

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ФИЗИКА**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**В 3-х частях**

### **Часть 2. Электричество и магнетизм**

*Рекомендовано  
учебно-методическим объединением  
по химико-технологическому образованию  
в качестве учебно-методического пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по химико-технологическим специальностям*

Минск 2025

УДК 531(075.8)

ББК 22.36я73

Ф50

**А в т о р ы :**

*Н. Н. Крук, А. В. Буцень, В. В. Тульев, В. В. Поплавский*

**Р е ц е н з е н т ы :**

кафедра физической оптики и прикладной информатики  
Белорусского государственного университета (заведующий  
кафедрой профессор, доктор физико-математических наук  
*К. В. Козадаев*);

профессор кафедры физических и математических основ  
информатики учреждения образования «Белорусская  
государственная академия связи» профессор,  
доктор физико-математических наук *Л. Л. Гладков*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».*

**Физика. Лабораторный практикум** : учеб.-метод. пособие  
Ф50 для студентов учреждений высшего образования по химико-технологическим специальностям : в 3 ч. / Н. Н. Крук, А. В. Буцень, В. В. Тульев, В. В. Поплавский. – 2-е изд., перераб. – Минск : БГТУ, 2025. – Ч. 2 : Электричество и магнетизм. – 162 с.  
ISBN 978-985-897-313-1.

В пособии приведены основные сведения об электрических измерениях, устройстве электроизмерительных приборов и их погрешностях. Изложен теоретический и методический материал, необходимый для выполнения лабораторных работ по разделам «Электричество» и «Магнетизм» учебной дисциплины «Физика» студентами химико-технологических специальностей. В справочной части издания приводятся таблицы со значениями необходимых для вычисления физических констант.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов химико-технологических специальностей, также может использоваться студентами инженерно-технических специальностей.

**УДК 531(075.8)**

**ББК 22.36я73**

**ISBN 978-985-897-313-1 (Ч. 2)**  
**ISBN 978-985-897-196-0**

© УО «Белорусский государственный  
технологический университет», 2025  
© Н. Н. Крук, А. В. Буцень, В. В. Тульев,  
В. В. Поплавский, 2025

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Выполнение лабораторного практикума является важнейшим способом формирования у будущих инженеров умений и навыков работы с измерительными приборами и оборудованием различного назначения, освоения методов физических измерений и обработки экспериментальных результатов.

Содержание практикума отвечает требованиям учебных программ по дисциплине «Физика» для студентов соответствующих специальностей. Данное учебно-методическое пособие является вторым из трех запланированных к изданию. Первая часть с описанием лабораторных работ по разделам «Физические основы механики» и «Термодинамика и молекулярная физика» была переиздана в 2024 г. Вторая часть включает анализ лабораторных работ по разделам «Электричество» и «Магнетизм». Изучаемый материал изложен в пособии в объеме, достаточном для самостоятельной подготовки к выполнению работ без привлечения дополнительной литературы. Для углубленного изучения соответствующих тем в издании приводится список литературы.

Во вводной части пособия приведены основные сведения об измерениях электрических величин, описаны принципы работы и устройство электроизмерительных приборов, изложены способы определения погрешности прямых электрических измерений. В лабораторных работах приводятся основные теоретические сведения по теме, описываются лабораторные установки и экспериментальный метод, а также последовательность выполнения работы. Справочная часть включает таблицы со значениями физических величин, необходимых для обработки и анализа результатов измерений.

Лабораторные работы № 31–34, 36 написаны доцентом Тульевым В. В., № 37–40 и раздел «Приложение» – заведующим кафедрой Круком Н. Н., лабораторные работы № 46, 49–51 – доцентом Поплавским В. В., № 47, 48, 52–54 и раздел «Основы электрических измерений» – ассистентом Буценом А. В. Лабораторные работы № 35, 41–45 раздела «Электричество» находятся в стадии разработки и поэтому не включены в данное учебно-методическое пособие.

# ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Выполнение лабораторной работы включает самостоятельную теоретическую подготовку по теме, изучение устройства и принципов работы лабораторной установки, метода и порядка выполнения измерений, проведение экспериментов и обработку их результатов, оформление отчета о выполненной работе и ее защиту в ходе собеседования с преподавателем.

Отчеты студента о лабораторных работах оформляются в отдельной общей тетради. Они должны быть четкими, аккуратными и включать следующие разделы:

1. Номер, название и цель работы.
2. Описание установки и метода измерений (общий вид или схема установки с обозначениями, расчетные формулы с пояснениями входящих в них физических величин).
3. Результаты измерений и их обработка (таблицы с заданными, измеренными и рассчитанными величинами и их погрешностями), после которых приводится порядок расчетов физических величин и их погрешностей с короткими пояснениями, графики полученных зависимостей, сравнение экспериментально определенных значений физических величин с их истинными значениями.
4. Выводы по лабораторной работе.

Процесс выполнения лабораторной работы делится на три этапа.

• *Самоподготовка.* Студенты, используя методическое пособие, материалы конспекта лекций и рекомендованной литературы, изучают необходимый теоретический материал по работе, знакомятся со схемой, устройством и принципом работы установки, а также последовательностью практического выполнения лабораторной работы. В начале занятий студенты предъявляют преподавателю конспект двух первых разделов отчета, что является необходимым условием для их допуска к практическим измерениям. **Студенты не допускаются ко второму этапу до тех пор, пока не будет выполнена работа на первом этапе.**

• *Выполнение измерений.* Студенты, получившие допуск, приступают к выполнению лабораторной работы. Они работают звеньями,

проводят измерения, результаты которых заносят в таблицу; выполняют контрольный расчет, который должен подтвердить правильность измерений. Полученные результаты представляются преподавателю. У каждого студента отчет должен быть индивидуальным.

• *Обработка результатов измерений, оформление отчета и сдача работы.* Студенты заканчивают работу над третьим и четвертым разделами отчета: проводится расчет искомых физических величин, погрешностей измерений и т. д. Все этапы этих расчетов необходимо кратко отразить в отчете. Выводы отчета должны опираться на анализ выявленных в работе закономерностей, связей между различными физическими величинами, сравнение полученных результатов с теоретическими и табличными.

*Защита лабораторной работы* проводится на **следующем занятии** и включает в себя собеседование по теоретической и экспериментальной частям работы; обсуждение результатов выполнения работы; ответы студентов на контрольные вопросы, имеющиеся в методическом пособии. После собеседования преподаватель выставляет оценку по лабораторной работе в виде рейтингового балла.

**В лабораториях необходимо неукоснительно соблюдать правила техники безопасности!**

***Категорически запрещается***

- 1) нарушать требования инструкции по технике безопасности;
- 2) приносить и употреблять в лаборатории напитки и еду, разговаривать по мобильному телефону, работать в наушниках, находиться в лаборатории в верхней одежде, загромождать столы и проходы вещами и одеждой;
- 3) заниматься посторонними делами, мешать выполнению работ другими студентами;
- 4) пользоваться чужими отчетами либо их частями (таблицами с экспериментальными и расчетными данными, графиками).

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

## 1. Основные сведения об электроизмерительных приборах

Электроизмерительные приборы позволяют измерять силу тока, напряжение, мощность и другие электрические величины. Различают аналоговые и цифровые приборы. *Аналоговыми* называют измерительные приборы, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины (например, тока или напряжения). *Цифровыми* называют те измерительные приборы, показания которых выражены в цифровой форме.

*Амперметр* – это электроизмерительный прибор, предназначенный для измерения силы постоянного либо переменного тока, протекающего в цепи. Амперметр подключается последовательно с тем участком электрической цепи, где предполагается измерять ток (рис. 01). Так как измеряемый ток зависит от сопротивления элементов цепи, то сопротивление амперметра должно быть очень малым. Это позволяет уменьшить влияние амперметра на измеряемый ток в цепи и повысить точность измерений.

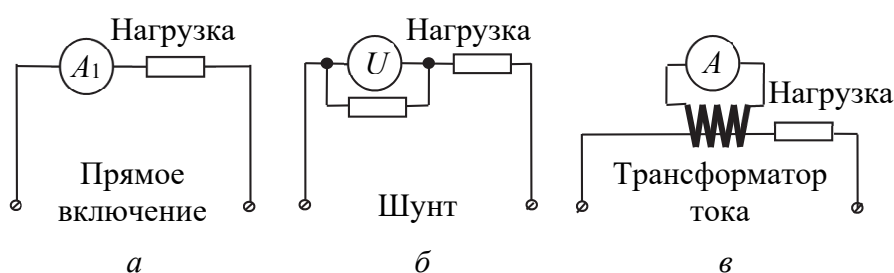


Рис. 01

Шкалу прибора градуируют в микроамперах ( $\mu A$ ), миллиамперах ( $mA$ ), амперах ( $A$ ) и в зависимости от требуемой точности и пределов измерения выбирают подходящий прибор. Для увеличения предела измеряемой прибором силы тока используют шунты.

*Шунт* (ответвление) представляет собой проводник с малым сопротивлением по сравнению с сопротивлением амперметра, подключаемый параллельно прибору (рис. О1). Очень большие переменные токи (сотни и тысячи ампер) измеряются путем подключения амперметра к обмотке трансформатора тока.

*Вольтметр* – прибор, предназначенный для измерения напряжения (разности потенциалов) между двумя точками цепи. Вольтметр всегда подключается параллельно элементу цепи (рис. О2). Для расширения пределов измерения напряжения вольтметр включается через добавочное сопротивление.

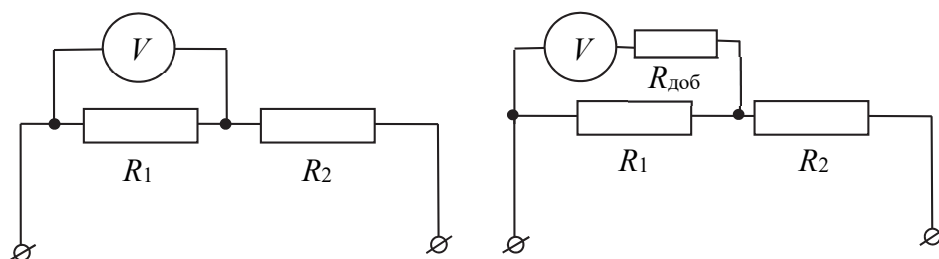


Рис. О2

Измеренное значение вольтметр показывает в микровольтах (мкВ), милливольтмах (мВ), вольтах (В) или киловольтах (кВ). Идеальный вольтметр должен обладать бесконечно большим внутренним сопротивлением, чтобы точно измерять напряжение и не оказывать побочного воздействия на цепь. Поэтому в приборах высокого класса стараются сделать максимально большим внутреннее сопротивление, от которого зависит точность измерения.

Основной частью каждого измерительного прибора является *измерительный механизм*. Он предназначен для преобразования подводимой к нему электрической энергии в механическую энергию перемещения подвижной части прибора и связанной с ней стрелкой или другим указательным устройством, каждому положению которого соответствует определенное значение измеряемой величины. В зависимости от принципа действия измерительного механизма электроизмерительные приборы относят к одной из следующих систем: магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электронной, цифровой. Приборы с этими измерительными механизмами применяются и как амперметры, и как вольтметры. В вольтметрах через электрическую часть измерительного механизма протекает очень малый ток.

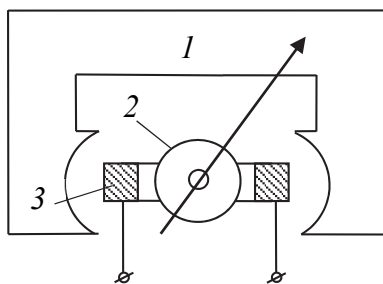


Рис. О3

Магнитоэлектрические приборы предназначены для измерения малых постоянных токов. Магнитоэлектрическая система измерительных приборов показана на рис. О3. Поле постоянного магнита *1* взаимодействует с кольцевым током в катушке *2*, внутри которой располагается неподвижный магнитный сердечник *3*.

Измерительный механизм включает в себя установленную в подшипниковых опорах ось, имеющую противодействующие пружины, указательную стрелку с балансирующими грузами и шкалу. Магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерения токов постоянного направления. В приборе применяется сильное магнитное поле, поэтому даже небольшой ток создает значительный вращательный момент. Приборы такого типа обладают высокой чувствительностью и способны измерять очень слабые токи. Сила, действующая на стрелку, пропорциональна току, поэтому и угол поворота стрелки прямо пропорционален току и шкала прибора получается равномерной. Поскольку магнитная система прибора имеет свое сильное магнитное поле, влияние внешних магнитных полей на показания прибора пренебрежимо мало.

Приборы электромагнитного типа предназначены для использования в цепях как постоянного, так и переменного тока, но обычно применяются в привычных электроустановках переменного тока с частотой 50 Гц. Измерительный механизм электромагнитной системы (рис. О4) состоит из неподвижной катушки *1* и подвижного ферромагнитного сердечника *2*, укрепленного на одной оси со стрелкой прибора *3*. К этой же оси прикреплен один из концов спиральной пружины *4*, создающей при ее закручивании противодействующий момент сил. Угол поворота стрелки прибора пропорционален квадрату силы измеряемого тока и, следовательно, не зависит от направления тока. Поэтому такие приборы пригодны для измерения как постоянного, так и переменного тока.

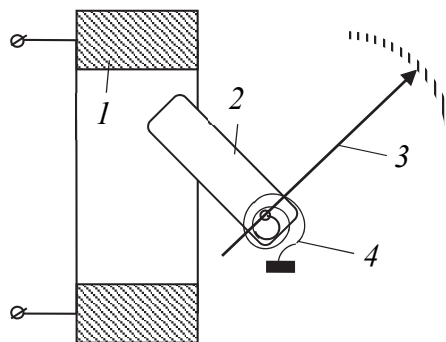


Рис. О4

Электродинамические приборы предназначены для измерения силы тока в цепях постоянного или переменного токов повышенных частот (до 200 Гц). Принцип действия приборов этой системы основан на взаимодействии двух катушек с током – неподвижной 1 и подвижной 2 (рис. О5). Угол поворота указателя (стрелки) пропорционален произведению токов в катушках. Если катушки включить последовательно, то угол поворота будет пропорционален квадрату силы тока и прибор может измерять переменный ток. Если обмотку неподвижной катушки (обычно она имеет большое сопротивление) включить параллельно нагрузке, а подвижную катушку (ее сопротивление малое, меньше сопротивления нагрузки) последовательно с нагрузкой, то показания прибора окажутся пропорциональными мощности в нагрузке. Таким образом, приборы электродинамической системы могут использоваться для измерения полезной мощности, выделяющейся в цепи.

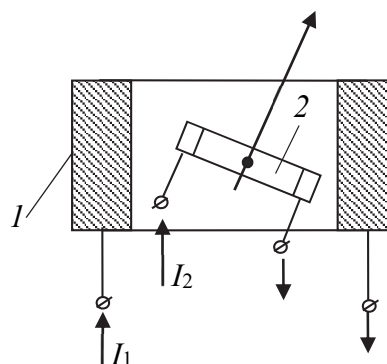


Рис. О5

Принцип работы цифровых измерительных приборов (вольтметров и амперметров) основан на дискретном и цифровом представлении непрерывных измеряемых величин. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра приведена на рис. О6. Цифровой вольтметр состоит из входного устройства, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), дешифратора и управляющего устройства.

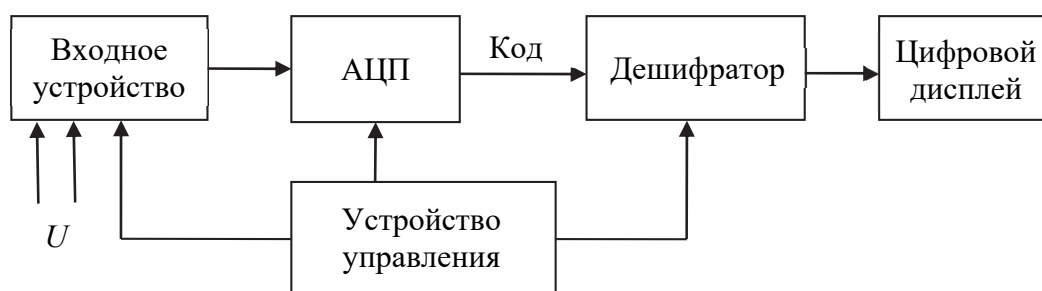


Рис. О6

Входное устройство содержит делитель напряжения; в вольтметрах переменного тока оно включает в себя также преобразователь переменного тока в постоянный.

АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой, представляемый цифровым кодом. Дешифратор с отсчетным устройством преобразует этот код в измеряемую величину, которая выводится на дисплей (светодиодный или жидкокристаллический индикатор). Управляющее устройство объединяет и управляет всеми узлами вольтметра.

## 2. Цена деления и класс точности электроизмерительных приборов

*Ценой деления* шкалы аналогового прибора называют значение измеряемой величины, вызывающей отклонение указателя на одно деление шкалы. Если шкала прибора равномерна, то цена деления определяется отношением предела измерения прибора  $A$  к полному числу делений  $N$ , т. е. цена деления  $\mu = A / N$ . Точность прибора определяет погрешность прибора при данном измерении.

*Абсолютная погрешность прибора*

$$\Delta x_{\text{пр}} = |x - x_0|, \quad (\text{O1})$$

где  $x$  – измеряемое значение;  $x_0$  – точное значение этой же величины.

*Относительная погрешность прибора*

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\Delta x}{x_0} 100\%. \quad (\text{O2})$$

Для характеристики точности электроизмерительных приборов вводят класс точности  $E$ , который определяется как отношение абсолютной погрешности измеряемой величины к наибольшему значению величины  $x_{\text{max}}$ , измеряемой прибором на данном пределе измерения:

$$E = \frac{\Delta x_{\text{пр}}}{x_{\text{max}}} 100\%. \quad (\text{O3})$$

По величине  $E$  все электроизмерительные приборы подразделяются на восемь классов точности:  $E = 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0$ . Приборы с  $E = 0,05–0,5$  называются *прецизионными* и применяются для точных лабораторных измерений. Приборы с

$E = 1,0\text{--}4,0$  – *технические*. Из формулы (О3) следует, что, зная класс точности  $E$  и предел измерения  $x_{\max}$  прибора, можно определить его абсолютную погрешность:

$$\Delta x_{\text{пр}} = \frac{x_{\max} E}{100\%}. \quad (\text{О4})$$

Относительную погрешность  $\varepsilon_{\text{пр}}$  данного измерения  $x$  можно оценить, пользуясь формулой (О2), заменив в ней  $x_0$  на  $x$ . Таким образом, величина  $\varepsilon_{\text{пр}}$  обратно пропорциональна измеряемой величине и измерения будут тем точнее, чем ближе измеряемое значение к предельному.

У цифровых электроизмерительных приборов ценой деления является единица младшего регистра цифрового индикатора, а их точность измерения для каждого типа и предела измерения приводится в паспорте прибора.

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

## Лабораторная работа № 31 ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

**Цель работы:** изучить явление *поляризации* диэлектриков; ознакомиться с методикой измерения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  твердых диэлектриков методом *контурного резонанса*; измерить диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  образцов с помощью ку-метра.

### 1. Теоретическое введение

Вещество, помещенное во внешнее электрическое поле, независимо от его природы и агрегатного состояния претерпевает определенные изменения. Это приводит к возникновению ряда явлений, которые, в свою очередь, изменяют поле как внутри этого вещества, так и за его пределами.

По отношению к действию электростатического поля все вещества можно разделить на *проводники* и *диэлектрики*. Характерным признаком проводников является наличие в них так называемых свободных носителей заряда (*свободных зарядов*), которыми являются электроны в металлах, ионы в электролитах, электроны и ионы в ионизованных газах и плазме. Под действием электрического поля эти заряды способны перемещаться по проводникам и поэтому проводники проводят электрический ток. Диэлектрики, состоящие из нейтральных атомов или молекул, практически не содержат свободных носителей заряда и потому плохо проводят электрический ток (т. е. являются в обычных условиях *изоляторами*). Заряды, которые входят в состав нейтральных атомов и молекул, а также заряды ионов в кристаллических диэлектриках с ионной решеткой называют *связанными зарядами*.

Различают *полярные, неполярные диэлектрики* и *ионные кристаллические диэлектрики*.

**Полярные диэлектрики** – это вещества ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  и др.), молекулы которых имеют асимметричное строение, т. е. центры «сосредоточения» положительных и отрицательных зарядов не совпадают и эти молекулы обладают дипольным моментом  $\vec{p}_e$ . Молекулы таких диэлектриков называются *полярными*.

В отсутствие внешнего электрического поля благодаря тепловому движению дипольные моменты  $\vec{p}_e$  молекул ориентированы хаотически. Поэтому векторная сумма дипольных моментов всех молекул, содержащихся в произвольном объеме такого диэлектрика, равна нулю. Под действием внешнего поля дипольные моменты молекул повернутся так, что их оси расположатся приблизительно вдоль направления поля. Однако тепловое движение молекул препятствует строгой ориентации их дипольных моментов (рис. 31.1).

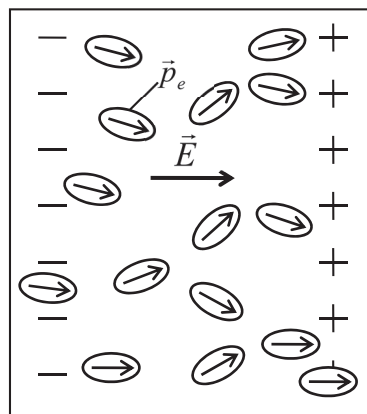


Рис. 31.1

В результате преимущественной ориентации дипольных моментов молекул вдоль направления внешнего поля на противоположных гранях образца возникают поляризационные заряды разных знаков, тогда как внутри диэлектрика заряды разных знаков в среднем скомпенсированы. Такого рода поляризация называется *ориентационной (или дипольной) поляризацией*.

**Неполярные диэлектрики** – это вещества ( $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и др.), молекулы которых имеют симметричное строение, т. е. центры «сосредоточения» положительных и отрицательных зарядов в

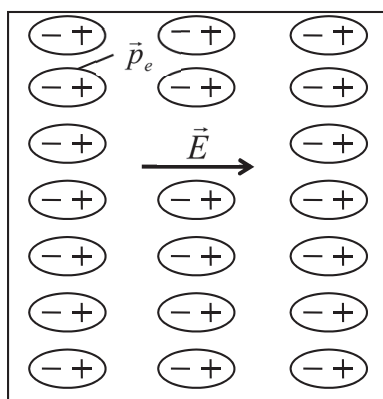


Рис. 31.2

отсутствие внешнего электрического поля совпадают и дипольный момент этих молекул в данном случае равен нулю. Молекулы таких диэлектриков называются *неполярными*.

Если неполярная молекула в отсутствие внешнего электрического поля не имеет дипольного момента, то под действием внешнего поля положительно заряженное ядро молекулы смещается в направлении поля, а электронные оболочки – в обратном направлении (рис. 31.2).

Молекула приобретает дипольный момент  $\vec{p}_e$ , который пропорционален напряженности  $E$  внешнего поля. Такие диполи, возникающие при «деформации» атомов и молекул во внешнем электрическом поле, называются *квазиупругими* диполями. Их дипольный момент

$$\vec{p}_e = \epsilon_0 \alpha \vec{E}, \quad (31.1)$$

где  $\alpha = 4\pi r^3$  – *поляризуемость* молекулы;  $r$  – радиус молекулы.

В результате на противоположных гранях диэлектрика также появятся разноименные поляризационные заряды. Такого рода поляризация называется *электронной поляризацией*.

*Ионно-кристаллические диэлектрики* – это вещества (NaCl, KCl, KBr и др.), которые имеют ионное строение. Ионные кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков. В этих кристаллах нельзя выделить отдельные молекулы, а рассматривать их можно как систему двух вставленных одна в другую ионных подрешеток противоположных знаков. При помещении такого диэлектрика во внешнее электрическое поле положительные ионы кристаллической решетки сместятся в направлении поля, а отрицательные ионы – противоположно полю, т. е. их подрешетки как бы сдвинутся относительно друг друга на некоторую величину (рис. 31.3).

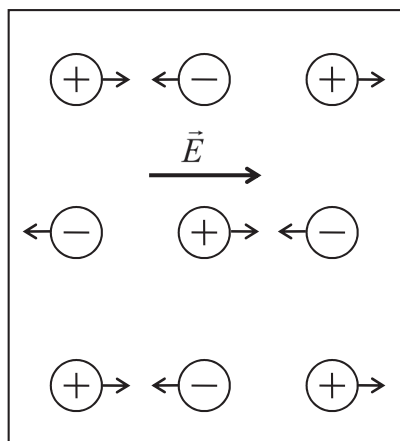


Рис. 31.3

В результате весь образец приобретает результирующий дипольный момент и на его гранях возникнут нескомпенсированные поляризационные заряды. Такого рода поляризация называется *ионной поляризацией*.

