянный и переменный ток	
32	Трёхфазный ток	
33	Класс точности в процентах от диапазона измерений	1,5
34	Класс точности в процентах от длины шкалы	 1,5
35	Горизонтальное положение шкалы	
36	Вертикальное положение шкалы	
37	Наклонное положение шкалы	
38	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 киловольт	
39	Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
40	Осторожно! прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам	
41	Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте	
42	Отрицательный зажим	—
43	Положительный зажим	+
44	Общий зажим	*
45	Зажим постоянного тока (в комбинированных приборах)	+,-
46	Зажимы переменного тока	~
47	Зажим, соединённый с рамкой прибора	
48	Зажим, соединённый с экраном	Э
49	Зажим, соединённый с корпусом	
50	Зажим для заземления	
51	Корректор	
52	Арретир	App
53	Направление арретирования	↑
54	Температурная группа	Б, В

Основные сведения о лабораторном стенде ЮУрГУ

Основные правила техники безопасности при работе на стенде

1. Перед сборкой цепи необходимо убедиться, что все приборы выключены.
2. Сборку цепи необходимо вести по контурам, начиная от основного, содержащего источник питания. Блок мультиметров подключается в последнюю очередь. Обратите внимание на правильность выбора режимов измерения.
3. Включение схемы производится только после проверки соединений преподавателем или лаборантом.
4. Для проведения любых переключений в цепи необходимо отключить источник питания.
5. Перед разборкой цепи проверьте выключение всех приборов.

Устройство стенда

1. Лабораторный стенд разбит на четыре части, каждая из которых выполняет определенную функцию.
2. В левой части стенда выполнен блок генераторов, который состоит из генератора напряжений специальной формы (синусоидальный сигнал, биполярные импульсы, униполярные импульсы), генератора регулируемых постоянных напряжений, двух нерегулируемых источников постоянного напряжения.
3. Справа от блока генераторов находится наборное поле, предназначенное для сборки электрических схем. Линии на наборном поле показывают физически соединенные гнезда. Штриховыми линиями показаны места для подключения специальных миниблоков, находящихся в комплекте работы.
4. Правее находится блок двух цифровых мультиметров с источниками питания. Клемма «СОМ» является общим входом (земля), второй вход выбирается из задачи исследования. Появление цифры «1» на дисплее указывает на то, что предел измерения следует увеличить. Мультиметр автоматически выключается через 40 минут после последнего переключения режимов измерения.
5. Самая правая часть представляет собой макет работы по изучению электростатических полей. Правила сборки этой схемы приведены в описании лабораторной работы №6.

Некоторые фундаментальные физические константы

Заряд электрона $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Масса электрона $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ кг

Отношение заряда электрона к его массе $e/m=1,7 \cdot 10^{11}$ Кл/кг

Электрическая постоянная $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

Скорость света в вакууме $c=3 \cdot 10^8$ м/с

Магнитная постоянная $\mu_0=1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м

Постоянная Больцмана $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град

Число Авогадро $N_A=6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹

Физические константы веществ

Плотность меди - 8,93 г/см³

Молярная масса меди – 63,5 г/ моль

Удельное сопротивление меди (20°C) – $1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см

Температурный коэффициент

сопротивления меди (20°C) - $4,3 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹

Ширина запрещенной зоны кремния – 1,1 эВ

Ширина запрещенной зоны германия – 0,8 эВ

Коэффициенты перевода единиц

1 эВ= $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

1 Дж= $6,2 \cdot 10^{18}$ эВ

$T(K) = 273,15+t(^{\circ}C)$

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	XX
Лабораторная работа №1 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ.....	XX
Лабораторная работа №2 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ.....	XX
Лабораторная работа №3 ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	XX
Лабораторная работа №4 КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ.....	XX
Лабораторная работа №5 ПРОВЕРКА ПРАВИЛ КИРХГОФА ДЛЯ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	XX
Лабораторная работа №6 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ.....	XX
Лабораторная работа №7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ЕМКОСТЬ.....	XX
Лабораторная работа №8 ПРОВЕРКА ЗАКОНА БОГУСЛАВСКОГО-ЛЕНГМЮРА ДЛЯ ВАКУУМНОГО ДИОДА И ОПРЕДЕДЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА.....	XX
Лабораторная работа №9 ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ.....	XX
Лабораторная работа №10 ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ, ЕМКОСТИ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	XX

Лабораторная работа №11 МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ.....	XX
Лабораторная работа №12 ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....	XX
Лабораторная работа №13 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА.....	XX
Лабораторная работа №14 СНЯТИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА И ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	XX
Лабораторная работа №15 КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ. ВЫПРЯМЛЯЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ <i>p-n</i> ПЕРЕХОДА	XX
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	XX