Таким образом, под *поляризацией* понимают процесс ориентации диполей во внешнем электрическом поле или появление под воздействием внешнего электрического поля ориентированных по полю диполей. Возникающий во всех случаях дипольный момент образца зависит от числа микрочастиц, находя-

щихся в его объеме. Для характеристики степени поляризации диэлектрика вводят физическую величину – *поляризованность* (вектор поляризации)  $\vec{P}$ . Вектор поляризации  $\vec{P}$  – это векторная

физическая величина, численно равная дипольному моменту единицы объема диэлектрика:

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{p}_{ei}}{\Delta V}, \quad (31.2)$$

Для большого класса диэлектриков (кроме сегнетоэлектриков) поляризованность  $\vec{P}$  линейно зависит от напряженности электрического поля:

$$\vec{P} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (31.3)$$

где  $\varepsilon$  – *диэлектрическая восприимчивость* вещества, которая характеризует свойства диэлектрика. Эта величина безразмерная и всегда  $\varepsilon > 0$ .

Для газообразного неполярного диэлектрика диэлектрическая восприимчивость определяется выражением

$$\varepsilon = n\alpha, \quad (31.4)$$

где  $\alpha$  – поляризуемость молекулы;  $n = \frac{\Delta N}{\Delta V}$  – концентрация молекул диэлектрика.

В случае жидких и кристаллических неполярных диэлектриков следует учитывать взаимодействие между атомами и молекулами. В результате зависимость  $\varepsilon$  от  $\alpha$  и  $n$  становится нелинейной и ее можно выразить *формулой Клаузиуса – Моссотти*:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 3} = \frac{1}{3} n\alpha. \quad (31.5)$$

В случае жидких и газообразных полярных диэлектриков поляризация преимущественно осуществляется за счет поворота дипольных моментов молекул под действием электрического поля. Процессу ориентирования диполей будет противодействовать дезориентирующее влияние теплового движения молекул, которое нарушает упорядоченную ориентировку диполей в направлении поля. Диэлектрическая восприимчивость такого полярного диэлектрика зависит от температуры и имеет вид

$$\varepsilon = \frac{np_e^2}{3\varepsilon_0 kT}. \quad (31.6)$$

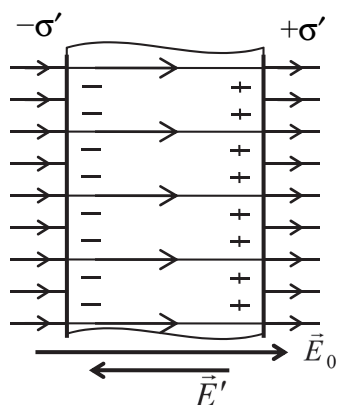


Рис. 31.4

Вследствие поляризации диэлектрика (при любом ее типе) у той его поверхности, в которую входят силовые линии внешнего поля, возникает избыток отрицательных связанных зарядов  $-\sigma'$  (рис. 31.4). У противоположной поверхности, из которой выходят силовые линии, возникает избыток положительного заряда  $+\sigma'$ . Данные поляризационные заряды образуют поле, напряженность  $\vec{E}'$  которого направлена противоположно внешнему полю.

В итоге видно, что результирующее электростатическое поле внутри диэлектрика уменьшается:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \Rightarrow E = E_0 - E' < E_0. \quad (31.7)$$

Следовательно, поляризация приводит к уменьшению электрического поля в диэлектрике по сравнению с внешним полем.

Отношение напряженности внешнего поля к напряженности поля внутри диэлектрика определяется выражением

$$\frac{E_0}{E} = 1 + \varepsilon = \varepsilon, \quad (31.8)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

Диэлектрическая проницаемость вещества  $\varepsilon$  – это физическая величина, которая показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в диэлектрике меньше напряженности электрического поля в вакууме.

Диэлектрическая проницаемость является одной из важнейших характеристик диэлектрика. Ее величина связана со свойствами атомов, молекул или ионов, входящих в состав диэлектрика, а также с его строением. Измерение  $\varepsilon$  может быть использовано для самых разнообразных целей: от применения в электро- и радиотехнике до изучения кинетики химических реакций, контроля чистоты вещества, анализа бинарных систем и др.

## 2. Описание установки и метода измерений

Емкость  $C$  воздушного ( $\varepsilon_{\text{в}} = 1,0006$ ) конденсатора в  $\varepsilon$  раз меньше, чем емкость такого же конденсатора, пространство между

обкладками которого заполнено диэлектриком с проницаемостью  $\epsilon$ . Измеряя емкость конденсатора с диэлектриком и без него, можно определить величину  $\epsilon$ . Как правило, различие емкостей конденсаторов с диэлектриком и без диэлектрика небольшое (несколько пикофард). Поэтому в работе используется прибор (*куметр*), позволяющий измерять емкость с высокой точностью, принципиальная схема которого приведена на рис. 31.5.

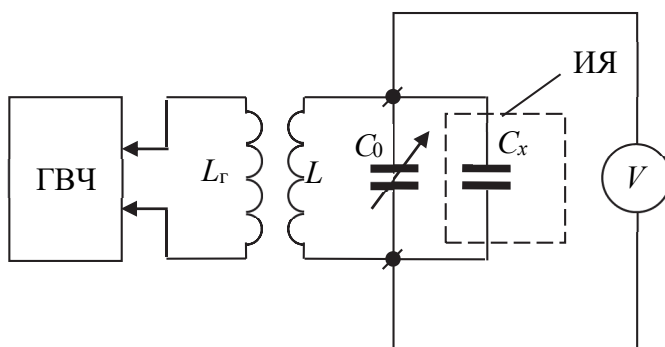


Рис. 31.5

В основу измерения емкости куметром положен *резонансный метод*. Измерительная ячейка (ИЯ) с емкостью  $C_x$  подключается параллельно встроенному в куметр образцовому конденсатору переменной емкости  $C_0$ . Вместе с катушкой индуктивностью  $L$  они образуют колебательный контур. Возбуждение колебаний в контуре обеспечивается через индуктивную связь с катушкой  $L_{\Gamma}$ , подключенной к генератору тока высокой частоты (ГВЧ). Колебательный контур куметра обладает очень малым активным сопротивлением ( $R \approx 0$ ). Поэтому при частоте генератора, близкой к собственной частоте  $\omega_0$  контура, возникает *резонанс напряжений* и резонансная частота:

$$\omega_p \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{L(C_0 + C_x)}}. \quad (31.9)$$

В резонансном режиме колебаний напряжение  $U$  на конденсаторах  $C_0$  и  $C_x$ , измеряемое ламповым вольтметром  $V$  куметра, имеет максимальное значение. Из соотношения (31.9) следует, что если частота  $\omega_p$  генератора фиксирована, то при неизменной индуктивности  $L$  резонанс в контуре можно получить путем изменения емкости образцового конденсатора  $C_0$ . Очевидно, что резонанс на

заданной частоте  $\omega_0$  будет наблюдаться при одной и той же емкости контура  $C = C_0 + C_x$ , поэтому для двух измеряемых емкостей  $C_{x1}$  и  $C_{x2}$  должно выполняться соотношение

$$C_{01} + C_{x1} = C_{02} + C_{x2} \Rightarrow C_{01} - C_{02} = C_{x2} - C_{x1}, \quad (31.10)$$

где  $C_{01}$  и  $C_{02}$  – значения переменной емкости  $C_0$  при резонансе, которые считываются по шкале куметра в двух опытах.

Конденсатор  $C_x$  состоит из двух параллельных обкладок, выполненных в виде дисков с закругленными краями. Он помещен в металлический корпус, который уменьшает влияние на измеряемую емкость внешних электрических полей, т. е. он является *электрическим экраном*. Для конденсатора с воздушным зазором между обкладками емкость  $C_{x1} = C_{пл} + C_{кр}$ , где  $C_{пл}$  и  $C_{кр}$  – емкости плоской и краевой частей обкладок соответственно. Если плоскую часть этого же конденсатора заполнить диэлектриком, то  $C_{x2} = \epsilon C_{пл} + C_{кр}$ . Подставив  $C_{x1}$  и  $C_{x2}$  в равенство (31.10), получим

$$C_{01} + C_{пл} = C_{02} + \epsilon C_{пл} \Rightarrow \epsilon = 1 + \frac{(C_1 - C_2)d}{\epsilon_0 S}. \quad (31.11)$$

Здесь учтено, что для плоского воздушного конденсатора емкость  $C_{пл} = \epsilon_0 \frac{S}{d}$ , где  $S$  – площадь диска диаметром  $D$  ( $D = 5$  см).

### 3. Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для внесения результатов измерений.

$L =$				$\omega =$			
№ образца	Материал	$l_1$ ,	$l_2$ ,	$d$ ,	$C_{01}$ ,	$C_{02}$ ,	$\epsilon$

2. По инструкции в приложении к установке ознакомьтесь с назначением элементов управления на передней панели куметра, порядком его включения и проведения измерений.

3. Согласно варианту (номеру звена) определите по таблице приложения номера образцов, катушки индуктивности  $L$  и частоту  $\omega$  генератора (занесите эту информацию в таблицу).

4. Вставьте катушку в гнездо куметра и выставьте по его шкале частоту  $\omega$  в диапазоне, указанном на корпусе катушки.

5. Осторожно вращая головку микрометрического винта в указанном направлении, опустите верхний подвижный электрод (обкладку конденсатора) до его соприкосновения с нижним электродом. Вращение прекратите в момент проворачивания трещотки. Запишите в таблицу показание  $l_1$  микрометра.

6. Вращая головку винта, поднимите верхний электрод и поместите между электродами образец, осторожно зажмите его до проворачивания трещотки и отметьте  $l_2$ . Определите толщину образца ( $d = l_1 - l_2$ ).

7. По инструкции куметра настройте его колебательный контур в резонанс по максимальному отклонению стрелки  $Q$ -вольтметра и занесите отсчет емкости  $C_{02}$  в таблицу.

8. Удалите образец из ячейки и установите зазор между электродами, равный толщине образца  $d$ . Опять настройте контур в резонанс и определите отсчет  $C_{01}$ .

9. Повторите измерения по п. 6–8 для двух других образцов.

10. По формуле (31.11) для каждого образца рассчитайте  $\epsilon$  и сравните их со справочными значениями.

11. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества называют проводниками, диэлектриками? Какие заряды называют связанными, а какие свободными? 2. Какие виды диэлектриков существуют? Их краткая характеристика. 3. В чем заключается сущность процессов поляризации диэлектриков? 4. Какие виды поляризации вы знаете? Каковы особенности этих видов поляризации? 5. Какими величинами характеризуется поляризация диэлектриков? 6. Как измеряют емкость образца с помощью куметра?

## Лабораторная работа № 32 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

**Цель работы:** изучить явление *поляризации* диэлектриков; ознакомиться с методикой измерения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  жидкого диэлектрика *сравнительным методом*; измерить диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  образцов с помощью *куметра*.

## 1. Теоретическое введение

Изучите теоретическое введение к лабораторной работе № 31.

## 2. Описание установки и метода измерений

В работе используется измерительная ячейка (ИЯ) (рис. 32.1), измерительный 1 и заземленный 2 электрода которой образуют коаксиальный цилиндрический конденсатор. Соосность цилиндров обеспечивается втулкой 3 и шайбой 4, которые изготовлены из фторопласта. Исследуемая жидкость заполняет объем межэлектродного пространства до определенного уровня, отмеченного на рис. 32.1 пунктирной линией. С помощью коаксиального кабеля (КК) ячейка подсоединяется к измерительному прибору (куметру) (рис. 32.2), принцип работы которого описан в лабораторной работе № 31.

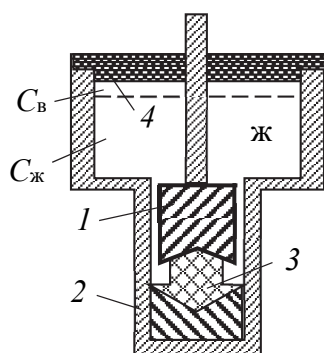


Рис. 32.1

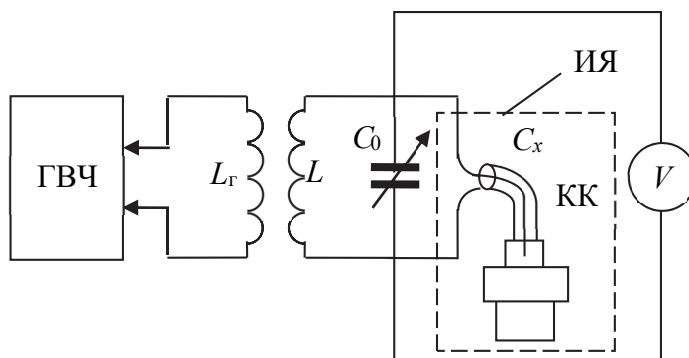


Рис. 32.2

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  исследуемой жидкости определяется путем сравнения емкостей ячейки с жидкостью и без нее.

Емкость ячейки с жидкостью состоит из трех частей:

$$C_{x2} = C_{\text{ж}} + C_{\text{в}} + C_{\text{м}}, \quad (32.1)$$

где  $C_{\text{ж}}$  – емкость части ячейки между электродами 1 и 2, которая заполнена жидкостью;  $C_{\text{в}}$  – емкость части ячейки между электродами 1 и 2, которая заполнена воздухом;  $C_{\text{м}}$  – емкость монтажа, которая включает в себя емкость кабеля, соединительных разъемов и входную емкость куметра.

Емкость пустой ячейки, т. е. ячейки, заполненной воздухом

$$C_{x1} = C_{\text{в}}^* + C_{\text{в}} + C_{\text{м}}, \quad (32.2)$$

где  $C_{\text{в}}^*$  – емкость части ячейки, объем которой равен объему, заполняемому жидкостью, в пустой ячейке эту часть заполняет воздух.

Поскольку  $C_{\text{ж}} = \epsilon C_{\text{в}}^*$ , то после подстановки соотношений (32.1), (32.2) в равенство (31.10), получим

$$C_{01} - C_{02} = C_{\text{ж}} - C_{\text{в}}^* = (\epsilon - 1)C_{\text{в}}, \quad (32.3)$$

где  $C_{01}$  и  $C_{02}$  – значения переменной емкости  $C_0$  при резонансе, которые считываются по шкале куметра в опытах с пустой и заполненной ячейками соответственно.

Из равенства (32.3) следует выражение

$$C_{\text{в}} = \frac{C_{01} - C_{02}}{\epsilon - 1}. \quad (32.4)$$

Очевидно, что аналогичное выражение получится, если ячейку заполнить *калибровочной* жидкостью с известным значением проницаемости  $\epsilon_{\text{к}}$  (в качестве такой жидкости можно использовать, например, трансформаторное масло, для которого  $\epsilon_{\text{к}} = 2,1$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ ).

$$C_{\text{в}} = \frac{C_{01} - C_{0\text{к}}}{\epsilon_{\text{к}} - 1}, \quad (32.5)$$

где  $C_{0\text{к}}$  – отсчет емкости для ячейки с калибровочной жидкостью.

Приравнявая правые части выражений (32.4) и (32.5) и решая полученное уравнение, получим формулу для расчета диэлектрической проницаемости жидкости по известному значению  $\epsilon_{\text{к}}$  калибровочной жидкости:

$$\epsilon = 1 + (\epsilon_{\text{к}} - 1) \left( \frac{C_{01} - C_{02}}{C_{01} - C_{0\text{к}}} \right). \quad (32.6)$$

### 3. Порядок выполнения работы

#### 1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

Номер ячейки и название жидкости	$C_{01},$	$C_{0\text{к}},$	$C_{02},$	$\epsilon_{\text{к}}$ и название калибровочной жидкости	$\epsilon$

2. По инструкции в приложении к установке ознакомьтесь с назначением элементов управления куметра, порядком его включения и проведения измерений.

3. Подсоедините к куметру пустую ячейку через коаксиальный кабель. По инструкции куметра настройте контур в резонанс по максимальному отклонению стрелки  $Q$ -вольтметра и занесите отсчет емкости  $C_{01}$  в таблицу.

4. Подсоедините к куметру ячейку с калибровочной жидкостью, проницаемость которой  $\epsilon_k$  известна (значение  $\epsilon_k$  указано на ячейке). Настройте куметр в резонанс и занесите отсчет  $C_{0k}$  по шкале куметра в таблицу.

5. Выполните измерения емкости для ячеек с жидкостями, номера которых указаны в таблице вариантов, соответствующих номерам звеньев, значения  $C_{01}$  для каждой жидкости занесите в таблицу.

6. По формуле (32.6) вычислите  $\epsilon$  исследуемых жидкостей и сравните их со справочными значениями.

7. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды диэлектриков существуют? Их краткая характеристика. 2. В чем заключается сущность процессов поляризации диэлектриков? 3. Какие виды поляризации вы знаете? Каковы особенности этих видов поляризации? 4. Какими величинами характеризуется поляризация диэлектриков? 5. Для каких целей могут быть использованы данные измерений диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  вещества? 6. Выведите формулу (32.6) для расчета  $\epsilon$  жидкого диэлектрика.

## Лабораторная работа № 33 ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

**Цель работы:** освоить *осциллографический метод* исследования поляризации сегнетоэлектриков; изучить зависимость электрического смещения  $D$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  сегнетоэлектрика от напряженности  $E$  электрического поля.

## 1. Теоретическое введение

Существует группа кристаллических диэлектриков, для которых характерно резкое повышение диэлектрической проницаемости в некоторой области температур. Впервые такое поведение вещества в электрическом поле было обнаружено сотрудниками И. В. Курчатова при изучении свойств сегнетовой соли (двойная натрий-калиевая соль винной кислоты  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). Это и послужило в дальнейшем основанием для выделения специального класса диэлектриков – сегнетоэлектриков. В настоящее время известно несколько сотен соединений, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами. Группу сегнетоэлектрических материалов существенно расширяют и дополняют твердые растворы на основе различных соединений. Подобные растворы часто отличаются по своим свойствам от их ингредиентов. Сегнетоэлектрическими свойствами обладают кристаллы некоторых фосфатов и арсенатов, нитратов и солей глицина и бетаина, нитритов, двойных и сложных окислов, других соединений, содержащих почти все элементы таблицы Менделеева. К этому классу веществ относятся, например, титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ), дигидроортофосфат калия ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), титанат свинца ( $\text{PbTiO}_3$ ), ниобат калия ( $\text{KNbO}_3$ ) и др. Сегнетоэлектрические кристаллы характеризуются многообразием структурных типов и химического состава, что свидетельствует о различии молекулярных механизмов возникновения спонтанной поляризации.

Сегнетоэлектрики отличаются от остальных диэлектриков рядом характерных особенностей:

- в то время как у обычных диэлектриков значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  составляет несколько единиц, достигая в виде исключения нескольких десятков (у воды, например,  $\epsilon = 81$ ), диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков бывает порядка нескольких тысяч. Например, для титаната бария  $\epsilon$  имеет значение около 2000 (при  $t = 120^\circ\text{C}$ ) и 6000–7000 (при  $t = 80^\circ\text{C}$ );

- для сегнетоэлектриков отсутствует линейная зависимость между вектором поляризации  $\vec{P}$  и напряженности  $\vec{E}$  электрического поля. Следовательно, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  (и диэлектрическая восприимчивость  $\chi$ ) сегнетоэлектриков оказывается зависящей от напряженности поля (рис. 33.1). Для остальных диэлектриков  $\epsilon$  (и  $\chi$ ) не зависит или слабо зависит от напряженности  $E$  электрического поля;

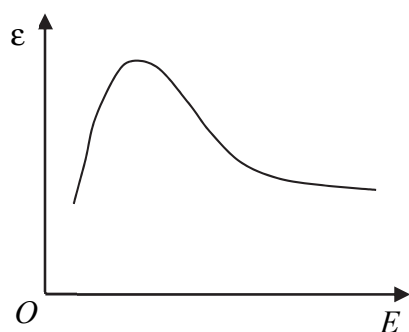


Рис. 33.1

• для сегнетоэлектриков характерно явление *диэлектрического гистерезиса* (от греч. *chysteresis* – запаздывание). При изменении внешнего электрического поля изменение поляризованности  $P$  (и электрического смещения  $D$ ) сегнетоэлектрика отстает от изменения напряженности  $E$  электрического поля. В результате гистерезиса значения  $P$  (и  $D$ ) определяются

не только величиной напряженности  $E$  в данный момент, но и предшествующими значениями, т. е. зависят от предыстории диэлектрика (от его предшествующих состояний поляризации).

При циклических изменениях электрического поля зависимость поляризованности  $P$  от напряженности поля  $E$  изображается кривой (рис. 33.2), называемой *петлей гистерезиса*. При повышении напряженности  $E$  внешнего поля увеличение поляризованности  $P$  первоначально неполяризованного образца определяется кривой 1, которая не линейна. Кривая 1 называется *основной кривой поляризации* сегнетоэлектрика. Если затем уменьшать  $E$ , то имеет место «запаздывание» в уменьшении поляризованности  $P$  (кривая 2). При  $E = 0$  поляризованность  $P = P_{\text{ост}}$  (остаточная поляризация).

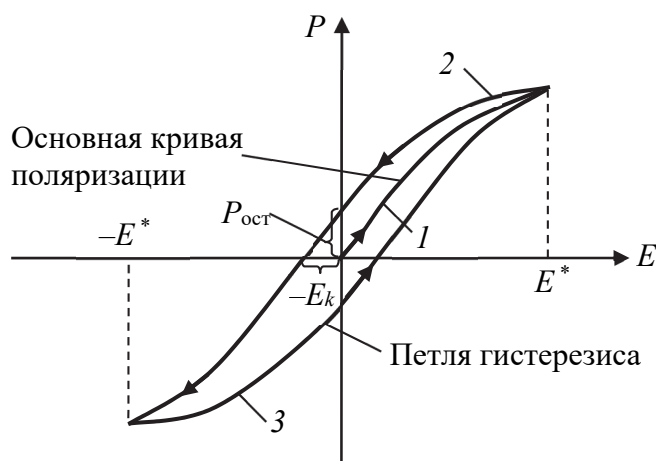


Рис. 33.2

Для снятия остаточной поляризации нужно создать электрическое поле противоположного направления и напряженностью  $E = -E_k$ . Величина  $E_k$  называется *коэрцитивной силой* (от лат. *coercitio* –

удерживание). Дальнейшее уменьшение значения напряженности приводит к возникновению поляризации противоположного направления, а последующее уменьшение модуля  $E$  вновь характеризуется «запаздыванием» в изменении значения  $P$  (кривая 3). В результате периодического изменения электрического поля  $E$  (от  $-E^*$  до  $E^*$ ) кривые 2, 3 для поляризованности  $P$  образуют характерную петлю гистерезиса;

- сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры. При температурах, превышающих определенное значение  $T_K$ , различное для разных веществ, эти свойства исчезают. При достижении этой температуры имеет место превращение сегнетоэлектрика (фазовый переход 2-го рода) в обычный полярный диэлектрик. Указанная температура называется *температурой* (или *точкой*) *Кюри*. Например, для титаната бария точка Кюри лежит около  $80^\circ\text{C}$ , а для сегнетовой соли существуют две точки Кюри ( $+22,5^\circ\text{C}$  и  $-15^\circ\text{C}$ ), и сегнетоэлектрические свойства наблюдаются только при температурах, лежащих между этими точками.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что поляризация сегнетоэлектриков является следствием взаимодействия всех молекул сегнетоэлектрика, в связи с чем диполи элементарных ячеек кристалла выстраиваются в определенном направлении под действием внутреннего электрического поля, созданного соседними молекулами сегнетоэлектрика. При этом образуются самопроизвольно поляризованные области – *домены*, в пределах которых все диполи ориентированы в одном направлении. Эта *спонтанная* (*самопроизвольная*) поляризация соответствует минимуму энергии домена.

При отсутствии внешнего поля дипольные моменты доменов расположены хаотически и макроскопический образец сегнетоэлектрика не поляризован ( $P = 0$ ) (рис. 33.3, *а*). Если такой сегнетоэлектрик поместить во внешнее электрическое поле напряженностью  $E$ , то происходит преимущественное увеличение тех доменов, дипольные моменты которых ориентированы в направлении поля, а также уменьшение размеров доменов с противоположной ориентацией дипольных моментов (рис. 33.3, *б*). Образец оказывается поляризованным. Сначала при увеличении напряженности внешнего поля происходит обратимый рост границ доменов, ориентированных по полю; при дальнейшем возрастания поля уже происходит необратимый рост границ; далее происходит переворачивание

доменов, ориентированных против поля, в направлении внешнего поля. В сильных полях наступает явление *насыщения*, и весь образец будет представлять собой один макродомен (рис. 33.3, в). При температуре  $T > T_K$  вследствие теплового движения атомов и молекул доменная структура разрушается.

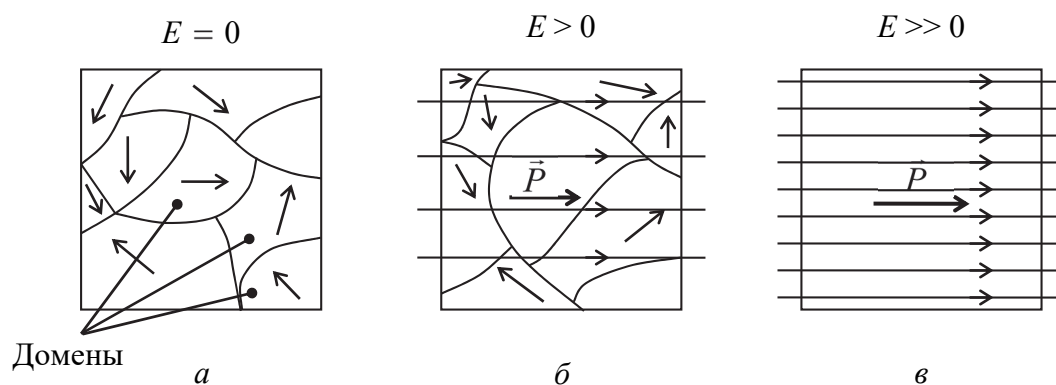


Рис. 33.3

Сегнетоэлектрики используют для изготовления малогабаритных конденсаторов большой емкости, для модуляции частоты электромагнитных колебаний, в стабилизаторах тока и напряжения, в пьезоэлектрических преобразователях и др.

## 2. Описание установки и метода измерений

Электрические свойства сегнетоэлектриков в переменных полях обычно изучают *осциллографическим методом*, сущность которого состоит в измерении параметров петли диэлектрического гистерезиса, наблюдаемой на экране осциллографа. Схема цепи для изучения электрических свойств сегнетоэлектриков этим методом приведена на рис. 33.4. Исследуемый образец в форме плоскопараллельной пластины толщиной  $d$  с нанесенными на нее токопроводящими электродами площадью  $S$  образует плоский конденсатор емкостью  $C_1 = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d}$ . Этот конденсатор последовательно соединен с конденсатором емкостью  $C_2$ , причем  $C_2 \gg C_1$ .

На конденсаторы подается переменное напряжение  $U(t)$  через делитель напряжения, состоящий из сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Величину напряжения  $U(t)$  можно изменять, используя переменный резистор  $R_3$ . При прохождении переменного тока на обкладках после-

довательно соединенных конденсаторов в каждый момент времени образуются одинаковые по величине заряды ( $q = CU$ ). Поэтому

$$C_1 U_1^*(t) = C_2 U_2^*(t) \Rightarrow U_2^*(t) = \frac{C_1}{C_2} U_1^*(t), \quad (33.1)$$

где  $U_1^*$  и  $U_2^*$  – напряжения на емкостях  $C_1$  и  $C_2$  соответственно.

Поскольку  $C_1 \ll C_2$ , то  $U_2^* \ll U_1^*$ , поэтому  $U_1^* = U - U_2^*$ , практически мало отличается от напряжения  $U(t)$ , т. е.

$$U(t) \cong U_1^*(t) = E(t)d, \quad (33.2)$$

где  $E(t)$  – мгновенное значение напряженности электрического поля в образце.

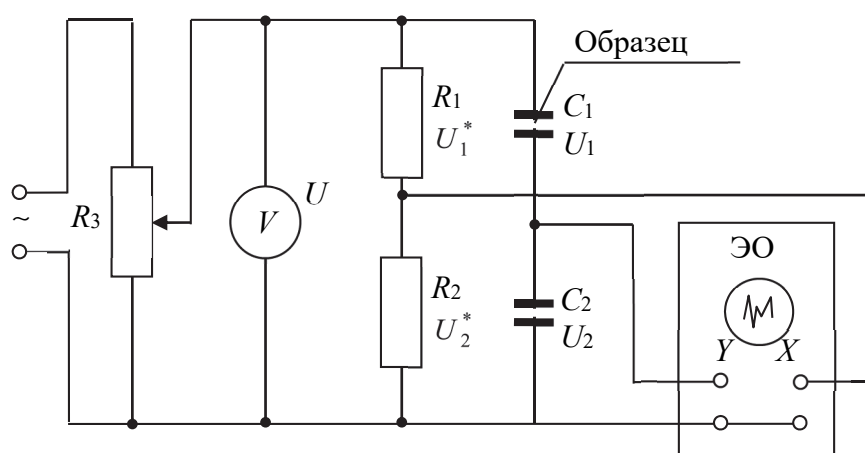


Рис. 33.4

Из рис. 33.4 видно, что на вход  $X$  осциллографа ЭО подается напряжение

$$U_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U(t) \approx \frac{R_2 d}{R_1 + R_2} E(t). \quad (33.3)$$

Таким образом, горизонтальная развертка электронного луча на экране осуществляется напряжением  $U_2(t)$ , которое пропорционально напряженности  $E$  поля в сегнетоэлектрическом образце.

На вход  $Y$  осциллографа подается напряжение  $U_2^*$  конденсатора  $C_2$ , которое с учетом соотношений (33.1), (33.2) и формулы для емкости плоского конденсатора ( $C_1 = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d}$ ) выражается через электрическое смещение  $D = \epsilon_0 \epsilon E$  и поляризованность  $P = \epsilon_0 \alpha E$ :

$$U_2^*(t) \cong \frac{C_1}{C_2} U(t) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{C_2} E(t) = \frac{S}{C_2} D(t) \approx \frac{S}{C_2} P(t). \quad (33.4)$$

Здесь учтено, что диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 1 + \varepsilon$  ( $\varepsilon$  – диэлектрическая восприимчивость) для сегнетоэлектриков много больше единицы, поэтому можно считать  $\varepsilon \cong \varepsilon$  ( $D \cong P$ ). Следовательно, вертикальная развертка электронного луча на экране осуществляется напряжением  $U_2^*(t)$ , которое пропорционально электрическому смещению  $D$  (или поляризованности  $P$ ) сегнетоэлектрического образца.

В результате сложения сигналов  $U_2(t)$  и  $U_2^*(t)$  на экране ЭО наблюдается изображение замкнутой кривой, воспроизводящей в некотором масштабе петлю гистерезиса. Для определения масштаба изображения необходимо выполнить соответствующую калибровку осей экрана.

Для этого надо иметь в виду, что при подаче переменного напряжения на один из входов осциллографа ( $X$  или  $Y$ ) на его экране будет наблюдаться светящаяся линия, длина  $l$  которой определяется удвоенной амплитудой этого сигнала. Отключим вход  $Y$  (см. рис. 33.4). Тогда на экране ЭО будем наблюдать горизонтальную светящуюся линию длиной  $l_x$ . Согласно (33.3) амплитуда сигнала

$$U_{m2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_m d, \quad (33.5)$$

где  $E_m$  – амплитудное значение напряженности поля в образце. С другой стороны, амплитуда сигнала определяется выражением

$$U_{m2} = \frac{\delta_x l_x}{2}, \quad (33.6)$$

где  $\delta_x$  – чувствительность канала  $X$  осциллографа (В/дел), т. е. цена большого деления экрана осциллографа для напряжения  $U_2$  (горизонтальная ось). Приравнивая выражения (33.5) и (33.6), получаем

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} E_m d = \frac{\delta_x l_x}{2} \Rightarrow E_m = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2 d} \delta_x \frac{l_x}{2} \quad (33.7)$$

или

$$E_m = \alpha_E x; \quad x = \frac{l_x}{2}; \quad \alpha_E = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d} \delta_x, \quad (33.8)$$

где  $x$  – координата вершины петли на экране (в больших делениях горизонтальной шкалы);  $\alpha$  – масштабный множитель, связывающий координату  $x$  вершины петли и амплитудное значение напряженности  $E_m$  поля в сегнетоэлектрике.

Если отключим вход  $X$ , то на экране ЭО будем наблюдать вертикальную светящуюся линию длиной  $l_y$ . Согласно (33.4) амплитуда сигнала

$$U_{m2}^* = \frac{S}{C_2} D_m \approx \frac{S}{C_2} P_m, \quad (33.9)$$

где  $D_m$  и  $P_m$  – амплитудные значения электрического смещения и поляризованности диэлектрика, соответственно.

Так как

$$U_{m2} = \frac{\delta_y l_y}{2}, \quad (33.10)$$

где  $\delta_y$  – чувствительность канала  $Y$  осциллографа (В/дел), то

$$\frac{S}{C_2} D_m \approx \frac{S}{C_2} P_m = \frac{\delta_y l_y}{2} \Rightarrow D_m \approx P_m = \frac{C_2}{S} \delta_y \frac{l_y}{2}, \quad (33.11)$$

или

$$D_m \approx P_m = \alpha_D y; \quad y = \frac{l_y}{2}; \quad \alpha_D = \frac{C_2}{S} \delta_y, \quad (33.12)$$

где  $y$  – координата вершины петли на экране (в больших делениях вертикальной шкалы);  $\alpha_D$  – масштабный множитель, связывающий координату  $y$  вершины и амплитудное значение электрического смещения  $D$  поля в сегнетоэлектрике (или поляризованности  $P$  образца).

В общем случае размеры и форма петли диэлектрического гистерезиса зависят от природы образца, его температуры, а также от амплитуды приложенного напряжения  $U$ . Если оси экрана осциллографа *прокалиброваны*, т. е. определены значения  $\delta_x$  и  $\delta_y$ , то можно, определив координаты  $x$  и  $y$  вершины петли, по формулам (33.8), (33.12) рассчитать  $E_m$  и  $D_m$ , а затем найти диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  при заданном значении амплитуды напряженности поля ( $D_m = \epsilon_0 \epsilon E_m$ ).

Блок-схема лабораторной установки изображена на рис. 33.5.

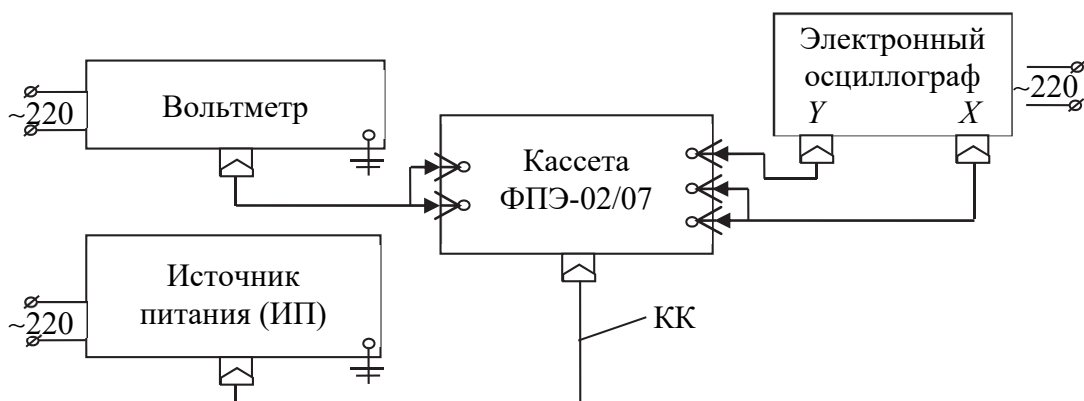


Рис. 33.5

В передней части кассеты ФПЭ-02/07 расположена панель, на которой крепятся элементы  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$  и  $R_2$ . Эти элементы и переменный резистор  $R_3$  соединены между собой согласно схеме на рис. 33.4. Ручка «Рег.  $U$ » потенциометра  $R_3$  выведена на лицевую панель кассеты. К разъему кассеты с помощью коаксиального кабеля (КК) подключен универсальный источник питания (ИП). В этой работе используется его канал «100 В»; частота переменного напряжения 50 Гц. К гнездам «РV» кассеты подключается вольтметр, а гнезда «РО» служат для подсоединения соответствующих входов электронного осциллографа.

Схема установки и ее технические данные ( $R_1$ ;  $R_2$ ;  $C_2$ ;  $d$ ;  $S$ ;  $\delta_x$ ) приведены в приложении к лабораторной работе.

### 3. Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

$R_1 =$ ; $R_2 =$ ; $C_2 =$ ; $d =$ ; $S =$ ; $\delta_x =$ ; $\delta_y =$						
№ измерения	$U,$	$x,$	$y,$	$E_m,$	$D_m,$	$\varepsilon$

2. По схеме, приведенной на установке, проверьте соединение приборов. Технические данные установки занесите в таблицу. Уясните назначение всех приборов и устройств. По инструкциям в приложении к установке подготовьте вольтметр и электронный осцил-

логграф к работе. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите приборы к сети.

3. Постепенно увеличивая напряжение (вращая по часовой стрелке ручку «Рег.  $U$ » источника питания) от нуля до максимального значения, проследите за изменением формы и размеров петли гистерезиса. С помощью ручки ЭО «В/дел» канала  $Y$  подберите чувствительность  $\delta_y$  так, чтобы при максимальном напряжении  $U$  изображение петли занимало примерно  $2/3$  экрана. По положению ручки «В/дел» определите чувствительность канала  $\delta_y$  и занесите это значение в таблицу (положение ручки «В/дел» канала  $Y$  не изменяйте до окончания измерений).

4. Подайте в измерительную цепь максимальное напряжение  $U$ . С помощью ручек управления « $\Phi$ » и « $\leftrightarrow$ » ЭО расположите наблюдаемую петлю гистерезиса симметрично относительно осевых линий. Определите в *больших делениях* шкалы экрана осциллографа координаты  $x$  и  $y$  одной из вершин петли и занесите их значения в таблицу.

5. Уменьшая напряжение на  $\sim 5$  В (а при малых значениях  $U$  — на 2–3 В), выполните каждый раз аналогичные измерения координат  $x$  и  $y$ . Измерения проводите до тех пор, пока одна из светящихся линий  $l_x$  или  $l_y$  на экране ЭО не превратится в точку.

6. Отключите все приборы установки от сети.

7. По формулам (33.8) и (33.12) рассчитайте масштабные множители  $\alpha_E$ ,  $\alpha_D$  и значения  $E_m$  и  $D_m$  при всех значениях напряжения  $U$ .

8. Для каждой пары значений  $E_m$  и  $D_m$  с помощью формулы  $D_m = \epsilon_0 \epsilon E_m$  рассчитайте диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  образца.

9. Постройте графики зависимостей  $D_m = f(E_m)$  и  $\epsilon = f(E_m)$ .

10. Полученные значения  $\epsilon$  сравните по порядку величины со справочными значениями для сегнетоэлектриков.

11. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества относятся к сегнетоэлектрикам? Каковы их основные свойства? 2. В чем заключается сущность явления диэлектрического гистерезиса? 3. Что такое коэрцитивная сила, остаточная поляризованность? 4. Что такое домены? Как происходит поляризация сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле? 5. Что такое точка Кюри? 6. Объясните сущность осциллографического метода изучения диэлектрического гистерезиса. 7. Как определить значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  по кривым гистерезиса?

## Лабораторная работа № 34 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА УИТСТОНА

**Цель работы:** изучить законы Ома и правила Кирхгофа для электрических цепей постоянного электрического тока; освоить мостовой метод измерения сопротивления  $R$ .

### 1. Теоретическое введение

*Электрическим током* называется любое упорядоченное движение электрических зарядов. В проводнике под действием приложенного электрического поля свободные электрические заряды перемещаются: положительные – по полю, отрицательные – против поля, т. е. в проводнике возникает электрический ток, называемый током *проводимости*. Свободными носителями электрических зарядов в металлах являются электроны, в электролитах – положительные и отрицательные ионы, в газах – электроны и положительные ионы, в полупроводниках – электроны и дырки.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо наличие: а) свободных носителей тока, способных перемещаться упорядоченно; б) электрического поля, энергия которого должна каким-то образом восполняться.

Количественной характеристикой электрического тока является *сила тока*  $I$  – физическая величина, численно равная электрическому заряду, прошедшему через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (34.1)$$

Если сила тока с течением времени не изменяется, то такой электрический ток называется *постоянным*.

Участок электрической цепи, не содержащий источников тока, называется *однородным* (рис. 34.1). Для такого участка выполняется закон Ома для однородного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R_{12}} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}, \quad (34.2)$$

где  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – разность потенциалов на концах участка 1–2 цепи;  $R$  – сопротивление участка цепи.

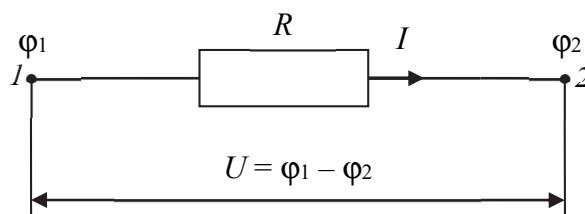


Рис. 34.1

Этот закон экспериментально открыл немецкий физик Георг Ом: сила тока  $I$  в проводнике прямо пропорциональна напряжению  $U$  на его концах и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению  $R$  проводника (участка).

Если в проводнике создать электрическое поле и не принять мер для его поддержания, то перемещение носителей тока приведет очень быстро к тому, что потенциалы всех точек цепи станут одинаковыми и поле внутри проводника исчезнет, а ток прекратится. Для того чтобы поддерживать ток достаточно длительное время, нужно от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить приносимые сюда заряды, а к концу с большим потенциалом непрерывно их подводить (разделение разноименных зарядов), т. е. необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов. Такое устройство называется *источником электрического тока*. В источниках электрического тока на носители зарядов действуют силы неэлектростатического происхождения, которые называются *сторонними*. Они могут быть обусловлены химическими процессами, вихревыми электрическими полями, диффузией носителей заряда в неоднородной среде и т. д.

Физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда в цепи или на ее участке, называется *электродвижущей силой (ЭДС)* источника тока:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (34.3)$$

Эта работа совершается за счет энергии, затрачиваемой в источнике тока.

Участок электрической цепи, содержащий последовательно соединенные резисторы и источники тока, называется *неоднородным* (рис. 34.2).

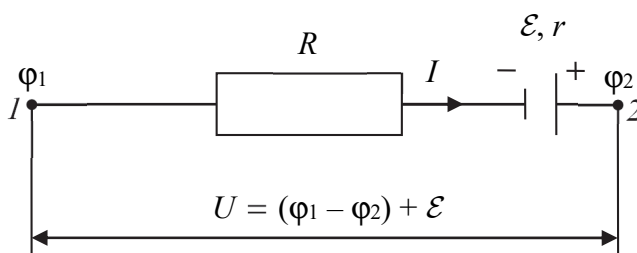


Рис. 34.2

Для такого участка выполняется закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R_{12}} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \mathcal{E}}{R + r}, \quad (34.4)$$

где  $\mathcal{E}$  – электродвижущая сила источника тока с внутренним сопротивлением  $r$ .

Если электрическую цепь на рис. 34.2 замкнуть, то для нее будет выполняться закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (34.5)$$

где  $R$  – сопротивление внешнего участка цепи.

Для расчета разветвленных электрических цепей используют правила Кирхгофа.

*Первое правило Кирхгофа.* Записывается для узлов разветвленной цепи и основывается на законе сохранения заряда. Согласно этому правилу, алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (34.6)$$

*Узлом* называют такую точку разветвленной цепи, в которой сходятся три и более проводника. Токи, направленные к узлу, считаются положительными, а токи, направленные от узла, – отрицательными.

*Второе правило Кирхгофа.* Записывается для любых замкнутых контуров разветвленной цепи и основывается на законах Ома для однородного и неоднородного участков цепи. Согласно этому правилу, алгебраическая сумма произведений сил токов  $I_i$  на сопротивления  $R_i$  соответствующих участков замкнутого контура раз-

ветвленной цепи равна алгебраической сумме ЭДС, содержащихся в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k. \quad (34.7)$$

Если направление тока совпадает с направлением обхода контура (выбор этого направления произволен), то сила тока  $I$  берется со знаком «+», в противоположном случае – со знаком «-». Если источник тока создает ток, направленный в сторону обхода контура (при обходе контура внутри источника мы идем от отрицательного полюса источника к положительному), то его ЭДС берется со знаком «+», в противоположном случае – со знаком «-».

## 2. Описание установки и метода измерений

*Мост Уитстона* состоит из четырех резисторов, соединенных в замкнутый четырехугольный контур (рис. 34.3), каждая сторона которого называется *плечом* моста. В одну (*измерительную*) диагональ такого контура включается гальванометр  $G$ , а в другую – источник постоянного тока с электродвижущей силой. При произвольных значениях сопротивлений  $R_1, R_2, R_3, R_4$  в этих резисторах будут протекать токи силой  $I_1, I_2, I_3, I_4$  соответственно. И в измерительной диагонали гальванометр  $G$  покажет некоторую силу тока  $I_G$ . Такой мост называется *неуравновешенным*. Однако сопротивления плеч моста можно подобрать так, чтобы ток в цепи гальванометра отсутствовал ( $I_G = 0$ ). Такой мост называется *уравновешенным*. Условие  $I_G = 0$  достигается при определенном соотношении между сопротивлениями плеч моста. Установим это соотношение.

Согласно *второму правилу Кирхгофа*, для контура  $ABDA$  (см. рис. 34.3):

$$I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0, \text{ или } I_1 R_1 = I_3 R_3; \quad (34.8)$$

для контура  $BCDB$ :

$$I_2 R_2 - I_4 R_4 = 0, \text{ или } I_2 R_2 = I_4 R_4. \quad (34.9)$$

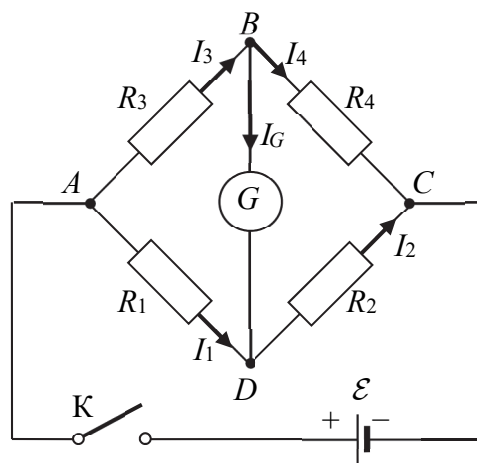


Рис. 34.3

Если разделим выражение (34.8) на (34.9), то получим

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_3 R_3}{I_4 R_4}. \quad (34.10)$$

Применим первое правило Кирхгофа для узлов  $D$  и  $B$ :

$$I_3 - I_4 - I_G = 0 \text{ и } I_1 - I_2 + I_G = 0. \quad (34.11)$$

Так как ток в измерительной диагонали отсутствует ( $I_G = 0$ ), то

$$I_3 = I_4 \text{ и } I_1 = I_2. \quad (34.12)$$

Учитывая соотношения (34.12), получаем

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (34.13)$$

Таким образом, используя уравновешенный мост Уитстона, можно по трем известным сопротивлениям определить неизвестное, например сопротивление  $R_3$ . Из условия равновесия (34.13) следует, что

$$R_x = R_3 = R_4 \frac{R_1}{R_2}. \quad (34.14)$$

На практике при использовании соотношения (34.14) резисторы с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  обычно заменяют реохордом (рис. 34.4). Реохорд представляет собой калиброванную проволоку с большим удельным сопротивлением  $\rho$ , по которой может скользить подвижный контакт  $D$ . Если собрать цепь, состоящую из реохорда  $AC$ , неизвестного сопротивления  $R_x$  и магазина сопротивлений  $R_M$ , то процесс уравнивания моста значительно упрощается: необходимо при заданном значении  $R_M$  передвигать контакт  $D$  до тех пор, пока стрелка гальванометра при включенном источнике тока не установится на нулевом делении либо при заданном положении контакта  $D$  нужно изменять сопротивление  $R_M$  до исчезновения тока в измерительной диагонали.

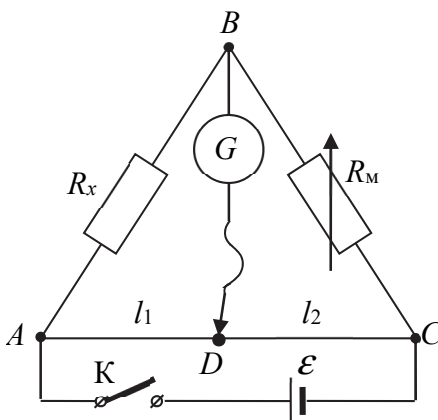


Рис. 34.4

Поскольку  $R = \rho \frac{l}{S}$  (где  $\rho$  – удельное сопротивление материала реохорда, а  $S$  – площадь его поперечного сечения), то  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$ , где  $l_1$  и  $l_2$  – длины частей реохорда, на которые его делит контакт  $D$  в заданном положении. Тогда с учетом того, что  $R_3 = R_x$ ,  $R_4 = R_m$ , формула (34.14) примет вид

$$R_x = R_m \frac{l_1}{l_2}. \quad (34.15)$$

Точность измерения сопротивления  $R_x$  с помощью уравновешенного моста Уитстона достаточно высока, если длины  $l_1$  и  $l_2$  плеч реохорда мало отличаются друг от друга.

### 3. Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

Измеряемое сопротивление	$l_1$ ,	$l_2$ ,	$R_m$ ,	$R_x$ ,	$R_{ср}$ ,
$R_{1x}$					

2. Соберите электрическую цепь согласно рис. 34.4. В качестве резистора с сопротивлением  $R_x$  включите резистор с неизвестным сопротивлением  $R_{1x}$ . После проверки преподавателем или лаборантом собранной схемы приступите к измерениям.

3. Установите подвижный контакт  $D$  посередине реохорда ( $l_1 = l_2$ ) и, замкнув цепь ключом  $K$ , выберите такое сопротивление  $R_m$  магазина, чтобы в измерительной диагонали гальванометра  $G$  ток исчез. Значение  $R_m$  занесите в таблицу.

4. Увеличивая и уменьшая  $l_1$  на  $\Delta l$  ( $\Delta l = 5 - 10$  см), опять уравновесьте мост Уитстона. Значения  $l_1$ ,  $l_2$  и  $R_m$  занесите в таблицу.

5. Аналогично выполните измерения сопротивлений второго и третьего резисторов, а также общего сопротивления при их последовательном  $R_x^{\text{послед}}$  и параллельном  $R_x^{\text{пар}}$  соединении.

6. По формуле (34.15) для каждого измеряемого сопротивления найдите три значения, соответствующих трем разным значениям  $I_1$ , и рассчитайте среднее значение измеряемого сопротивления.

7. Используя средние значения сопротивлений  $R_{1x}^{cp}$ ,  $R_{2x}^{cp}$  и  $R_{3x}^{cp}$ , рассчитайте теоретически их общее сопротивление по формулам для последовательного и параллельного соединения резисторов. Сравните данные теоретических расчетов с результатами экспериментальных измерений и определите их относительную погрешность.

8. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое электрический ток, сила тока, ЭДС, разность потенциалов? 2. От чего зависит сопротивление проводника? 3. Выведите формулы для расчета сопротивления участка цепи, состоящего из последовательно или параллельно соединенных резисторов. 4. Какой участок цепи называется однородным, неоднородным? 5. Сформулируйте и поясните законы Ома. 6. Сформулируйте и поясните правила Кирхгофа. 7. В чем состоит сущность мостового метода измерения сопротивления? 8. Выведите формулы (34.14) и (34.15) для расчета неизвестного сопротивления мостовым методом.

## Лабораторная работа № 36 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ВИДЕМАНА – ФРАНЦА

**Цель работы:** изучить температурную зависимость сопротивления  $R$  и удельной проводимости  $\sigma$  металла; определить число Лоренца в законе Видемана – Франца и температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  металла.

### 1. Теоретическое введение

Высокая электропроводность металлов объясняется наличием в них огромного числа свободных носителей заряда – электронов проводимости, которые совершают хаотическое тепловое движение, перемещаясь по всему объему кристалла. Существование свободных электронов в металлах можно объяснить следующим обра-

зом: при образовании кристаллической решетки металла (в результате сближения изолированных атомов) валентные электроны, сравнительно слабо связанные с атомными ядрами, отрываются от атомов и могут перемещаться по всему объему. Это представление о природе носителей тока в металлах легло в основу классической электронной теории проводимости металлов, созданной немецким физиком Друде П. и разработанной впоследствии голландским физиком Лоренцем Х.

Согласно классической электронной теории, электроны проводимости рассматриваются как электронный газ, обладающий свойствами идеального одноатомного газа. В процессе движения электроны сталкиваются преимущественно с ионами кристаллической решетки. Поэтому можно говорить о средней длине их свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$ , которая по порядку величины должна быть равна периоду кристаллической решетки. Эти столкновения приводят к установлению теплового равновесия между электронным газом и кристаллической решеткой.

Тепловое движение электронов вследствие своей хаотичности не может привести к возникновению тока в проводнике. Если к проводнику приложить внешнее электрическое поле, то на хаотическое тепловое движение, средняя скорость которого  $\langle v \rangle$ , накладывается упорядоченное движение со средней скоростью  $\langle u \rangle$  (скоростью дрейфа). В результате этого все электроны под действием приложенного поля смещаются в сторону, противоположную вектору напряженности поля, и в проводнике возникает электрический ток. Плотность тока

$$j = ne\langle u \rangle, \quad (36.1)$$

где  $n$  – концентрация электронов проводимости в металле;  $e$  – заряд электрона. Расчеты показывают, что скорость дрейфа  $\langle u \rangle$  ( $\sim 10^{-4}$  м/с) много меньше скорости теплового движения  $\langle v \rangle$  ( $\sim 10^5$  м/с).

Изложенные представления классической электронной теории дают возможность объяснить некоторые закономерности явлений электропроводности и теплопроводности металлов.

Предположим, что при соударениях с узлами кристаллической решетки электроны полностью теряют скорость упорядоченного движения, которую они приобретают под действием внешнего электрического поля за среднее время  $\langle \tau \rangle$  свободного пробега. Если поле однородное, то на каждый электрон действует постоянная сила:

$$F = eE, \quad (36.2)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля.

Скорость упорядоченного движения электрона к концу пробега будет

$$u_{\max} = a \langle \tau \rangle = \frac{F}{m} \langle \tau \rangle = \frac{eE}{m} \langle \tau \rangle, \quad (36.3)$$

где  $a$  – ускорение электрона;  $m$  – масса электрона.

Так как электрон между соударениями движется равноускоренно, то средняя скорость дрейфа

$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} u_{\max} = \frac{eE}{2m} \langle \tau \rangle. \quad (36.4)$$

Не учитывая распределение электронов по скоростям и считая их скорость одинаковой и равной  $\langle v \rangle$  (пренебрегая скоростью дрейфа по сравнению со скоростью теплового движения), получим среднее время свободного пробега:

$$\langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle v \rangle}. \quad (36.5)$$

Тогда

$$\langle u \rangle = \frac{eE}{2m} \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle v \rangle}. \quad (36.6)$$

Подставляя (36.6) в (36.1), получим

$$j = \frac{e^2 n}{2m} \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle v \rangle} E. \quad (36.7)$$

Сравнивая уравнение (36.7) с законом Ома в дифференциальной форме  $j = \sigma E$ , получаем что

$$\sigma = \frac{e^2 n}{2m} \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle v \rangle}, \quad (36.8)$$

где  $\sigma$  есть величина, не зависящая от напряженности поля, которая называется *удельной электропроводностью* металла.

Очевидно, что электропроводность металла тем больше, чем выше концентрация электронов проводимости  $n$  и чем больше

длина их свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$ . Таким образом, согласно классическим представлениям, электрическое сопротивление металлических проводников обусловлено неупругими соударениями свободных электронов с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки.

Из экспериментов известно, что металлы обладают высокой электропроводностью и обнаруживают большую теплопроводность. Немецкие ученые Видеман Г. и Франц Р. на основании опытных данных пришли к заключению, что отношение коэффициента теплопроводности  $\kappa$  к удельной электропроводности  $\sigma$  для всех металлов при одинаковой температуре приблизительно одинаково и увеличивается пропорционально абсолютной температуре (*закон Видемана – Франца*):

$$\frac{\kappa}{\sigma} = LT, \quad (36.9)$$

где  $L$  – число Лоренца, одинаковое практически для всех металлов при комнатной и более высоких температурах.

Классическая электронная теория объясняет и эту закономерность. Действительно, электроны проводимости, перемещаясь в металле, переносят не только электрический заряд, но и присущую им энергию беспорядочного теплового движения, т. е. осуществляют перенос тепла. Так как концентрация электронов высокая, то все тепло практически переносится этими частицами, а ионы решетки принимают лишь небольшое участие в рассматриваемом процессе. Используя кинетическую теорию для коэффициента теплопроводности идеального одноатомного газа, можно получить выражение для коэффициента теплопроводности электронного газа:

$$\kappa = \frac{kn\langle \lambda \rangle \langle v \rangle}{2}, \quad (36.10)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана. Если разделим выражение (36.10) на выражение (36.8) и учтем, что  $\frac{m\langle v \rangle^2}{2} = \frac{3kT}{2}$ , то получим теоретическое выражение закона Видемана – Франца:

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{3k^2}{e^2} T. \quad (36.11)$$

Таким образом, число Лоренца оказывается равным  $L = \frac{3k^2}{e^2} = 2,23 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}^2 / \text{Кл}^2 \text{К}^2$ . Это значение удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Квантовая теория дает  $L = \frac{2\pi k^2}{3e^2} = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}^2 / \text{Кл}^2 \text{К}^2$ .

Классическая теория, объяснив законы Ома, Видемана – Франца и Джоуля – Ленца, не смогла объяснить целого ряда явлений, наблюдающихся на опыте:

- из формулы (36.8) вытекает, что удельное сопротивление металлов ( $\rho = 1/\sigma$ ) должно возрастать пропорционально  $\sqrt{T}$ . Этот вывод теории противоречит опытным данным, согласно которым электрическое сопротивление металлов растет пропорционально  $T$ ;

- электронный газ должен обладать молярной теплоемкостью, равной  $1,5R$ . Добавив эту величину к теплоемкости решетки, составляющей  $3R$ , получим для молярной теплоемкости металла значение  $4,5R$ . Таким образом, согласно классической электронной теории молярная теплоемкость металлов должна быть в 1,5 раза больше, чем у диэлектриков. В действительности же теплоемкость металлов не отличается заметно от теплоемкости неметаллических кристаллов;

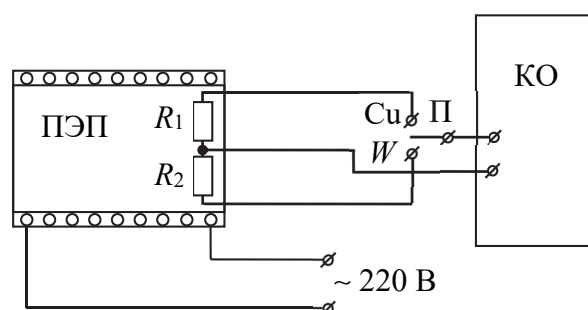
- возникли трудности при оценке средней длины свободного пробега электронов в металле. Чтобы с помощью формулы (36.8) получить значения удельной электрической проводимости металла, которые не расходились бы с опытными данными, приходится принимать среднюю длину свободного пробега электронов в сотни раз большей, чем период решетки металла, т. е. приходится предположить, что электрон проводимости проходит без соударений с ионами решетки сотни междоузельных расстояний. Такое предположение непонятно в рамках классической электронной теории.

Обоснование данного несоответствия смогла предложить лишь квантовая теория металлов. Следует отметить, что классическая электронная теория в некоторых случаях (например, при малой концентрации электронов проводимости и высокой температуре) дает качественно правильные результаты, является более простой и наглядной по сравнению с квантовой теорией.

## 2. Описание установки и метода измерений

Схема установки для измерения электрического сопротивления проводников приведена на рисунке ниже.

Проволочные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , изготовленные из исследуемых материалов, размещены внутри программируемой электрической печи (ПЭП). Печь ПЭП позволяет задавать и поддерживать требуемую температуру. Сопротивление проволочных резисторов измеряется с помощью цифрового килоомметра (КО). Переключатель (П) дает возможность подключать к килоомметру поочередно измеряемые сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ .



Удельная проводимость  $\sigma = 1/\rho$  рассчитывается по измеренному сопротивлению  $R$  с учетом формулы

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (36.12)$$

где  $S$  — площадь сечения проволочного сопротивления, а  $l$  — его длина. Коэффициент теплопроводности  $\kappa$  находится из справочных данных, представленных графически в приложении к установке.

Число Лоренца  $L$  рассчитывается с применением графического метода определения коэффициентов линейной зависимости между двумя физическими величинами с помощью графика экспериментальной зависимости  $\frac{\kappa}{\sigma} = f_1(T)$ .

Сопротивление  $R_0$  при  $0^\circ\text{C}$  и температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  металла определяются из графика экспериментальной зависимости  $R = f_2(t^\circ)$  с учетом формулы

$$R = R_0(1 + \alpha t^\circ). \quad (36.13)$$

### 3. Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

$i$	$t, ^\circ\text{C}$	$T,$	$R_1,$	$R_2,$	$\sigma,$	$\alpha,$	$\frac{\alpha}{\sigma},$

2. Ознакомьтесь с расположением и назначением отдельных приборов установки. По приложению к работе изучите инструкцию по использованию программируемой электрической печи и килоомметра. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите электропечь и килоомметр к сети.

3. С помощью цифрового килоомметра измерьте сопротивления двух проволочных резисторов при комнатной температуре  $t_1$ . Значения температуры  $t_1$  и сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  занесите в таблицу.

4. Используя инструкцию в приложении, включите нагрев электропечи. Проведите аналогичные измерения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  через каждые  $10^\circ\text{C}$ . Измерения проводите до  $90\text{--}100^\circ\text{C}$ . По окончании измерений, используя инструкцию в приложении, остановите нагрев электропечи.

5. Занесите в таблицу справочные данные для коэффициента теплопроводности  $\alpha$  одного из металлов, которые представлены в приложении в виде графика  $\alpha = f(T)$ . Для этого же металла при всех значениях температуры рассчитайте удельную электропроводность  $\sigma$ , используя формулу (36.12) (значения  $l$  и  $S$  указаны в приложении к работе).

6. Найдите отношение  $\frac{\alpha}{\sigma}$  для каждой измеренной температуры и постройте график зависимости  $\frac{\alpha}{\sigma} = f_1(T)$ . Проверьте выполняемость закона Видемана – Франца и по графику определите число Лоренца:

$$L = \frac{\Delta\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)}{\Delta T}. \quad (36.14)$$

Сравните полученное экспериментальное значение с теоретическим и найдите относительную погрешность измерения.

7. Постройте график зависимости  $R = f_2(t^\circ)$  для другого металла (диапазон температур  $t$  выберите от 0 до  $100^\circ\text{C}$ ). С помощью графика определите значения  $R_0$  (сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ) и температурного коэффициента сопротивления металла  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta t}. \quad (36.15)$$

Сравните экспериментально измеренные данные со справочными.

8. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте основные положения классической теории проводимости металлов. 2. На основе классической электронной теории выведите выражение для удельной электропроводности металлов. 3. Запишите закон Ома в дифференциальной форме. Поясните его. 4. Запишите закон Видемана – Франца. Поясните его. 5. Какие экспериментальные факты не смогла объяснить классическая теория проводимости и почему? 6. Каким образом проверена выполняемость закона Видемана – Франца для исследуемого металла? 7. Каким образом рассчитан температурный коэффициент сопротивления металла?

## Лабораторная работа № 37 ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО ДИОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

**Цель работы:** изучить явление термоэлектронной эмиссии и принцип работы вакуумного диода; измерить вольт-амперные характеристики вакуумного диода; на основании закона Богуславского – Ленгмюра определить удельный заряд электрона.

### 1. Теоретическое введение

Согласно классической электронной теории, электроны проводимости в металлах находятся в хаотическом тепловом движении. Однако установлено, что при комнатной температуре электроны не

вылетают из металла в значительном количестве. Только наиболее быстро движущиеся электроны, обладающие большой кинетической энергией, могут вырваться из металла в окружающее пространство. Для того чтобы покинуть металл (явление выхода электронов из металла в окружающую среду называют *электронной эмиссией*), электроны должны преодолеть задерживающее электрическое поле, существующее на границе металла с окружающей средой. Наличие этого поля объясняется следующими причинами. С одной стороны, выход электронов из металла в окружающую среду приводит к уменьшению количества электронов в металле и, таким образом, его поверхность оказывается положительно заряженной. С другой стороны, вылетевшие электроны создают вблизи поверхности металла электронное облако, которое вместе с наружным слоем положительных ионов решетки образует *двойной электрический слой* толщиной несколько межатомных расстояний. Разность потенциалов  $\Delta\phi$  электрического поля двойного слоя называется *поверхностным скачком потенциала*. Вне двойного электрического слоя электрического поля нет, и потенциал среды будет равен нулю. Поэтому вылетающему электрону необходимо затратить некоторую энергию, равную работе сил электрического поля двойного слоя  $A = e\Delta\phi$ , чтобы покинуть металл. Работа  $A$ , которую нужно совершить для удаления электрона из металла в вакуум, называется *работой выхода*. Работа выхода обычно выражается в электрон-вольтах ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). Величина работы выхода слабо зависит от температуры, но очень чувствительна к состоянию поверхности металла и его структуре.

В зависимости от того, каким способом сообщается энергия электронам, различают несколько типов электронной эмиссии. Так, если электроны получают энергию за счет нагревания тела, то говорят о *термоэлектронной эмиссии*. Явление вырывания электронов с поверхности тел (главным образом металлов) под действием падающих на поверхность тела электромагнитных волн называют *фотоэлектронной эмиссией*. Если энергия сообщается электронам при бомбардировке поверхности металла какими-либо частицами (ионами, электронами), то имеет место *вторичная электронная эмиссия*.

Явление термоэлектронной эмиссии лежит в основе работы электровакуумных приборов, таких как электронные лампы, электронно-лучевые трубки (кинескопы) и др. Простейшим электрова-

куумным прибором является двухэлектродная лампа – *диод*. Диод представляет собой стеклянный или металлический баллон, откачанный до глубокого вакуума, с двумя электродами – анодом А и катодом К. Обычно анод имеет форму цилиндра, а катод представляет собой проволочную спираль из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден и др.), расположенную на оси этого цилиндра.

При включении диода в электрическую цепь (рис. 37.1) нить накала (катод), нагреваясь до определенной температуры, будет испускать электроны, образующие вокруг катода отрицательный пространственный заряд – электронное облако. Если анодное напряжение  $U_a$  равно нулю, то облако задерживает вылетающие из катода электроны и возвращает их обратно. Однако небольшое число самых быстрых электронов все же достигает анода, поэтому в анодной цепи будет протекать очень малый ток (рис. 37.1). С увеличением анодного напряжения, измеряемого вольтметром  $V$ , все большее число электронов вытягивается из облака электрическим полем к аноду и анодный ток  $I_a$  возрастает в соответствии с участком кривой 0–1. При определенном значении  $U_a$  (температура катода предполагается постоянной) все вылетевшие из катода электроны за каждую единицу времени достигают анода и электронное облако полностью «рассасывается». Анодный ток в этом случае достигает своего максимального значения  $I_n$ , которое называется *током насыщения*. Далее ток перестает практически зависеть от анодного напряжения (участок 1–4). График зависимости анодного тока от анодного напряжения (рис. 37.2) называется *вольт-амперной характеристикой диода*. С повышением температуры катода ток насыщения растет, в то время как начальные же участки вольт-амперной характеристики (кривая 0–1–2–3) совпадают (см. рис. 37.2).

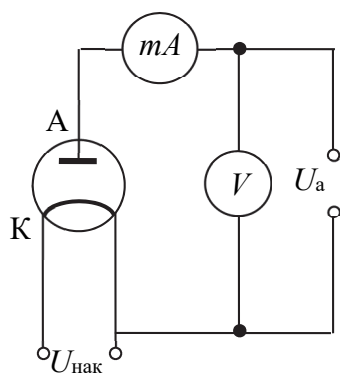


Рис. 37.1

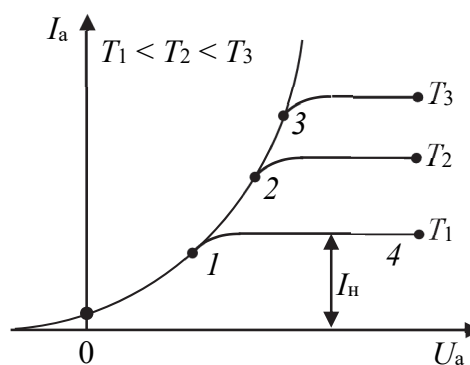


Рис. 37.2

В интервале сравнительно малых значений напряжения между анодом и катодом (при наличии пространственного заряда – кривая 0–1–2–3) зависимость  $I_a = f(U_a)$  выражается *законом Богуславского – Ленгмюра*, или законом «трех вторых»:

$$I_a = BU_a^{3/2}, \quad (37.1)$$

где  $B$  – не зависящий от температуры коэффициент, значение которого определяется формой и размерами электродов. В случае коаксиальных цилиндрических электродов

$$B = 3,94\epsilon_0 \left( \frac{l}{r\beta^2} \right) \sqrt{\frac{e}{m}}, \quad (37.2)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $l$  – длина катода;  $r$  – радиус анода;  $\beta$  – коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода;  $e$  – заряд электрона;  $m$  – масса электрона.

Если за единицу времени катодом испускается  $n$  электронов, то величина тока насыщения  $I_n = en$ , которая является основной характеристикой термоэлектронной эмиссии катода. Величина плотности тока насыщения определяется из соотношения

$$I_n = j_n S, \quad (37.3)$$

где  $S$  – площадь эмиссионной поверхности катода. Величина плотности тока насыщения определяется формулой *Ричардсона – Дешимена*:

$$j_n = B'T^2 \exp\left(-\frac{A}{kT}\right), \quad (37.4)$$

где  $B'$  – эмиссионная постоянная;  $T$  – абсолютная температура катода;  $A$  – работа выхода электрона;  $k$  – постоянная Больцмана. Из формулы (37.4) следует, что эмиссионная способность катода (т. е. плотность тока насыщения) зависит от его температуры и работы выхода электрона.

## 2. Описание установки и метода измерений

Схема экспериментальной установки для измерения вольт-амперной характеристики диода представлена на рис. 37.3. Анодное напряжение  $U_a$  подается от выпрямителя, причем его величина  $U_a$  регулируется делителем напряжения  $R_a$  и измеряется вольтмет-

ром  $V$ . Сила анодного тока  $I_a$  измеряется миллиамперметром  $mA$ , напряжение накала ( $U_{\text{нак}}$ ) подается от понижающей обмотки трансформатора выпрямителя. Величина тока накала  $I_a$  регулируется реостатом  $R_{\text{нак}}$  и измеряется амперметром  $A$ .

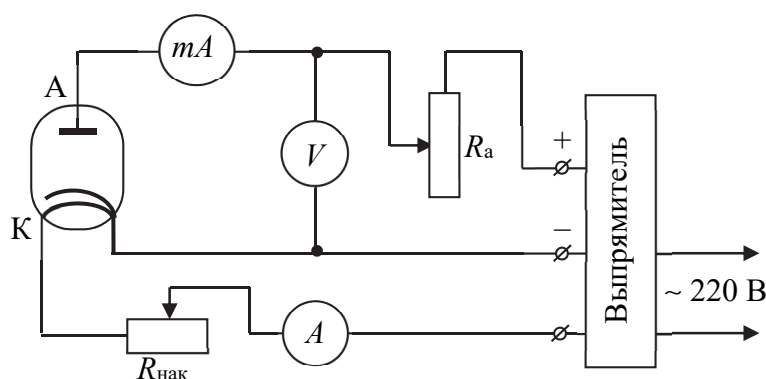


Рис. 37.3

Величина  $\frac{e}{m}$  – *удельный заряд электрона* – определяется из формулы для коэффициента пропорциональности  $B$  в законе Богуславского – Ленгмюра (37.2):

$$\frac{e}{m} = \left( \frac{r\beta^2}{3,94l} \right)^2 \frac{B^2}{\epsilon_0^2}. \quad (37.5)$$

Параметры  $l$ ,  $r$  и  $\beta$  для диода, используемого в экспериментальной установке, необходимые для расчета по формуле (37.5), указаны в приложении к лабораторной работе.

При определении удельного заряда электрона данным методом могут возникать погрешности до 20%, не зависящие от точности используемых приборов. Основные причины этих погрешностей следующие. При выводе уравнения (37.2) предполагалось, что начальные скорости электронов, испускаемых катодом, равны нулю. В действительности испущенные катодом электроны имеют распределение по скоростям в соответствии с распределением Максвелла. Погрешности будут также возникать из-за отклонений в коаксиальности системы электродов лампы. Кроме того, если в баллоне низкий вакуум, то уже при сравнительно невысоких анодных напряжениях будет происходить ионизация газа. Возникшие положительные ионы вызовут частичную

нейтрализацию отрицательного пространственного заряда, и поэтому анодный ток будет возрастать быстрее, чем это следует ожидать по закону Богуславского – Ленгмюра.

### 3. Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для внесения и обработки результатов измерений.

$i$	$U_{\text{a}},$	$U_{\text{a}}^{3/2},$	$I_{1 \text{ накл}} =$	$I_{2 \text{ накл}} =$	$I_{3 \text{ накл}} =$	$B,$	$\frac{e}{m},$	$\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{cp}},$
			$I_{\text{a}},$					

2. По приложению к лабораторной работе и схеме (рис. 37.3) проверьте, правильно ли соединены приборы и устройства, включенные в *анодную цепь* и *цепь накала* лампы. Уясните назначение этих приборов и устройств, приемы управления ими. Установите необходимый предел измерений каждого из используемых измерительных приборов и определите цену деления шкал приборов. Сопротивление реостата  $R_{\text{накл}}$  сделайте максимальным, а реостата  $R_a$  – минимальным. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите установку к сети.

3. Реостатом  $R_{\text{накл}}$  установите по амперметру  $A$  в цепи накала ток  $I_{\text{накл}}$  (значения токов накала указаны на установке). Изменяя реостатом  $R_a$  анодное напряжение  $U_a$  от 0 до 200 В через каждые 20 В, снимите показания  $I_a$  миллиамперметра и занесите их в таблицу.

4. Выполните такие же измерения еще при двух других значениях из заданного интервала токов накала  $I_{\text{накл}}$ .

5. Постройте вольтамперную характеристику диода  $I_a = f_1(U_a)$  при первом токе накала.

6. Для трех разных токов накала  $I_{\text{накл}}$  постройте три графика зависимости  $I_a = f_2(U_a^{3/2})$ . Установите, в каком интервале анодных напряжений выполняется закон Богуславского – Ленгмюра (т. е. сохраняется линейная зависимость между величинами  $I_a$  и  $U_a^{3/2}$ ).

7. Используя линейность начальных участков графиков зависимости  $I_a = f(U_a^{3/2})$ , рассчитайте значения  $B = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a^{3/2}}$  их угловых коэффициентов.

8. По формуле (37.5) рассчитайте три значения удельного заряда электрона  $\frac{e}{m}$ , используя найденные значения коэффициента  $B$ . Определите среднее значение удельного заряда  $\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{ср}}$  и сравните его со справочным значением. Рассчитайте относительную погрешность измерения.

6. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

#### 4. Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение работы выхода электрона. От чего зависит эта величина? 2. Как формируется двойной электрический слой вблизи поверхности металла? 3. Перечислите типы электронной эмиссии и приведите примеры их использования. 4. Зарисуйте схематично вольт-амперную характеристику вакуумного диода. Поясните характер зависимости. 5. В каком интервале значений анодного напряжения выполняется закон Богуславского – Ленгмюра? 6. Какая величина является характеристикой термоэлектронной эмиссии катода? 7. От каких параметров зависит значение плотности тока насыщения?

## Лабораторная работа № 38 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА

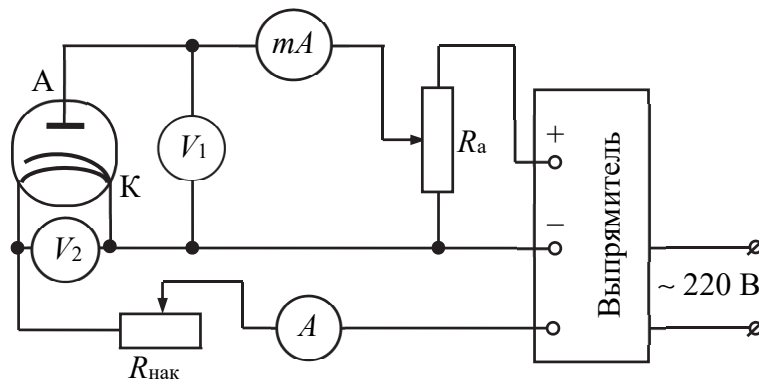
**Цель работы:** изучить явление термоэлектронной эмиссии и принцип работы вакуумного диода; измерить величину работы выхода электрона из катода вакуумного диода с помощью формулы Ричардсона – Дешмена.

### 1. Теоретическое введение

Изучите теоретическое введение к лабораторной работе № 37.

### 2. Описание установки и метода измерений

Схема лабораторной установки для измерения работы выхода электрона представлена на рисунке.



Источником необходимых напряжений для анодной цепи и цепи накала катода служит выпрямитель. Величина анодного напряжения  $U_a$  регулируется делителем  $R_a$  и измеряется вольтметром  $V_1$ , а сила анодного тока  $I_a$  измеряется миллиамперметром  $mA$ . Для измерения напряжения накала  $U_{нак}$  используется вольтметр  $V_2$ . Сила тока накала  $I_{нак}$  в цепи катода регулируется переменным резистором  $R_{нак}$  и измеряется амперметром  $A$ .

Известно, что величина плотности тока насыщения  $j_n$  может быть определена по формуле Ричардсона – Дешмена (37.4). Тогда с учетом того, что сила тока насыщения  $I_n = j_n S$  ( $S$  – площадь эмиссионной поверхности катода), можно записать

$$I_n = B'ST^2 \exp\left(-\frac{A}{kT}\right). \quad (38.1)$$

Величина работы выхода  $A$  электрона из металла практически не зависит от температуры, и в узком температурном интервале ее можно считать постоянной. Поэтому можно записать выражение (38.1) для двух различных температур катода  $T_1$  и  $T_2$ , при которых измерены величины силы тока насыщения  $I_{n1}$  и  $I_{n2}$ , соответственно:

$$I_{n1} = B'ST_1^2 \exp\left(-\frac{A}{kT_1}\right); \quad (38.2)$$

$$I_{n2} = B'ST_2^2 \exp\left(-\frac{A}{kT_2}\right). \quad (38.3)$$

Запишем отношение выражений (38.2) и (38.3), прологарифмируем его и выразим работу выхода  $A$ :

$$A = \frac{kT_1T_2}{T_2 - T_1} \left[ \ln \left( \frac{I_{н2}}{I_{н1}} \right) - 2 \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \right]. \quad (38.4)$$

Так как обычно работу выхода  $A$  выражают в электрон-вольтах ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ), перепишем формулу (38.4), учитывая значение постоянной Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж К}^{-1}$ . Таким образом, получим расчетную формулу для величины работы  $A$  (в электрон-вольтах) в следующем виде:

$$A = 8,93 \cdot 10^{-5} \frac{T_2T_1}{T_2 - T_1} \left[ \ln \left( \frac{I_{н2}}{I_{н1}} \right) - 2 \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \right]. \quad (38.5)$$

При расчете работы выхода  $A$  по формуле (38.5) необходимо знать температуру катода. В данной лабораторной работе предлагается ее определить косвенными методами. В основу этих методов положены зависимости потребляемой мощности (либо сопротивления материала) от температуры. Измерив значения  $U_{\text{нак}}$  и  $I_{\text{нак}}$ , по закону Джоуля – Ленца или закону Ома находят либо потребляемую мощность  $P_T = U_{\text{нак}} I_{\text{нак}}$ , либо сопротивление  $R_T = \left( \frac{U_{\text{нак}}}{I_{\text{нак}}} \right)$  катода при данной температуре  $T$ . Затем по графику зависимости потребляемой мощности  $P_T = f(T)$  либо сопротивления  $R_T = f(T)$  катода от температуры, которые предварительно экспериментально измерены для материала катода ламп, используемых в экспериментальной установке, определяют температуру катода. Графики указанных зависимостей приведены в приложении к лабораторной работе.

### 3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

$i$	$U_a,$	$I_{1 \text{ на к}} =$	$U_{1 \text{ на к}} =$	$I_{2 \text{ на к}} =$	$U_{2 \text{ на к}} =$	$I_{3 \text{ на к}} =$	$U_{3 \text{ на к}} =$
		$R_{T1} =$	$T_1 =$	$R_{T2} =$	$T_2 =$	$R_{T3} =$	$T_3 =$
		$I_{a1},$		$I_{a2},$		$I_{a3},$	

2. По приложению к лабораторной работе и электрической схеме (рис. 38.1) проверьте соединение приборов и устройств,

включенных в анодную цепь и цепь накала лампы. Уясните их назначение и приемы управления ими. Установите необходимый предел измерений каждого из используемых измерительных приборов и определите цену деления шкал измерительных приборов. Сопротивление реостата  $R_{\text{нак}}$  сделайте максимальным, а реостата  $R_a$  – минимальным. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите установку к сети.

3. Реостатом  $R_{\text{нак}}$  установите по амперметру  $A$  силу тока  $I_{\text{нак}}$  в цепи накала согласно значениям, указанным на установке, и измерьте вольтметром  $V_2$  соответствующее значение  $U_{\text{нак}}$ . Изменяя реостатом  $R_a$  анодное напряжение  $U_a$  от 0 до 240 В через каждые 20 В (по вольтметру  $V_1$ ), измерьте величину анодного тока  $I_a$  с помощью миллиамперметра и занесите данные в таблицу.

4. Выполните аналогичные измерения для двух других значений тока накала  $I_{\text{нак}}$ .

5. Рассчитайте сопротивления катода  $R_T$  при заданных режимах работы. По прилагаемому графику определите соответствующие значения температуры  $T$  катода.

6. Постройте вольт-амперные характеристики диода – графики зависимостей силы анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$  при заданных режимах работы лампы. Определите значения силы тока насыщения  $I_n$  для каждой из зависимостей.

7. По формуле (38.5) рассчитайте значения работы выхода электрона  $A$ , используя результаты измерений при трех рабочих температурах катода. Найдите среднее значение работы выхода  $A_{\text{ср}}$ . Сравните полученное значение со справочными данными в прил. П15.

8. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

#### 4. Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение работы выхода электрона. От чего зависит эта величина? 2. Перечислите типы электронной эмиссии и приведите примеры их использования. 3. Дайте определение явлению термоэлектронной эмиссии. 4. Поясните ход измеренных вольт-амперных характеристик вакуумного диода при различных температурах. Чем обусловлены различия между ними? 5. От чего зависит величина плотности тока насыщения? 6. Опишите способы косвенного определения температуры катода лампы при различных режимах ее работы.

## Лабораторная работа № 39

### ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ЗЕЕБЕКА

**Цель работы:** изучить явления, возникающие при контакте различных металлов, и природу термоэлектрических явлений; освоить методику градуировки термопары и определить дифференциальную ЭДС термопары.

#### 1. Теоретическое введение

В 1795 г. итальянский физик Вольта А. обнаружил, что при контакте двух различных металлов между ними возникает разность потенциалов, которая была названа *контактной разностью потенциалов*. В результате обобщения экспериментальных фактов Вольта установил два закона (*законы Вольты*):

- при соединении двух проводников, изготовленных из различных металлов, между ними возникает контактная разность потенциалов, которая зависит только от их химического состава и температуры;

- разность потенциалов между концами разомкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от химического состава промежуточных проводников и будет равна контактной разности потенциалов, возникающей при непосредственном соединении крайних проводников.

Действительно, при контакте двух разнородных проводников между ними возникает обмен электронами проводимости, который приводит к возникновению *внутренней контактной разности потенциалов*  $\Delta\varphi_{12}$ . Ее величина зависит от природы соприкасающихся проводников и их температуры. Внутренняя контактная разность потенциалов, возникающая при контакте двух металлов, может быть объяснена на основе представлений об электронах проводимости в металлах как об электронном идеальном газе. Согласно молекулярно-кинетической теории давление идеального газа  $p = n_0 k T$ , где  $n_0$  – концентрация молекул (т. е. в рассматриваемом случае – число электронов);  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура. Поэтому даже при одной и той же температуре давление электронного газа в двух металлах будет различным, если  $n_{01} \neq n_{02}$ , и, как следствие, возникает перепад давлений, приводящий к

диффузии электронов из одного металла в другой. Диффузия будет происходить до тех пор, пока электрическое поле, возникающее в результате перемещения электронов, не компенсирует перепад давлений. При этом величина внутренней контактной разности потенциалов будет

$$\Delta\varphi_{12} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{01}}{n_{02}} \right), \quad (39.1)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n_{01}$  и  $n_{02}$  – концентрация электронов проводимости соответственно в первом и втором металлах. Выражение (39.1) представляет собой не что иное, как *первый закон Вольты*, и показывает, что внутренняя контактная разность потенциалов зависит только от температуры и химической природы контактирующих металлов.

Величина контактной разности потенциалов между концами цепи из  $m$  последовательно соединенных различных металлов при одинаковой температуре всех контактов записывается как

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{1m} = \varphi_1 - \varphi_m &= \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{01}}{n_{02}} \right) + \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{02}}{n_{03}} \right) + \dots + \\ &+ \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{0m-2}}{n_{0m-1}} \right) + \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{0m-1}}{n_{0m}} \right) = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{01}}{n_{0m}} \right). \end{aligned} \quad (39.2)$$

Таким образом, величина  $\Delta\varphi_{1m} = \varphi_1 - \varphi_m$  действительно не зависит от химической природы промежуточных проводников (*второй закон Вольты*).

В то же время между точками, находящимися в непосредственной близости от поверхностей контактирующих металлов, но *вне их*, имеется *внешняя контактная разность потенциалов*  $\Delta\varphi_{12}^*$ . Величина  $\Delta\varphi_{12}^*$  обусловлена различием в значениях работы выхода электронов из контактирующих металлов:

$$\Delta\varphi_{12}^* = \frac{A_2 - A_1}{e}. \quad (39.3)$$

С точки зрения квантовой механики внешняя контактная разность потенциалов возникает из-за различия *энергий Ферми*  $E_F$  электронов проводимости соприкасающихся проводников. Физи-

ческий смысл энергии Ферми заключается в том, что при абсолютном нуле температур такой энергией обладают электроны, находящиеся на самом высоком заполненном энергетическом уровне. При  $T = 0$  К значение энергии Ферми  $E_F(0)$  определяется только концентрацией  $n_0$  электронов проводимости. С повышением температуры этот параметр очень незначительно изменяется, поэтому в области низких температур для большинства случаев можно считать, что  $E_F = E_F(0)$ . При контакте двух различных металлов электроны будут «перетекать» из металла с большей энергией Ферми в металл с меньшей энергией Ферми. Этот процесс остановится в тот момент, когда энергии Ферми выравняются ввиду того, что по мере «перетекания» электронов им требуется совершать все бóльшую работу против сил электрического поля, которое формируется в результате перераспределения заряда между проводниками. Таким образом, получаем

$$\Delta\varphi_{12}^* = \frac{E_{F1} - E_{F2}}{e}. \quad (39.4)$$

Если концы металлического проводника имеют разную температуру, то вследствие различия скоростей теплового движения электронов проводимости в проводнике возникнет тепловая диффузия электронов. В среднем большее число электронов проводимости будет перемещаться в направлении от «теплого» конца проводника к «холодному», а не в обратном. Электрический ток, который появляется в результате этой диффузии, приводит к тому, что «холодный» конец будет заряжен отрицательно по отношению к «теплому» концу проводника. Между концами проводника появляется разность потенциалов, пропорциональная разности температур двух концов проводника  $T_2 - T_1$ . Коэффициент пропорциональности  $\xi$  между возникающей разностью потенциалов и разностью температур двух концов проводника  $T_2 - T_1$  называют *коэффициентом Зеебека*:

$$\Delta\varphi_{12}^T = \xi(T_2 - T_1). \quad (39.5)$$

Диффузионный электрический ток в проводнике прекратится после установления стационарного градиента концентраций электронов проводимости для постоянной разности температур  $T_2 - T_1$  на концах проводника.

Другая ситуация будет наблюдаться, если соединить в замкнутую цепь два различных металлических проводника  $A$  и  $B$ . В каждом

из контактов (в случае тонких проволок контакты принято называть *спаями*) устанавливается равновесная *внутренняя* контактная разность потенциалов. Если температура спаев  $A$  и  $B$  одинакова ( $T_A = T_B = T$ ), то алгебраическая сумма *внутренних* контактных разностей потенциалов будет равна 0:

$$\mathcal{E} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \right) + \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{0B}}{n_{0A}} \right) = 0. \quad (39.6)$$

Если же температуры спаев различны (например,  $T_A > T_B$ ), то в цепи возникнет ЭДС, равная алгебраической сумме всех разностей потенциалов. Это явление получило название *термоэлектричества* или *эффекта Зеебека*. Возникающая ЭДС называется *термоэлектродвижущей силой*  $\mathcal{E}_T$ , а рассматриваемая электрическая цепь – *термопарой*. Величина термоэлектродвижущей силы  $\mathcal{E}_T$  пропорциональна разности температур двух спаев:

$$\mathcal{E}_T = \frac{k}{e} (T_A - T_B) \ln \left( \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \right) = \alpha (T_A - T_B), \quad (39.7)$$

где  $\alpha = \frac{k}{e} \ln \left( \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \right)$  – величина, характеризующая свойства контакта

данных двух металлов и называемая удельной *термоЭДС*. Коэффициент  $\alpha$  зависит только от концентраций электронов проводимости  $n_{0A}$  и  $n_{0B}$  в выбранной паре контактирующих металлов  $A$  и  $B$ . Для поддержания постоянного тока необходимо обеспечить постоянство разности температур спаев  $A$  и  $B$ .

В общем случае для большого интервала температур из-за вклада, обусловленного зависимостью энергии Ферми от температуры, величина термоЭДС  $\mathcal{E}_T$  нелинейно зависит от разности температур спаев. В связи с этим для характеристики термоэлектрических свойств термопары используют *дифференциальную* термоЭДС  $\alpha = \mathcal{E}_T / \Delta T$ , которая равна термоэлектродвижущей силе, возникающей при разности температур спаев в 1 К. Однако, если разность  $\Delta T$  не очень велика, то можно считать, что  $\mathcal{E}_T$  пропорциональна  $\Delta T$ .

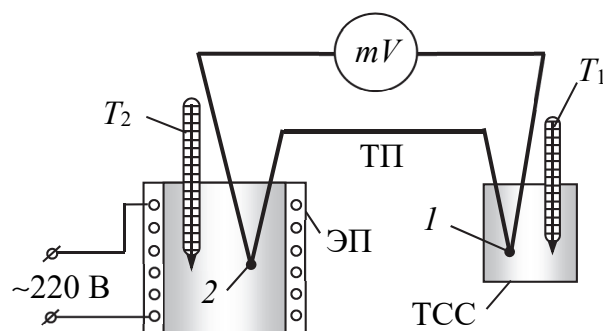
Коэффициент полезного действия термопары, т. е. эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую, как правило, не превышает 0,1%. Поэтому широкого распространения в качестве источников электрической энергии термопары не получили.

Однако с помощью термопар можно с высокой точностью (до 0,01 К) измерять температуру в широком интервале. Для этого термопару предварительно градуируют, т. е. измеряют зависимость термоЭДС от разности температур спаев, и по ней определяют дифференциальную величину термоЭДС  $\alpha$ .

## 2. Описание установки и метода измерений

Схема лабораторной установки для градуировки термопары и определения величины  $\alpha$  приведена на рисунке. Она состоит из следующих узлов: ЭП – электрическая печь;  $mV$  – милливольтметр; ТП – термопара (железо – константан); ТСС – термостатирующий сосуд;  $T_1$  и  $T_2$  – термометры.

Холодный спай 1 термопары поддерживается при постоянной температуре (комнатной). Горячий спай 2 помещен в электрическую печь, температура в которой изменяется. Изменение температуры печи производится микропроцессором. Порядок работы с печью с автоматической перестройкой температуры описан в приложении к лабораторной работе.



Величина термоэлектродвижущей силы  $\mathcal{E}_T$  измеряется милливольтметром  $mV$ , она пропорциональна разности температур  $\Delta T = T_2 - T_1$  спаев 1 и 2.

## 3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений.

$i$	$T_1,$	$T_2,$	$\Delta T,$	$\mathcal{E}_T,$	$\alpha,$

2. Убедитесь, что цепь установки собрана согласно приложению к лабораторной работе и рисунку. Выясните функциональное назначение ее составных частей. Определите цену деления милливольтметра.

3. Определите по термометру в лаборатории и запишите в таблицу температуру холодного  $T_1$  спая перед включением печи. Температура горячего  $T_2$  спая *перед включением* печи равна температуре  $T_1$  холодного спая.

4. С разрешения преподавателя или лаборанта включите электропечь в сеть согласно инструкции, приведенной в приложении к лабораторной работе о порядке работы с печью с автоматической перестройкой температуры.

5. Выполните измерения термоЭДС при разности температур спаев  $\Delta T = T_2 - T_1$  от 0 до 100 К с шагом 10 К.

6. Выключите печь согласно инструкции, приведенной в приложении к лабораторной работе.

7. По данным измерений постройте график зависимости  $\mathcal{E}_T = f(\Delta T)$  (в соответствии с выражением (39.6) график должен представлять собой линейную зависимость). По графику определите дифференциальную термоЭДС  $\alpha$  используемой термопары, которая равна угловому коэффициенту прямой, т. е.  $\alpha = \frac{\Delta \mathcal{E}_T}{\Delta T}$ .

8. Исходя из того, что на один атом железа приходится два электрона проводимости, определите концентрацию  $n_{0A}$  электронов проводимости в железе ( $n_{0A} = \frac{2\rho_{\text{Fe}}N_A}{M_{\text{Fe}}}$ , где  $\rho_{\text{Fe}}$  – плотность железа;  $N_A$  – число Авогадро;  $M_{\text{Fe}}$  – молярная масса железа). Используя формулу (39.7), по полученному значению  $n_{0A}$  (используя ранее определенное значение  $\alpha$ ) рассчитайте концентрацию  $n_{0B}$  электронов проводимости в константане.

9. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

#### 4. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое внутренняя и внешняя контактная разность потенциалов? Какими причинами они обусловлены? 2. Сформулируйте законы Вольты. Ответ поясните выражениями для внутренней контактной разности потенциалов. 3. Объясните сущность эффекта Зеебека. 4. Что такое термопара? 5. Что понимают под дифференциальной термоЭДС? От каких физических величин она зависит? 6. Как с помощью термопары можно измерить температуру?

## Лабораторная работа № 40

### ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ

### ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ОСЦИЛЛОГРАФА

**Цель работы:** изучить физические принципы управления движением заряженных частиц, устройство электронно-лучевой трубки, физические принципы визуализации изменяющихся во времени электрических сигналов с помощью осциллографа и измерить характеристики периодических сигналов различной формы.

#### 1. Теоретическое введение

Со стороны электромагнитного поля на частицу с зарядом  $q$ , движущуюся со скоростью  $\vec{v}$ , действует сила Лоренца  $\vec{F}_L$ :

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}], \quad (40.1)$$

где  $q$  – заряд частицы;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля;  $\vec{v}$  – скорость частицы;  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля. Поэтому направление движения частицы будет изменяться, если на определенном участке траектории она будет двигаться в электромагнитном поле. Согласно принципу независимости действия сил, электрическая и магнитная составляющие силы Лоренца сообщат частице ускорения в направлении, которое определяется взаимной ориентацией векторов в парах  $(\vec{v}, \vec{E})$  и  $(\vec{v}, \vec{B})$ . Очевидно, что данное явление можно положить в основу конструкции устройств для управления движением заряженных частиц. При этом можно использовать отдельно воздействие со стороны электрического либо магнитного поля или их совместное действие. Такой подход широко применяется в ускорителях заряженных частиц, а также в различных электровакуумных приборах.

При необходимости изменить величину скорости частицы, не изменяя направление ее движения, это проще всего сделать, если частица будет двигаться параллельно линиям напряженности электрического поля. В зависимости от знака заряда частицы и взаимного расположения векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{E}$  (одинаково либо противоположно направлены) частица будет ускоряться или замедляться. Скорость, которая будет сообщена изначально покоящейся частице

с зарядом  $q$ , после того как она пройдет разность потенциалов  $U$ , определяется соотношением

$$qU = \frac{1}{2}mv^2, \quad (40.2)$$

где  $m$  – масса частицы.

Если необходимо изменить направление движения частицы, то надо сформировать на пути ее движения электрическое поле с линиями напряженности, направленными перпендикулярно вектору скорости. Тогда частица приобретет составляющую скорости  $v_E$  в направлении, параллельном вектору  $\vec{E}$ , с величиной, определяемой соотношением (40.1). Однородное электрическое поле, направленное перпендикулярно вектору скорости частицы, проще всего сформировать, поместив плоский конденсатор на пути движения частицы так, чтобы плоскости его обкладок были параллельны направлению ее движения. Частица будет отклоняться от начального направления движения в направлении (против направления) вектора  $\vec{E}$ , если ее заряд положительный (отрицательный). Для данной частицы, например электрона, направление отклонения от начальной траектории можно менять, изменив на обратное направление вектора  $\vec{E}$  между обкладками конденсатора путем переключения полярности напряжения  $U$ , приложенного к обкладкам конденсатора.

Магнитная составляющая силы Лоренца, определяемая вторым слагаемым в выражении (40.1), всегда направлена перпендикулярно вектору скорости и, таким образом, работы не совершает. Поэтому при движении заряженной частицы в магнитном поле величина ее скорости по модулю не изменяется. В то же время, поскольку вектор магнитной составляющей силы Лоренца ортогонален вектору скорости частицы, первая будет играть роль центростремительной силы, вынуждающей частицу двигаться по дуге окружности с радиусом  $R$ . В случае, когда векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  ортогональны, величина  $R$  определяется простым соотношением:

$$qvB = \frac{mv^2}{R}. \quad (40.3)$$

Если величина угла между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  равна  $\alpha$ , то в выражении (40.3) вместо значения  $v$  необходимо использовать  $v\sin\alpha$  –

проекцию вектора скорости на направление, перпендикулярное вектору  $\vec{B}$ . Таким образом, если расположить источник магнитного поля (например, соленоид) так, чтобы направление линий магнитной индукции было перпендикулярно направлению движения частицы, можно изменять направление движения заряженных частиц. Согласно закону Био – Савара – Лапласа, величина отклонения будет пропорциональна силе тока  $I$  в соленоиде, так как величина индукции магнитного поля  $\sim I$ .

Оба вышеописанных способа управления движением заряженных частиц нашли широкое применение для управления движением электронов в *электронно-лучевых трубках* (кинескопах) телевизионных приемников, компьютерных мониторов и *осциллографов*. *Электронно-лучевая трубка* (ЭЛТ) – это электровакуумная лампа, особенностью которой является наличие экрана, на который попадают электроны, испущенные катодом в результате термоэлектронной эмиссии. Экран представляет собой плоский фрагмент поверхности колбы с нанесенным на внутреннюю поверхность слоем вещества, называемого *люминофором*, которое обладает способностью излучать свет при попадании на него электронов. В кинескопах телевизионных приемников и компьютерных мониторов управление электронным пучком осуществляется с помощью магнитного поля, в то время как в осциллографах применяется управление с помощью электрического поля.

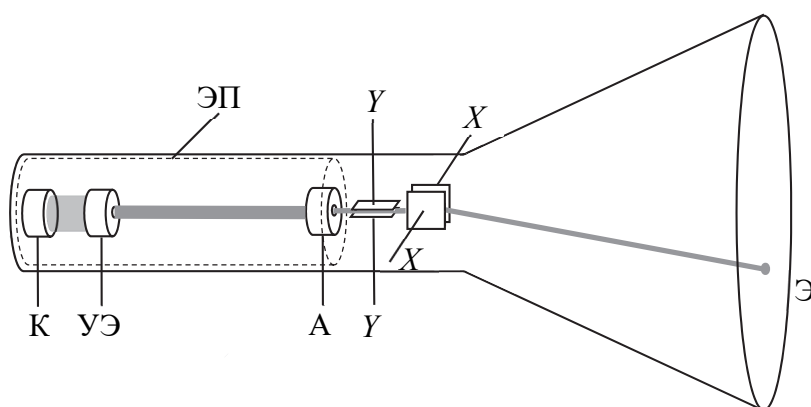


Рис. 40.1

Рассмотрим, как осуществляется формирование электронного пучка и управление им в осциллографической электронно-лучевой трубке (рис. 40.1). Испущенные катодом К электроны, двигаясь в ускоряющем электрическом поле по направлению к аноду (А),

проходят через *управляющий электрод* (УЭ), имеющий форму цилиндра. На УЭ подается отрицательный относительно катода потенциал, что позволяет «сжать» электроны в пучок. Изменяя величину потенциала на УЭ, можно управлять диаметром пучка электронов, т. е. осуществлять его фокусировку. Молекулы люминофора преобразуют кинетическую энергию электронов, которую они отдают при столкновении с поверхностью экрана Э, в энергию электромагнитного излучения видимого диапазона. Таким образом, в том месте на экране, куда попадает пучок электронов, наблюдатель видит светящуюся (обычно зеленым или голубым светом) точку. Для эффективного возбуждения молекул люминофора электроны должны иметь достаточно большую энергию, которая им сообщается за счет ускоряющего электрического поля, формируемого между катодом и анодом. Для этого на анод А подается высокий потенциал (не менее нескольких киловольт). Катод, управляющий электрод и анод составляют так называемую *электронную пушку* (ЭП), назначение которой – сформировать параллельный пучок электронов малого диаметра и направить его на экран с высокой скоростью.

Следует отметить, что качественное формирование и фокусировку электронного пучка можно обеспечить в результате нескольких последовательных управляющих воздействий на пучок. Поэтому конструкция ЭП выпускаемых промышленностью ЭЛТ, как правило, содержит дополнительные электроды для фокусировки и ускорения пучка, назначение которых такое же, как описано выше для УЭ и А.

После того как электронный пучок сформирован, на пути к экрану он проходит между двумя парами параллельных *отклоняющих пластин* (по существу – между обкладками плоских конденсаторов), расположенных в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Назначение отклоняющих пластин – формирование с помощью электронного пучка изображения на экране осциллографа. Горизонтально расположенные пластины (Y) служат для отклонения луча в вертикальном направлении, а вертикально расположенные пластины (X) – в горизонтальном. Если на какую-либо пару пластин подать постоянное напряжение  $U$ , то светящаяся точка на экране сместится от центра экрана. Величина этого смещения (координата  $x$  или  $y$ ) пропорциональна приложенному напряжению  $U$ .

*Осциллограф* представляет собой электронный прибор, предназначенный для визуального наблюдения электрических сигналов и измерения их амплитудных и временных характеристик. На рис. 40.2 приведена блок-схема электронного осциллографа. Основным элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка. Для регистрации временной эволюции электрических сигналов одновременно используются обе пары отклоняющих пластин ЭЛТ осциллографа. На вертикально отклоняющие пластины подают исследуемый сигнал  $U(t)$ , а на горизонтально отклоняющие пластины от встроенного *генератора развертки* поступает *напряжение развертки*  $U_p(t)$ . Электрическое поле, создаваемое напряжением развертки  $U_p(t)$ , отклоняет светящуюся точку горизонтально, так что она движется по экрану слева направо с постоянной скоростью, а затем быстро возвращается в исходное положение. Это движение повторяется циклически с периодом  $T_p$ , который можно регулировать. Таким образом, на экране осциллографа вдоль вертикальной оси отображается величина напряжения исследуемого сигнала, а вдоль горизонтальной оси – время. При этом крайнее левое положение светящейся точки на экране соответствует нулевому моменту времени, а крайнее правое – времени  $T_p$ .

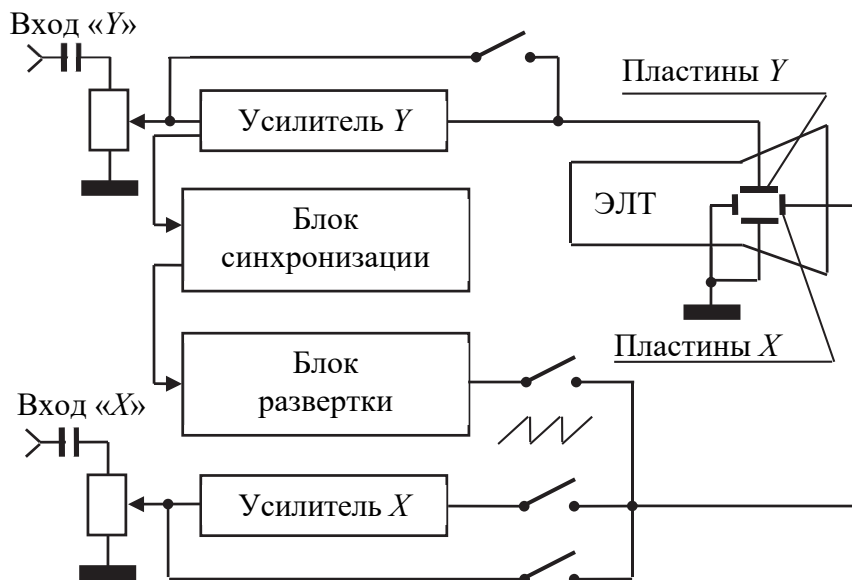


Рис. 40.2

Величина напряжения развертки  $U_p(t)$  изменяется со временем по линейному закону (рис. 40.3). Периодически изменяющееся

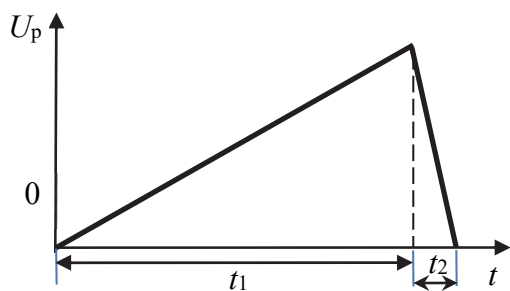


Рис. 40.3

напряжение такой формы называют пилообразным напряжением. Отметим, что время линейного нарастания напряжения во много раз больше времени спада, (а именно  $t_1 \gg t_2$ ). Поэтому  $t_1$  можно считать практически равным периоду  $T_p$  напряжения развертки. При наблюдении

периодических сигналов важно, чтобы напряжение развертки «включалось» всегда в один и тот же момент по отношению к изучаемому сигналу, в противном случае изображение будет «бежать» по экрану.

С этой целью генератор развертки *синхронизируется* с изучаемым сигналом, сетевым напряжением или сигналом внешнего генератора. Такое управление режимом работы генератора развертки называется *синхронизацией*.

Чувствительность электронно-лучевой трубки, определяемая как величина напряжения на отклоняющих пластинах, необходимая для смещения светящейся точки на экране на 1 мм, невелика (1–10 В/мм). Поэтому для исследования электрических сигналов с малой амплитудой напряжения их нужно предварительно усилить. Этой цели служат усилители вертикального (усилитель  $Y$ ) и горизонтального (усилитель  $X$ ) отклонения, выходы которых соответственно подключены к отклоняющим пластинам  $Y$  и  $X$ .

Величина напряжения, подаваемого на отклоняющие пластины, ступенчато регулируется, т. е. устанавливаются требуемые значения чувствительности по вертикальной  $\delta_y$  и горизонтальной  $\delta_x$  осям. Поэтому величина напряжения в произвольной точке измеряемого сигнала (отсчитываемая от нулевой линии)  $U = \delta_y y$ , а момент времени (отсчитываемый от начала развертки) —  $t = \delta_x x$ , где  $y$  и  $x$  — координаты, соответственно определяемые вдоль вертикальной (амплитудной) и горизонтальной (временной) осей. Положение нулевой линии определяется при отсутствии сигнала на входе осциллографа.

Возможность преобразования различных физических величин в электрические сигналы позволяет применять осциллографы во многих областях науки и техники. С помощью специальных осциллографов можно регистрировать как очень медленные, так и очень быстрые периодические процессы, а также одиночные сигналы произвольной формы.

## 2. Описание установки и метода измерений

Лабораторная установка состоит из двух приборов: генератора звуковой частоты и осциллографа. Описание порядка их включения и назначение органов управления изложено в приложении к настоящей лабораторной работе. Для наблюдения сигналов, формируемых звуковым генератором, и определения их амплитудных и временных характеристик сигнал с выхода генератора подается на вход осциллографа.

## 3. Порядок выполнения работы

### Задание 1. Изучение осциллографа.

1. Используя приложение к лабораторной работе, ознакомьтесь с назначением ручек управления осциллографа и генератора звуковой частоты и изучите порядок работы с ними.

2. Подготовьте осциллограф и генератор к работе и с разрешения преподавателя или лаборанта включите приборы в сеть. После прогрева приборов (в течение 1–2 мин) получите четкое и умеренно яркое изображение горизонтальной линии. Эта линия представляет собой нулевую линию, т. е.  $U(t) = 0$  В. С помощью ручки « $\updownarrow$ » совместите ее с горизонтальной линией в середине экрана. Если на экране наблюдается «бегущая» светящаяся точка, то ручку «Время/дел» переключите по часовой стрелке, пока на экране не появится сплошная горизонтальная линия.

3. Подсоедините вход Y осциллографа с помощью кабеля к выходному разъему генератора сигналов. Установите переключатель «В/дел» в такое положение, чтобы изучаемый сигнал полностью отображался на экране. Вращая ручку «Уровень» (синхронизации), добейтесь устойчивого изображения сигнала.

### Задание 2. Наблюдение электрических сигналов и измерение их параметров.

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

Форма сигнала, частота сигнала	$\delta_y$ ,	$y$ ,	$U_0$ ,	$\delta_x$ ,	$x$ ,	$T$ ,	$v$ ,	$t_1$ ,

2. Включите генератор в режим генерации синусоидального сигнала с частотой в интервале 500–1000 Гц. Регулировкой выходного

напряжения генератора и / или переключателем «В/дел» добейтесь, чтобы изображение сигнала на экране по вертикали занимало 4–6 больших делений экрана (клеток). Значение цены деления  $\delta_y$  переключателя «В/дел» запишите в таблицу. Вращая ручку «Уровень», добейтесь устойчивого изображения синусоидального сигнала. Установите переключатель «Время/дел» в положение, при котором наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала. Значение цены деления  $\delta_x$  переключателя «Время/дел» запишите в таблицу.

3. Определите амплитуду  $U_0$  сигнала, выполнив следующие операции:

3.1. С помощью ручки « $\updownarrow$ » совместите нижнюю границу изображения синусоиды с одной из нижних линий сетки, при этом верхняя граница синусоиды должна находиться в пределах экрана.

3.2. Ручками « $\leftrightarrow$ » сместите изображение по горизонтали таким образом, чтобы один из максимумов синусоиды находился на центральной вертикальной оси шкалы экрана.

3.3. Измерьте расстояние  $y$  по вертикали в больших делениях (с точностью до десятых долей) между минимумом и максимумом сигнала (ручка «Плавно» должна быть в положении  $\blacktriangledown$ ). Умножьте измеренную величину на цену деления  $\delta_y$  переключателя «В/дел». Полученный результат будет равен удвоенному значению амплитуды ( $2U_0$ ).

4. Определите период  $T$  и частоту  $\nu$  сигнала, выполнив следующие операции:

4.1. С помощью ручки « $\updownarrow$ » переместите изображение таким образом, чтобы точки сигнала, ограничивающие один период колебаний, находились на центральной горизонтальной оси шкалы экрана.

4.2. Ручками « $\leftrightarrow$ » поместите изображение так, чтобы его левая точка совпала с одной из вертикальных линий сетки экрана.

4.3. Определите расстояние  $x$  в больших делениях сетки (с точностью до десятых долей) между этими точками (ручка «Плавно» должна быть в положении  $\blacktriangledown$ ).

4.4. Умножив эту величину на цену деления  $\delta_x$  переключателя «Время/дел», найдите период сигнала  $T$ . По формуле  $\nu = \frac{1}{T}$  определите частоту сигнала.

5. Повторите измерения п. 3–4 для прямоугольного сигнала, предварительно изменив частоту и амплитуду сигнала генератора произвольным образом (на  $\pm 10$ –40%).

6. Повторите измерения п. 3–4 для треугольного сигнала, предварительно изменив частоту и амплитуду сигнала генератора произвольным образом (на  $\pm 10$ –40%).

7. Повторите измерения п. 3–4 для пилообразного сигнала, предварительно изменив частоту и амплитуду сигнала генератора произвольным образом (на  $\pm 10$ –40%). Таким же способом, как в п. 4, определите время нарастания  $t_1$  сигнала.

8. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

#### 4. Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте движение заряженных частиц в электрическом поле. Ответ поясните с помощью рисунка. 2. Охарактеризуйте движение заряженных частиц в магнитном поле. Ответ поясните с помощью чертежа. 3. Нарисуйте схематический чертеж и объясните принцип устройства электронно-лучевой трубки. 4. Что такое электронная пушка и для чего она предназначена? 5. Какие напряжения прикладываются к вертикальным и горизонтальным отклоняющим пластинам осциллографа? 6. Для чего предназначен генератор развертки и как зависит от времени напряжение развертки? 7. Для чего предназначен блок синхронизации и как осуществляется синхронизация сигнала? 8. Что такое чувствительность электронно-лучевой трубки? Каковы ее типичные значения? 9. Поясните, как формируется изображение сигнала на экране осциллографа.

# МАГНЕТИЗМ

## Лабораторная работа № 46 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

**Цель работы:** изучить действие электрического и магнитного полей на заряженные частицы; определить значение удельного заряда электрона методом магнетрона.

### 1. Теоретическое введение

Удельным зарядом частицы называется отношение ее заряда  $q$  к массе  $m$ . Эта величина является одной из основных характеристик заряженных частиц, существующих в природе. Значения удельного заряда  $\frac{q}{m}$  различаются для ионизированных атомов разных химических элементов, ионизированных атомов одного и того же элемента с различной кратностью заряда, для ионизированных молекул. Методы определения удельного заряда микрочастиц основаны на изучении их движения в электрическом и магнитном полях в условиях вакуума.

На заряженную частицу в электрическом и магнитном полях действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_\text{Л} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}] = \vec{F}_e + \vec{F}_m, \quad (46.1)$$

где  $q$  – заряд частицы;  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\vec{v}$  – скорость движения частицы;  $\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля;  $\vec{F}_e$  – сила, действующая на частицу со стороны электрического поля;  $\vec{F}_m$  – сила, действующая со стороны магнитного поля.

В электрическом поле частица приобретает ускорение

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_e}{m} = \frac{q}{m} \vec{E}, \quad (46.2)$$

значение которого зависит от удельного заряда частицы  $\frac{q}{m}$ , а также кинетическую энергию  $K$ , равную работе  $A$  сил электрического поля по перемещению заряда  $q$ :

$$K = A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU, \quad (46.3)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы электрического поля в исходной и конечной точках, между которыми перемещается заряженная частица;  $U$  – электрическое напряжение между этими точками.

В магнитном поле на заряженную частицу, движущуюся со скоростью  $\vec{v}$ , действует составляющая силы Лоренца:

$$\vec{F}_m = q[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (46.4)$$

Направление силы  $\vec{F}_m$  определяется векторным произведением скорости  $\vec{v}$  на индукцию магнитного поля  $\vec{B}$  с учетом знака заряда частицы. Сила  $\vec{F}_m$  всегда перпендикулярна к линиям магнитной индукции и скорости движения частицы. Работа силы  $\vec{F}_m$  равна нулю. Следовательно, при движении в магнитном поле значение скорости (модуль вектора  $\vec{v}$ ) частицы и ее кинетическая энергия остаются неизменными. Сила  $\vec{F}_m$  изменяет лишь направление скорости частицы, искривляя траекторию ее движения.

В случае, когда частица влетает в однородное магнитное поле со скоростью, направленной вдоль линий индукции магнитного поля,  $\vec{F}_m = 0$  и частица продолжает двигаться в том же направлении без изменения вектора скорости. Если же заряженная частица влетает в однородное магнитное поле со скоростью, направленной перпендикулярно линиям индукции, она под действием силы  $\vec{F}_m$  будет двигаться по дуге или по окружности. Сила  $\vec{F}_m$  является при этом центростремительной силой, удерживающей частицу на круговой траектории и сообщаящей ей нормальное ускорение. Радиус траектории заряженной частицы, движущейся в однородном магнитном поле, а также период и частота ее обращения зависят от значения удельного заряда  $\frac{q}{m}$  частицы, т. е. от ее природы.

Если частица движется одновременно в электрическом и магнитном полях, то при описании ее движения необходимо учитывать действие обеих составляющих силы Лоренца (46.1). В случае неоднородности полей движение частицы будет более сложным.

## 2. Описание установки и метода измерения

Измерение отношения заряда электрона  $q = e$  к его массе  $m$  в работе осуществляется методом магнетрона. В общем случае, *магнетрон* – прибор, принцип действия которого основан на движении заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, силовые линии которых взаимно перпендикулярны. При этом на частицу (в нашем случае – на электрон) одновременно действуют обе составляющие силы Лоренца (46.1). Сила  $\vec{F}_e = q\vec{E}$  изменяет скорость частицы и по модулю, и по направлению; сила  $\vec{F}_m = q[\vec{v} \times \vec{B}]$  искривляет траекторию частицы.

Приборы магнетронного типа используются в качестве генераторов и усилителей электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, частоты электромагнитных колебаний которого лежат в интервале от 300 МГц до 300 ГГц. Генерирование электромагнитных волн и их усиление при приеме осуществляется за счет отбора электромагнитной волной значительной части кинетической энергии электронов, ускоряемых электрическим полем и движущихся в электрическом и магнитном полях по криволинейным траекториям, при их торможении переменным электрическим полем электромагнитной волны. Магнетронные системы также нашли применение в технологических процессах, в частности при вакуумном формировании тонких пленок методом магнетронного распыления осаждаемого материала.

В установке лабораторной работы магнетронная система состоит из вакуумного диода, помещенного внутрь соленоида. Электродная система диода имеет осевую симметрию (рис. 46.1): цилиндрический катод К малого радиуса  $a$  расположен на оси диода и охватывается коаксиальным с ним цилиндрическим анодом А, радиус которого  $b$ . Катод нагревается пропусканием через нить накала электрического тока и вследствие термоэлектронной эмиссии испускает электроны. Электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$  (рис. 46.1), ускоряющее электроны в направлении от катода к аноду, создается электри-

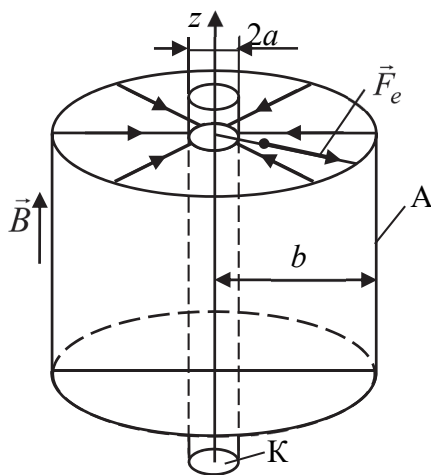


Рис. 46.1

родная система диода имеет осевую симметрию (рис. 46.1): цилиндрический катод К малого радиуса  $a$  расположен на оси диода и охватывается коаксиальным с ним цилиндрическим анодом А, радиус которого  $b$ . Катод нагревается пропусканием через нить накала электрического тока и вследствие термоэлектронной эмиссии испускает электроны. Электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$  (рис. 46.1), ускоряющее электроны в направлении от катода к аноду, создается электри-

ческим напряжением между катодом и анодом (анодным напряжением  $U_a$ ). Из-за осевой симметрии электродов вакуумного диода электрическое поле не является однородным; напряженность поля зависит от расстояния, отсчитываемого от оси катода. Значение модуля напряженности электрического поля между цилиндрическими электродами вакуумного диода

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}, \quad (46.5)$$

где  $\tau$  – линейная плотность заряда, распределенного по катоду при подаче анодного напряжения;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $r$  – расстояние от оси катода до любой точки пространства между катодом и анодом.

Выразим напряженность  $E$  через анодное напряжение  $U_a$ . Связь между напряженностью и потенциалом электрического поля

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi. \quad (46.6)$$

В поле осевой симметрии напряженность и потенциал зависят от расстояния  $r$ , отсчитываемого от оси симметрии в радиальном направлении, и градиент потенциала  $\text{grad } \varphi = \frac{d\varphi}{dr}$ . Тогда выражение

(46.6) перепишется в виде  $E = -\frac{d\varphi}{dr}$ , откуда разность потенциалов двух точек электрического поля, отстоящих от оси на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$ ,

$$\Delta\varphi = -\int_{r_1}^{r_2} E dr = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_2}.$$

Напряжение между двумя точками поля осевой симметрии

$$U = -\Delta\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (46.7)$$

Напряжение между катодом и анодом вакуумного диода (анодное напряжение)

$$U_a = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b}{a}. \quad (46.8)$$

Выражая  $\tau$  из (46.8) и подставляя в (46.5), получим формулу для напряженности электрического поля, ускоряющего электроны при их движении от катода к аноду:

$$E = \frac{U_a}{r \ln \frac{b}{a}}, \quad (46.9)$$

где  $U_a$  – анодное напряжение;  $r$  – расстояние от оси диода до рассматриваемой точки в пространстве между катодом и анодом;  $b$  – радиус анода вакуумного диода;  $a$  – радиус катода (см. рис. 46.1).

Поскольку значение напряженности  $E$  обратно пропорционально расстоянию  $r$  от оси катода, то как и сила  $F_e$ , действующая на электрон, так и ускорение частицы при приближении к аноду уменьшаются.

Вектор силы  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ , действующей на электрон со стороны электрического поля, направлен вдоль радиуса системы электродов против направления силовых линий поля от катода к аноду. Под действием только электрического поля электроны, испускаемые разогретым катодом, движутся к аноду прямолинейно по радиальным направлениям (рис. 46.2; при  $B = 0$ ).

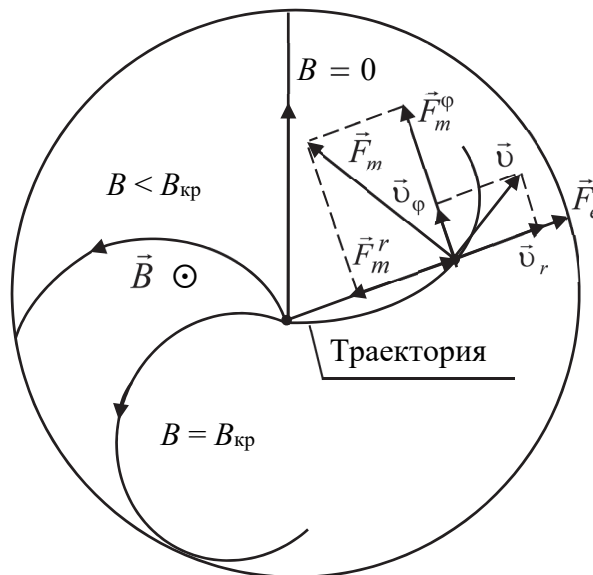


Рис. 46.2

Магнитное поле магнетрона создается электрическим током силой  $I_c$  в обмотке соленоида. Индукция магнитного поля внутри

соленоида и в пространстве движения электронов между катодом и анодом вакуумного диода

$$B = \mu_0 n_0 I_c, \quad (46.10)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $n_0$  – количество витков соленоида в расчете на единицу длины (плотность витков);  $I_c$  – сила тока в обмотке соленоида.

Магнитное поле внутри соленоида в той части, где расположен диод, можно считать однородным. Линии индукции магнитного поля параллельны оси соленоида и оси симметрии вакуумного диода. Со стороны магнитного поля на движущийся электрон действует сила  $\vec{F}_m = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ , искривляющая его траекторию.

Векторы сил  $\vec{F}_e$  и  $\vec{F}_m$ , действующих на электрон со стороны электрического и магнитного полей, лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси магнетрона. Поэтому электроны в магнетроне движутся по плоским криволинейным траекториям с изменяющимся в зависимости от скорости частиц радиусом кривизны.

Движение частицы по криволинейной траектории описывается законом изменения момента импульса: момент импульса  $L_z$  частицы относительно оси  $z$  изменяется во времени под действием моментов сил  $M_z$ , действующих на частицу:

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z. \quad (46.11)$$

При выполнении лабораторной работы исследуется зависимость силы тока  $I_a$  в цепи анода от силы тока  $I_c$  в обмотке соленоида или от индукции  $B$  магнитного поля, создаваемого этим током, при определенных значениях анодного напряжения  $U_a$ . Сила тока  $I_a$  определяется количеством электрического заряда, передаваемого аноду достигающими его поверхности электронами в единицу времени. При небольших значениях индукции  $B$  магнитного поля кривизна траекторий электронов мала (рис. 46.2) и практически все электроны, эмитируемые из катода в единицу времени, достигают за это же время поверхности анода, и сила тока в анодной цепи будет практически такой же, как и в отсутствие магнитного поля (рис. 46.3). По мере увеличения индукции магнитного поля кривизна траекторий электронов увеличивается, и при некотором критическом значении индукции  $B_{кр}$  электроны будут лишь касаться

поверхности анода, а при  $B > B_{кр}$  они перестанут достигать анода. При этом сила анодного тока должна уменьшиться скачком до нуля (пунктирная линия на рис. 46.3).

Определим критическое значение индукции магнитного поля в магнетроне. Рассмотрим движение электрона в однородном магнитном и неоднородном электрическом полях с использованием закона

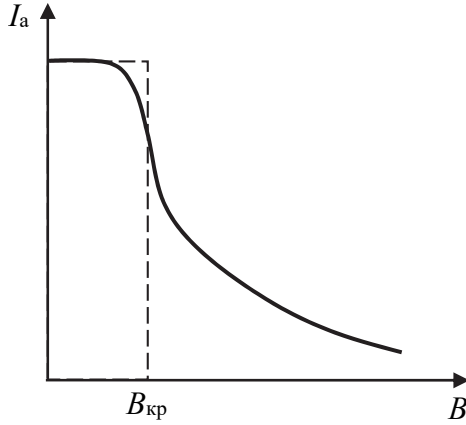


Рис. 46.3

изменения момента импульса частицы под действием моментов сил  $\vec{F}_e$  и  $\vec{F}_m$  относительно оси  $z$  симметрии магнетрона и теоремы об изменении кинетической энергии.

Скорость  $\vec{v}$  электрона в произвольной точке криволинейной траектории разложим на составляющие (рис. 46.2): радиальную  $\vec{v}_r$  и азимутальную  $\vec{v}_\phi$ . Силу  $\vec{F}_m$ , которая направлена перпендикулярно скорости электрона в каждой точке траектории, также разложим на составляющие (рис. 46.2): радиальную  $\vec{F}_m^r$  и азимутальную  $\vec{F}_m^\phi$ . Линии действия сил  $\vec{F}_e$  и  $\vec{F}_m^r$  проходят через ось симметрии  $z$ ; моменты этих сил относительно оси  $z$  равны нулю. Сила  $\vec{F}_m^\phi = q[\vec{v}_r \times \vec{B}]$ , ее модуль  $F_m^\phi = qv_r B$ . Модуль момента этой силы  $\vec{M}_z^\phi = qv_r Br$ . Учитывая действие на электрон только момента  $M_z^\phi$  азимутальной составляющей силы  $\vec{F}_m^\phi$ , закон изменения момента импульса запишем в виде

$$\frac{d}{dt}(rmv_\phi) = qv_r Br, \quad (46.12)$$

где  $rmv_\phi = L_\phi$  – азимутальная составляющая момента импульса электрона. Выполним преобразования выражения (46.12) и получим дифференциальное уравнение (46.13):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(rmv_\phi) = q \frac{dr}{dt} Br &\Rightarrow \frac{d}{dt}(rv_\phi) = \frac{q}{m} \frac{dr}{dt} Br \Rightarrow d(rv_\phi) = \frac{qB}{m} r dr. \\ d(rv_\phi) &= \frac{qB}{2m} d(r^2). \end{aligned} \quad (46.13)$$

Интегрируя (46.13), получим

$$rv_\varphi = \frac{qB}{2m}r^2 + C. \quad (46.14)$$

Постоянную интегрирования  $C$  определим, предполагая, что начальная скорость электрона, эмитирующего из катода, близка к нулю ( $\vec{v}_0 = 0$ ;  $v_{0r} = 0$ ;  $v_{0\varphi} = 0$  при  $r = a$ ).

Тогда

$$C = -\frac{qB}{2m}a^2.$$

$$rv_\varphi = \frac{qB}{2m}(r^2 - a^2).$$

Азимутальная составляющая скорости электрона вблизи поверхности анода (при  $r = b$ )

$$v_\varphi(b) = \frac{qB}{2m} \frac{1}{b} (b^2 - a^2) = \frac{qB}{2m} b \left( 1 - \frac{a^2}{b^2} \right). \quad (46.15)$$

Радиальную составляющую скорости электрона вблизи поверхности анода определим на основании теоремы об изменении кинетической энергии частицы:

$$\frac{mv_r^2}{2} + \frac{mv_\varphi^2}{2} = qU_a \Rightarrow v_r = \sqrt{\frac{2q}{m}U_a - v_\varphi^2}. \quad (46.16)$$

С учетом (46.15) получим, что радиальная составляющая скорости электрона при приближении к поверхности анода

$$v_r = \sqrt{\frac{2q}{m}U_a - \left( \frac{qB}{2m}b \right)^2 \left( 1 - \frac{a^2}{b^2} \right)^2}. \quad (46.17)$$

При критическом значении индукции магнитного поля  $B_{кр}$  траектория электрона скользит вдоль поверхности анода, двигаясь при этом с азимутальной скоростью. Следовательно, вблизи поверхности анода радиальная составляющая его скорости  $v_r = 0$ . Тогда с учетом того, что радиус катода во много раз меньше радиуса анода ( $a \ll b$ ), получим

$$\frac{2q}{m}U_a - \left( \frac{qB_{кр}}{2m}b \right)^2 = 0; \quad 2U_a - \frac{q}{m} \left( \frac{bB_{кр}}{2} \right)^2 = 0.$$

Отсюда формула для расчета значения удельного заряда электрона при исследовании его движения в магнетроне

$$\frac{q}{m} = \frac{8U_a}{b^2 B_{кр}^2}. \quad (46.18)$$

Зависимость силы тока  $I_a$  в цепи анода от индукции  $B$  магнитного поля при определенном значении анодного напряжения  $U_a$  (так называемая сбросовая характеристика магнетрона) имела бы вид, представленный на рис. 46.3 в виде пунктирной линии, только в том случае, если бы начальная скорость электронов, идущих от катода, была равной нулю. В действительности же электроны, испускаемые катодом при термоэлектронной эмиссии, имеют различные скорости. Вследствие этого критические условия в магнетроне для разных электронов реализуются при различных значениях индукции магнитного поля, что приводит к сглаживанию сбросовой характеристики. Вид экспериментально получаемой сбросовой характеристики схематично представлен на рис. 46.3 сплошной линией. Критическим условиям работы магнетрона соответствует участок наиболее быстрого уменьшения силы анодного тока вблизи точки перегиба сбросовой характеристики.

Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 46.4. Для создания электрического поля в магнетроне от источника питания подается анодное напряжение  $U_a$ , значение которого регулируется реостатом  $R$  и измеряется вольтметром  $V$ . Нагрев катода до высокой температуры осуществляется переменным током через нить накала; напряжение накала подается от понижающей обмотки трансформатора источника питания.

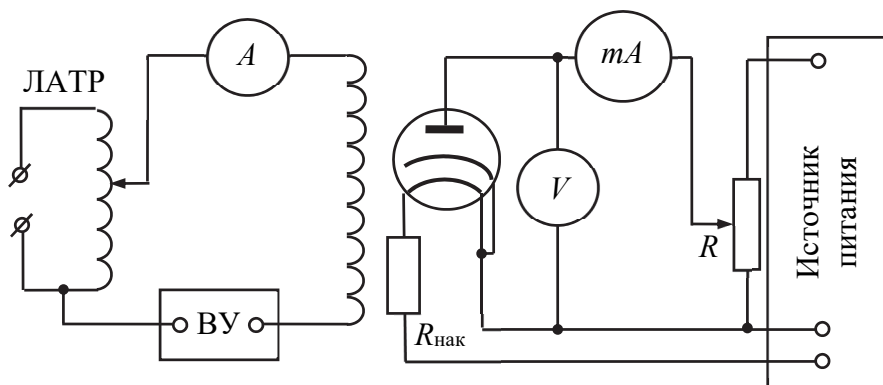


Рис. 46.4

Сила тока  $I_a$  в цепи анода, обусловленного движением электронов, измеряется миллиамперметром  $mA$ . Магнитное поле магнетрона создается током в обмотке соленоида, внутри которого расположен вакуумный диод. Питание соленоида осуществляется от лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) через выпрямляющее устройство ВУ. Сила тока  $I_c$  в цепи соленоида регулируется ЛАТРОм и измеряется амперметром  $A$ .

По измеренным значениям силы тока  $I_c$  определяется значение индукции магнитного поля в магнетроне (см. формулу (46.10)):

$$B = \mu_0 n_0 I_c = k I_c. \quad (46.19)$$

Значение коэффициента пропорциональности  $k$ , зависящее от плотности витков конкретного соленоида, указано на установке.

### 3. Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для внесения и обработки результатов измерений.

$b =$		$k =$		
$i$	$I_c,$	$U_{a1} =$	$U_{a2} =$	$U_{a3} =$
		$I_a,$		

2. Внесите в верхнюю строку таблицы указанные на лабораторной установке значения радиуса  $b$  анода вакуумного диода и коэффициента пропорциональности  $k$  в выражении (46.19).

3. По схеме установки ознакомьтесь с расположением входящих в ее состав приборов и устройств и их назначением. Определите назначение и цену деления шкал каждого из измерительных приборов: вольтметра, миллиамперметра и амперметра. Подвижный контакт реостата установите в среднее положение, а регулятор выходного напряжения ЛАТРа – в нулевое положение. После разрешения преподавателя подключите лабораторную установку к сети.

4. Перемещая подвижный контакт реостата  $R$ , выставьте по показаниям вольтметра первое значение анодного напряжения  $U_{a1}$  из заданного интервала значений  $U_a$ . Значение  $U_a$  в процессе измерений поддерживайте неизменным.

5. Ключом К замкните цепь питания соленоида. Регулятором выходного напряжения ЛАТРа изменяйте, контролируя по показаниям амперметра  $A$ , силу тока  $I_c$  в обмотке соленоида через каждые 0,05 А от нулевого значения до указанного на установке максимального. Для каждого значения  $I_c$  определите по показаниям миллиамперметра значение силы анодного тока  $I_a$ . Измеряемые значения  $I_c$  и  $I_a$  внесите в таблицу.

6. Выполните такие же измерения (п. 4, 5) при двух других значениях анодного напряжения  $U_{a2}$  и  $U_{a3}$  из заданного интервала.

7. По результатам измерений постройте три графические зависимости силы анодного тока  $I_a$  от силы тока  $I_c$  в обмотке соленоида ( $I_a = f(I_c)$ ).

8. По точке перегиба каждой из графических зависимостей  $I_a = f(I_c)$  определите критическое значение  $I_c^{кр}$  силы тока в обмотке соленоида, соответствующее критическому значению индукции магнитного поля  $B_{кр}$  в магнетроне (см. рис. 46.3). Вычислите значения  $B_{кр}$  по формуле

$$B_{кр} = \mu_0 n_0 I_c^{кр} = k I_c^{кр}.$$

9. По формуле (46.18) вычислите для каждой из экспериментальных зависимостей значение  $\frac{q}{m}$ . Определите среднее измеренное значение удельного заряда электрона. Сравните полученное в эксперименте значение  $\frac{q}{m}$  со значением, приведенным в справочной литературе.

10. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Каков физический смысл силы Лоренца? 2. Какое силовое поле (электрическое, магнитное) является однородным? 3. Как можно создать однородное электрическое поле? 4. Каким образом можно создать однородное магнитное поле? 5. Как определяется направление силы, действующей на заряженную частицу со стороны электрического поля? 6. Изменяется ли кинетическая энергия заряженной частицы под действием электрического поля? Почему? 7. Как определяется направление силы, действующей на заряженную частицу со стороны магнитного поля? 8. Изменяется ли

кинетическая энергия заряженной частицы под действием магнитного поля? Почему? 9. Как различаются значения удельного заряда ионов гелия  $\text{He}^+$  и  $\text{He}^{++}$ ? 10. Из каких частей состоит магнетронная система лабораторной установки? 11. Что представляет собой вакуумный диод? Каково назначение каждого из электродов диода? 12. Как создается электрическое поле в магнетроне лабораторной установки? 13. Как создается магнитное поле в магнетроне лабораторной установки?

## Лабораторная работа № 47 ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** изучить свойства ферромагнетиков, освоить осциллографический метод исследования намагничивания ферромагнетика; построить основную кривую намагничивания; определить коэрцитивную силу  $H_k$  и класс ферромагнетика.

### 1. Теоретическое введение

Магнитные свойства всех веществ определяются природой микрочастиц (электронов, протонов, нейтронов), обуславливающих структуру вещества, и их взаимодействием. Эти частицы обладают собственным (спиновым) и орбитальным магнитными моментами. Орбитальный момент обусловлен движением электронов в оболочках атомов (молекул) и внутриядерным движением протонов и нейтронов. Обычно магнитными моментами ядер можно пренебречь и считать, что магнетизм атомов (молекул) определяется спиновыми и орбитальными магнитными моментами электронов.

Магнитные свойства вещества характеризуются *вектором намагниченности*  $\vec{J}$ , который определяется как результирующий (средний) магнитный момент единицы объема вещества, создаваемый молекулярными токами:

$$\vec{J} = \frac{\sum_i \vec{\mu}_i}{\Delta V}. \quad (47.1)$$

Если ввести средний магнитный момент молекулы  $\vec{\mu}$ , то вектор намагниченности

$$\vec{J} = n\vec{\mu}, \quad (47.2)$$

где  $n$  – концентрация атомов. Для магнетиков, находящихся в не слишком сильных магнитных полях, магнитный момент элемента объема  $dV$  определяется по формуле

$$\vec{J} = \chi \vec{H}. \quad (47.3)$$

Безразмерная величина  $\chi$  называется *магнитной восприимчивостью*, она зависит от природы вещества и его состояния;  $\vec{H}$  – напряженность внешнего поля. Вещества, магнитная восприимчивость которых отрицательная и очень мала ( $\sim 10^{-6}$ ), относятся к диамагнетикам. У парамагнетиков  $\chi > 0$ , ее значения при комнатной температуре лежат в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$ .

Вектор индукции результирующего магнитного поля в магнетике

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_i, \quad (47.4)$$

где  $\vec{B}_0$  – индукция намагничивающего поля,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\vec{B}_i$  – индукция внутреннего поля. При однородном намагничивании вещества  $\vec{B}_i = \mu_0 \vec{J}$ . Тогда  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}$ .

С учетом (47.3) получим

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}. \quad (47.5)$$

Величина  $\mu = 1 + \chi$  называется *относительной магнитной проницаемостью среды*. Она равна отношению индукции магнитного поля в магнетике к величине индукции в вакууме при одной и той же напряженности  $\vec{H}$ . Для диамагнетиков  $\mu < 1$ , а для парамагнетиков  $\mu > 1$ .

В обоих случаях магнитная проницаемость не зависит от напряженности поля и мало отличается от 1.

*Ферромагнетики* – это вещества, которые обладают собственной намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. Ферромагнетизм характерен в основном для твердой кристаллической фазы вещества.

Среди химических элементов ферромагнитными свойствами обладают переходные элементы Fe, Co и Ni (3d-металлы) и редкоземельные металлы Gd, Tb, Dy, Ho, Er.

Ферромагнитными являются также многочисленные металлические бинарные и более сложные (многокомпонентные) сплавы и соединения этих металлов между собой и с другими неферромагнитными элементами; сплавы и соединения хрома (Cr) и марганца (Mn) с неферромагнитными элементами (Cu<sub>2</sub>MnAl, Au<sub>4</sub>V, Sc<sub>3</sub>In и др.).

Основные свойства ферромагнетиков, выделяющие их из группы парамагнетиков: а) магнитная восприимчивость ферромагнетиков  $\mu \gg 1$ ; б) для ферромагнетиков характерно явление гистерезиса; в) ферромагнетики притягиваются магнитом; г) сильная зависимость магнитных свойств от температуры.

При повышении температуры способность ферромагнетиков намагничиваться уменьшается. При некоторой температуре (которая называется точкой Кюри  $T_K$ ) вещество теряет ферромагнитные свойства и становится обычным парамагнетиком. Для некоторых металлов значения  $T_K$  приведены в прил. П10.

При температурах ниже точки Кюри в ферромагнетике формируются малые области с высокой однородной самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью – *домены*. Линейные размеры доменов – 1–10 мкм. Образование этих областей связано с тем, что электроны обладают собственным моментом импульса – *спином*, которому соответствует собственный *спиновый магнитный момент*.

В определенных условиях спиновые магнитные моменты электронов соседних атомов кристаллической решетки выстраиваются параллельно друг другу, что приводит к большой намагниченности внутри домена.

В отсутствие магнитного поля магнитные моменты доменов ориентированы в пространстве так, что результирующий магнитный момент всего ферромагнетика равен нулю. При наложении магнитного поля ферромагнетик намагничивается, т. е. приобретает отличный от нуля магнитный момент.

Поведение ферромагнетика в магнитном поле характеризуется кривой намагничивания, т. е. зависимостью намагниченности  $\vec{J}$  ферромагнетика от напряженности внешнего намагничивающего поля  $\vec{H}$ . Для ферромагнетиков эта зависимость имеет сложный вид. На рис. 47.1 представлена кривая намагничивания предварительно полностью размагниченного образца. Действие внешнего поля на домены на разных стадиях процесса намагничивания оказывается различным.

В сравнительно слабых полях наблюдается смещение границ доменов. При этом происходит увеличение объема тех областей спонтанной намагниченности, моменты которых составляют меньший угол с вектором  $\vec{H}$  за счет областей, у которых этот угол больше, так как последние находятся в энергетически менее выгодном состоянии. В области слабых полей (область I) указанные процессы обратимы.

С увеличением поля процесс смещения границ становится необратимым (область 2), т. е. при выключении поля в ферромагнетике будет сохраняться некоторая остаточная намагниченность.

С ростом  $H$  уменьшается количество энергетически «невыгодных» доменов, вектор намагниченности которых составляет с направлением внешнего поля угол больший  $\sim 90^\circ$ . При некотором значении  $H$  эти домены вовсе исчезают. Если поле увеличивается еще больше, то возникает новый тип процесса намагничивания, связанный с поворотом магнитных моментов доменов в направлении  $\vec{H}$  (область 3). Наконец, в сильном поле магнитные моменты всех доменов устанавливаются параллельно полю. В этом состоянии образец имеет наибольший возможный при данной температуре магнитный момент, т. е. намагничен до значения насыщения  $J_{\text{нас}}$ . Напряженность внутреннего поля ферромагнетика, соответствующая состоянию насыщения, может значительно превышать напряженность намагничивающего поля.

Зависимость индукции  $B$  внутри ферромагнетика от напряженности намагничивающего поля также имеет сложный характер (рис. 47.2). Вначале с увеличением  $H$  индукция возрастает быстро, но по мере намагничивания образца ее дальнейшее нарастание замедляется. Когда собственное поле вещества достигает насыщения, магнитная индукция возрастает по линейному закону в зависимости от напряженности поля:  $B = \mu_0 H + B_0$ , где  $B_0 = \mu_0 J_{\text{нас}}$ .

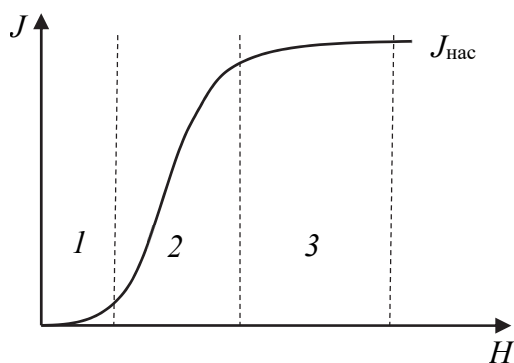


Рис. 47.1

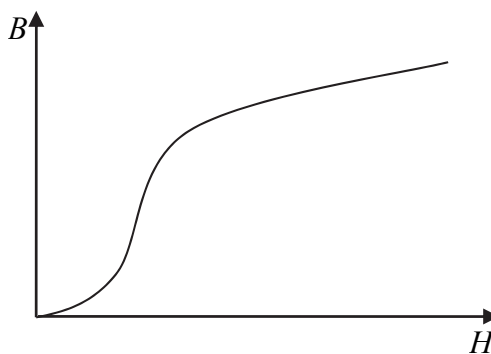


Рис. 47.2

Вследствие нелинейности зависимости  $B(H)$  магнитная проницаемость  $\mu$  не является постоянной величиной и также зависит от напряженности внешнего поля (рис. 47.3). С увеличением  $H$  магнитная проницаемость сначала возрастает от неко-

торого начального значения до максимального, а затем уменьшается, асимптотически приближаясь к единице, так как при очень больших напряжениях можно пренебречь слагаемым  $B_0$  по сравнению с  $\mu_0 H$ . Максимальные значения  $\mu$  для ферромагнетиков очень велики ( $10^3$ – $10^6$ ). Для ферромагнетиков

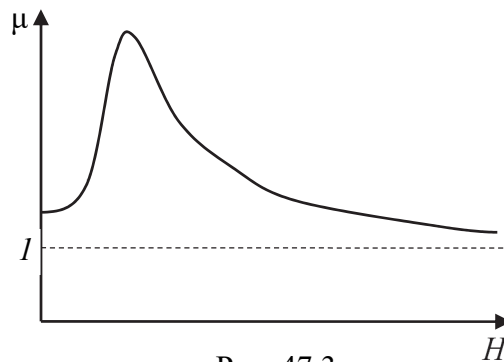


Рис. 47.3

характерно явление *магнитного гистерезиса*, т. е. зависимость вектора намагниченности не только от приложенного внешнего поля, но и от предыстории данного образца. Гистерезис проявляется при циклическом перемагничивании ферромагнетика, когда зависимость как  $J(H)$ , так и  $B(H)$ , приобретает вид замкнутой петли – *петли гистерезиса* (рис. 47.4).

Если вначале образец полностью размагничен, то при монотонном изменении  $H$  от нуля изменение индукции  $B$  происходит по начальной (основной) кривой намагничивания  $0$ – $1$ . После достиже-

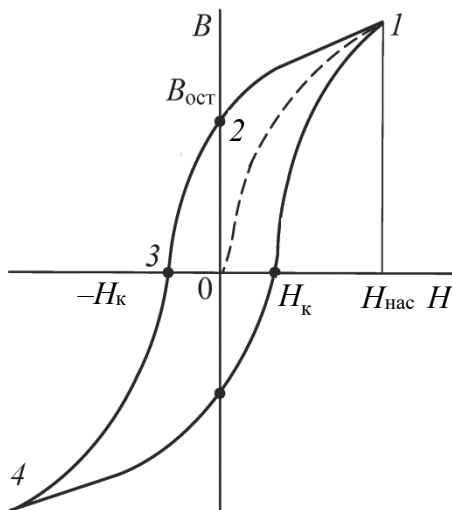


Рис. 47.4

ния состояния насыщения (точка 1), которому соответствует напряженность поля  $H_{\text{нас}}$ , начнем уменьшать напряженность до нуля. Индукция  $B$  при этом будет уменьшаться по кривой  $1$ – $2$ . Таким образом, происходит отставание индукции поля в образце от напряженности намагничивающего поля.

Вследствие гистерезиса величина  $B$  после снятия поля не обращается в нуль, а сохраняет некоторое значение (отрезок  $0$ – $2$ ), называемое *остаточной индукцией*  $B_{\text{ост}}$  (этим объясняется существование

постоянных магнитов). Остаточная индукция обусловлена тем, что и после прекращения действия внешнего поля у части доменов сохраняется преимущественная ориентация их магнитных моментов. Для полного размагничивания ( $B = 0$ ) образца необходимо приложить противоположно направленное поле. Величина этого поля

(отрезок 0–3) называется *коэрцитивной силой*  $H_k$ . При дальнейшем увеличении внешнего поля, противоположного первоначальному, намагниченность образца снова достигает насыщения (точка 4). Возвращаясь постепенно к напряженности намагничивающего поля  $+H_{\text{нас}}$ , получим замкнутую кривую, которая называется *петлей гистерезиса*. Петлю называют *максимальной*, если напряженность внешнего поля изменяется от  $-H_{\text{нас}}$  до  $+H_{\text{нас}}$  и обратно.

При напряженности переменного магнитного поля  $H < H_{\text{нас}}$  петля носит название *частного цикла*. Все частные циклы лежат внутри максимальной кривой гистерезиса. Вершины частных циклов лежат на основной кривой намагничивания 0–1. Гистерезис приводит к тому, что намагниченность ферромагнетика не является однозначной функцией напряженности намагничивающего поля; она в сильной степени зависит от предыстории образца, от того, в каких полях он находился прежде.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна количеству теплоты, выделяющейся при перемагничивании. Основными характеристиками петли гистерезиса являются остаточная индукция  $B_{\text{ост}}$ , коэрцитивная сила  $H_k$  и площадь петли гистерезиса, характеризующая тепловые потери мощности  $P$  на гистерезис за один цикл перемагничивания:  $P = \oint H dB$  (Вт/м<sup>3</sup>).

В зависимости от значения коэрцитивной силы  $H_k$  ферромагнетика можно поделить на 2 класса: магнитомягкие ( $H_k$  не превышает 4 кА/м) и магнитотвердые (свыше 4 кА/м). Магнитомягкие материалы используются в качестве магнитопроводов трансформаторов, электромагнитов, в измерительных приборах и в других случаях, где необходимо снизить потери на перемагничивание, приводящие в том числе и к вредному для эксплуатации изделия нагреву. Из магнитотвердых материалов изготавливают магниты, которые являются источниками постоянных магнитных полей, используемых в различной аппаратуре в электро- и радиотехнике, электродвигателях и т. д.

## 2. Описание метода измерений и установки

Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 47.5. Образцы представляют собой трансформаторы, имеющие ферромагнитный сердечник, с первичной обмоткой  $L_1$  и вто-

ричной  $L_2$ . Для питания первичной обмотки образца используется трансформатор со ступенчатой регулировкой выходного напряжения, выбор которого осуществляется переключателем  $SA_1$ .

Резистор  $R_1$  предназначен для контроля тока в первичной обмотке  $L_1$ ; сигнал, подаваемый с резистора на вход  $X$  осциллографа, пропорционален напряженности  $H$  электрического поля в образце (сердечнике трансформатора). Цепь  $R_2C$ , подключенная к вторичной обмотке  $L_2$  образца, выполняет функцию интегрирования напряжения так, что напряжение на конденсаторе, которое подается на вход  $Y$  осциллографа, пропорционально индукции  $B$  магнитного поля в образце. Размещенный в отдельном блоке (пластмассовом корпусе) исследуемый образец представляет собой сердечник трансформатора  $Tr_1$ . Блоков всего три, причем каждый из них содержит только один тип исследуемого материала: трансформаторная сталь (образец № 1), феррит (№ 2) и обычная сталь (№ 3).

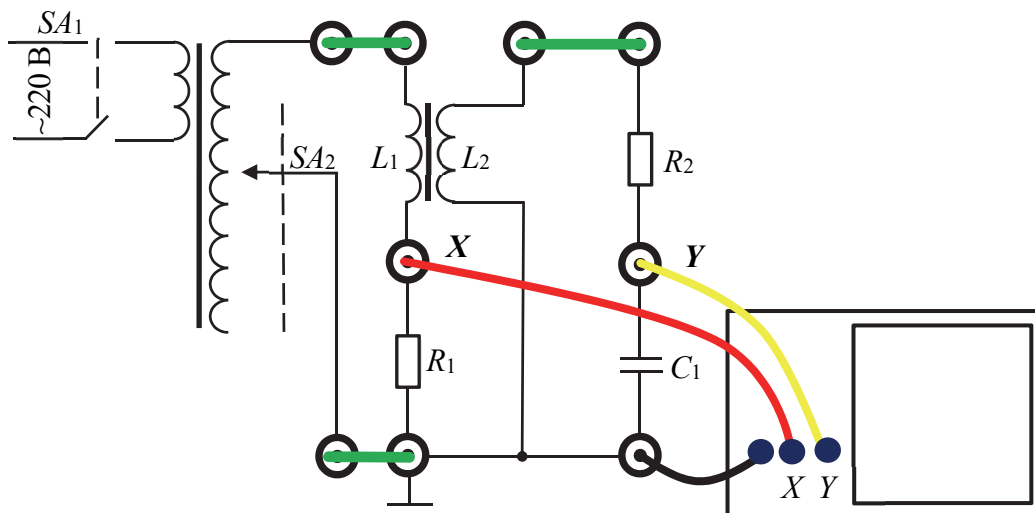


Рис. 47.5

Напряжение на резисторе  $R_1$  связано с силой тока, текущего через него, законом Ома:  $U = I / R_1$ . Такая же сила тока будет и в первичной обмотке  $L_1$ , причем напряженность  $H$  магнитного поля, создаваемого данной обмоткой трансформатора в сердечнике, будет определяться выражением  $H = IN_1 / l$ , где  $N_1$  – число витков первичной обмотки, а  $l$  – средняя длина линии напряженности в магнитопроводе. Окончательно получим

$$H = \frac{N_1}{lR_1}U = k_H U, \text{ где } k_H = \frac{N_1}{lR_1}. \quad (47.6)$$

Здесь коэффициент  $k_H$  определяется параметрами конкретного используемого в работе блока. Таким образом, переменное напряжение с резистора  $R_1$ , подаваемое на вход осциллографа, пропорционально значению напряженности  $H(t)$  намагничивающего поля в сердечнике.

Напряжение  $U_C$  на конденсаторе  $C$  пропорционально индукции  $B$  магнитного поля в образце:

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_C = k_B U_C, \text{ где } k_B = \frac{R_2 C}{N_2 S}. \quad (47.7)$$

Здесь  $R_2$  – значение сопротивления резистора;  $C$  – емкость конденсатора;  $N_2$  – число витков вторичной обмотки трансформатора  $L_2$ ;  $S$  – площадь сечения сердечника трансформатора.

Таким образом, подавая напряжение  $U_C$  на вход  $Y$ , а напряжение с резистора  $R_1$  на вход  $X$  осциллографа, на его экране будет наблюдаться петля гистерезиса, внешний вид которой изображен на рис. 47.4. Ступенчато изменяя напряжение переключателем  $SA_2$ , можно масштабировать петлю на экране осциллографа, получая последовательно семейство петель гистерезиса вплоть до предельной. Измерив координаты вершин петель, можно построить основную кривую намагничивания.

Значения напряжений  $U$  и  $U_C$  определяются по координатам  $X$  и  $Y$  вершины петли на экране осциллографа:

$$U = \delta_X X; \quad (47.8)$$

$$U_C = \delta_Y Y, \quad (47.9)$$

где  $\delta_X$  и  $\delta_Y$  – чувствительности горизонтального и вертикального отклонений осциллографа;  $X$  и  $Y$  – соответствующая координата правой вершины петли, выраженная в больших делениях экрана. С учетом 47.6 и 47.7 окончательно получим

$$H = \delta_X k_H X; \quad (47.10)$$

$$B = \delta_Y k_B Y. \quad (47.11)$$

Значения всех параметров, необходимых для вычисления масштабных коэффициентов  $k_H$  и  $k_B$ , приведены в приложении к данной работе.

### 3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

$N_1 =$	$l =$	$R_1 =$	$R_2 =$	$C =$	$N_2 =$	$S =$
$U_{\max} =$	$\delta_X =$	$\delta_Y =$	$k_H =$	$k_B =$	$H_K =$	
$i$	$U_i$	$X, \text{ дел}$	$Y, \text{ дел}$	$X_K, \text{ дел}$	$H,$	$B,$

2. Занесите в таблицу значения параметров модуля, указанных в приложении. Номер блока (1, 2 либо 3), для которого следует заносить данные в таблицу, уточните у преподавателя. Изучите экспериментальную установку, убедитесь в правильности подключения осциллографа к модулю. После разрешения преподавателя включите оборудование в электрическую сеть и, пользуясь приложением, подготовьте осциллограф к работе.

3. Управляя переключателем  $SA_2$ , получите на экране максимальную петлю гистерезиса и убедитесь, что она не выходит за пределы рабочей области осциллографа и расположена в центре экрана. При необходимости включите делитель на щупе или измените чувствительность (В/дел) по вертикали и горизонтали с помощью соответствующих ручек на лицевой панели осциллографа. Запишите в шапку таблицы установленное переключателем  $SA_2$  значение напряжения  $U_{\max}$  (оно будет находиться в диапазоне от  $U_6$  до  $U_{11}$ ).

4. Занесите в таблицу соответствующие значения чувствительности  $\delta_x$  и  $\delta_y$  по горизонтали и вертикали, предварительно разделив полученное число на значение делителя на щупе соответствующего канала (на 1 или 10).

5. Установите на делителе напряжения  $SA_2$  значение  $U_1$ . Внесите в таблицу значение абсциссы  $X$  и ординаты  $Y$  правой верхней вершины петли в больших делениях.

6. Аналогично снимите координату вершины петли ( $X$  и  $Y$ ) для положений  $U_2, U_3, \dots, U_{\max}$ . Для максимальной петли (при  $U_{\max}$ ) найдите значение абсциссы  $X_K$  точки пересечения петли с осью в больших делениях (см. рис. 47.4).

7. Выключите блок и осциллограф, достаньте шнуры питания из розетки.

8. Покажите результаты измерений преподавателю. По его указанию подключите следующий блок к осциллографу.

9. Подготовьте еще одну таблицу и выполните п. 2–7. Выключите установку.

10. Пользуясь формулами (47.6) и (47.7), рассчитайте вначале коэффициенты  $k_H$  и  $k_B$ , а затем, пользуясь формулами (47.10) и (47.11), вычислите значения напряженности  $H_i$  и индукции магнитного поля  $B_i$  для каждой петли. Все значения занесите в таблицу.

11. Постройте график зависимости индукции магнитного поля от его напряженности в сердечнике, т. е.  $B = B(H)$ .

12. Найдите значение коэрцитивной силы  $H_k$  по формуле  $H_k = \delta_X k_H X_k$ , занесите значение в таблицу. Определите класс ферромагнетика. Подготовьте выводы к лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. На какие классы подразделяются магнетики? 2. Каков физический смысл магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости? 3. Каковы магнитные свойства ферромагнетиков? 4. Каковы особенности кривой намагничивания ферромагнетика? 5. В чем состоит явление магнитного гистерезиса? 6. Чем отличаются и где применяются магнитомягкие и магнитотвердые ферромагнетики?

## Лабораторная работа № 48 ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

**Цель работы:** освоить осциллографический метод исследования намагничивания ферромагнетика; построить основную кривую намагничивания, определить коэрцитивную силу  $H_k$  и остаточную индукцию  $B_{ост}$  ферромагнетика осциллографическим методом.

### 1. Теоретическое введение

Изучите теоретическое введение к лабораторной работе № 47.

## 2. Описание метода измерений и установки

Принципиальная схема установки для определения параметров петли гистерезиса осциллографическим методом приведена на рис. 48.1. Переменное напряжение частотой 50 Гц подается от лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа).

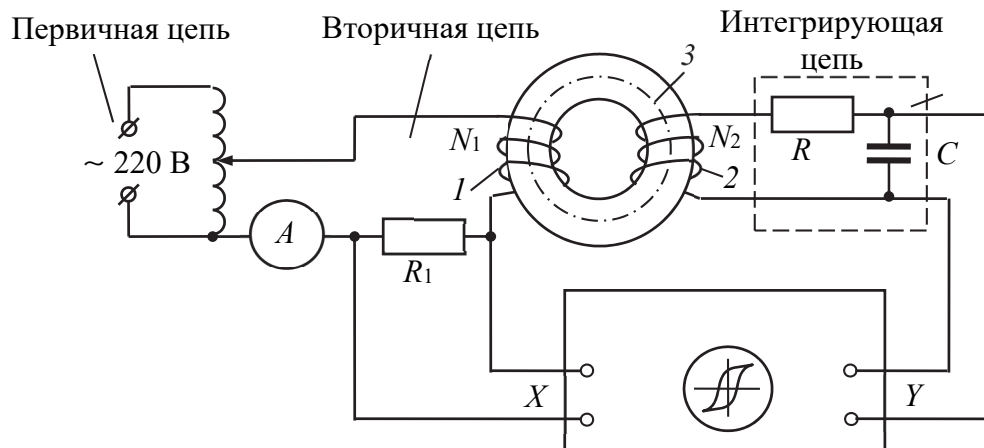


Рис. 48.1

Намагничивающая 1 и измерительная 2 обмотки намотаны на образец изучаемого ферромагнетика, который выполнен в виде тороида 3. Число витков в обмотках равно соответственно  $N_1$  и  $N_2$ . Чтобы на экране осциллографа можно было наблюдать петлю гистерезиса ( $B = f(H)$ ), необходимо на вход X подать напряжение, которое пропорционально напряженности  $H$  намагничивающей катушки 1, а на вход Y – напряжение, пропорциональное индукции  $B$  в тороиде 3.

Если витки тороидальной катушки 3 уложены равномерно, то напряженность магнитного поля этой катушки со средним радиусом  $a$  и числом витков на единицу длины  $n = \frac{N_1}{2\pi a}$  будет  $H = nI = \frac{N_1 I_1}{2\pi a}$ , где  $N_1$  – полное число витков обмотки 1. С помощью закона Ома выразим силу  $I_1$  тока в первичной цепи через падение напряжения  $U_1$ , которое снимается с активного сопротивления  $R_1$  и подается на вход X. Используя формулу для напряженности магнитного поля тороида, получим

$$H = \frac{N_1 I_1}{2\pi a} = \frac{N_1 U_1}{2\pi a R_1} \Rightarrow U_1 = \frac{2\pi a R_1}{N_1} H. \quad (48.1)$$

Таким образом, горизонтальная развертка луча осциллографа осуществляется напряжением  $U_1(t)$ , которое пропорционально мгновенному значению напряженности  $H(t)$  намагничивающего поля в сердечнике.

В соответствии с законом Фарадея – Ленца, в измерительной обмотке 2 возникает ЭДС индукции, которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока  $\Phi_m = BS$ , т. е.

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (48.2)$$

где  $N_2$  – полное число витков в обмотке 2;  $S$  – площадь поперечного сечения тороидального сердечника.

Для получения напряжения, которое пропорционально индукции  $B$ , во вторичную цепь включена интегрирующая  $RC$ -ячейка. Ее параметры подбираются таким образом, чтобы напряжение на активном сопротивлении  $R$  ( $U_R = I_2 R$ ) было много больше, чем ЭДС самоиндукции в катушке 2 ( $\mathcal{E}_c = -L \frac{dI_2}{dt}$ ) и напряжение  $U_C$  на кон-

денсаторе ( $U_C = \frac{q}{C}$ ). Тогда с помощью 2-го правила Кирхгофа для вторичной цепи получим приближенное уравнение, которое с учетом выражения (48.2) определяет силу  $I_2$  тока во вторичной цепи:

$$\mathcal{E}_2 \approx I_2 R \Rightarrow I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R} = -\frac{N_2 S}{R} \frac{dB}{dt}. \quad (48.3)$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2(t) dt = -\frac{N_2 S}{RC} \int dB(t) = -\frac{N_2 S}{RC} B, \quad (48.4)$$

которое пропорционально индукции  $B$ , подается на вход  $Y$  осциллографа. Из формул (48.1) и (48.4) выразим напряженность магнитного поля и абсолютное значение магнитной индукции в сердечнике тороида:

$$H = \frac{N_1}{2\pi r R_1} U_1; \quad B = \frac{RC}{N_2 S} U_C. \quad (48.5)$$

Значения напряжений  $U_1$  и  $U_C$  определяются по размахам  $X$  и  $Y$  отклонений луча на экране осциллографа (рис. 48.2), т. е.

$$U_1 = 0,5\delta_x X; \quad (48.6)$$

$$U_C = 0,5\delta_y Y, \quad (48.7)$$

где  $\delta_x$  и  $\delta_y$  – чувствительности горизонтального и вертикального отклонений осциллографа;  $X$  и  $Y$  – число делений на шкалах экрана, соответствующее размаху луча по осям  $OX$  или  $OY$  в обе стороны, т. е. вершинам  $A_1$  и  $A_2$  петли.

Для построения основной кривой намагничивания нужно определить координаты точек вершин петли для разных значений напряженности  $H$ , т. е. разных значений силы  $I$  тока в первичной цепи. Чтобы определить коэрцитивную силу  $H_k$  и остаточную индукцию  $B_{ост}$ , необходимо найти координаты точек пересечения петли гистерезиса с горизонтальной ( $A_3$ ) и вертикальной ( $A_4$ ) осями сетки на экране осциллографа. Значения параметров, требуемых для расчетов, указаны в приложении к работе. Значения  $R$  и  $C$  устанавливаются на магазине сопротивлений и емкостей в процессе выполнения работы. Значение  $\delta_y$  определяется по положению указателя на переключателе чувствительности («В/дел»), расположенного на передней панели осциллографа. Значение  $\delta_x$  указано на установке.

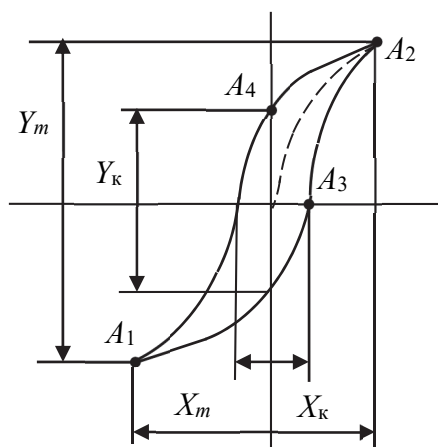


Рис. 48.2

### 3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

$N_1 =$		$N_2 =$		$S =$		$a =$		$R =$		$C =$	
$i$	$I$	$X_k$	$Y_k$	$X_m$	$Y_m$	$\delta_x$	$\delta_y$	$H_k$	$B_{ост}$	$H_m$	$B_m$

2. По приложению к установке ознакомьтесь с расположением элементов управления на передней панели осциллографа. Определите цену деления амперметра на всех диапазонах измерения.

Переключателем на амперметре установите диапазон, обеспечивающий измерение тока 1 А.

3. Включите осциллограф. Регуляторами на передней панели выведите световую точку в центр экрана.

4. Рукоятку ЛАТРа установите в положение «0». С разрешения преподавателя или лаборанта включите установку в сеть.

5. Установите ЛАТРоМ ток в обмотке тороида  $I = 0,6$  А. Получите максимальное изображение петли гистерезиса в пределах экрана осциллографа, манипулируя ручкой «В/дел» осциллографа и изменяя величину сопротивления  $R$  и емкости  $C$  на магазинах сопротивлений и емкостей. Запишите эти значения в верхнюю графу таблицы (значения  $R$  и  $C$  подберите, ориентируясь по внешнему виду петли из диапазона 8,0–9,5 кОм и 0,4–0,8 мкФ соответственно). Сцентрируйте петлю относительно начала координатной сетки на экране осциллографа. Снова выставьте рукоятку ЛАТРа в исходное положение (ток равен нулю).

6. Поворотом рукоятки ЛАТРа установите по амперметру ток 0,1 А и запишите координаты точек пересечения петли гистерезиса с осями координат  $X_k$ ,  $Y_k$  и вершин петли  $X_m$ ,  $Y_m$  в делениях шкалы экрана (рис. 48.2).

7. Повторите эти измерения, меняя ток с интервалом 0,05 А до 0,6 А. Результаты занесите в таблицу.

8. По формулам (48.5), (48.6) и (48.7) вычислите значения напряженности  $H_m$  и индукции  $B_m$  в вершинах петли для каждого значения силы тока; значения коэрцитивной силы  $H_k$  и остаточной индукции  $B_{ост}$  вычислите только для максимальной петли гистерезиса.

9. Постройте основную кривую намагничивания  $B_m(H_m)$ .

10. Определите значения  $H_k$  и  $B_{ост}$  при максимальном значении тока в намагничивающей обмотке. Определите класс ферромагнетика.

11. Подготовьте выводы по лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Связь индукции  $\vec{B}$ , намагниченности  $\vec{J}$  с напряженностью  $\vec{H}$  магнитного поля. 2. В чем заключается явление магнитного гистерезиса? 3. Что такое коэрцитивная сила  $H_k$  и остаточная индукция  $B_{ост}$ ? Изобразите  $H_k$  и  $B_{ост}$  на рисунке. 4. Чем отличаются и где применяются магнитомягкие и магнитотвердые ферромагнетики?

## Лабораторная работа № 49

### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

**Цель работы:** изучить явление электромагнитной индукции; экспериментально установить зависимость электродвижущей силы индукции от потокосцепления, магнитной проницаемости среды, амплитуды и частоты переменного тока, возбуждающего ЭДС.

#### 1. Теоретическое введение

*Электромагнитная индукция* – явление возникновения в проводнике, находящемся в переменном магнитном поле или движущемся в постоянном магнитном поле, электродвижущей силы (ЭДС индукции). В замкнутом проводнике (в проводящем контуре) при этом появляется индукционный ток. ЭДС индукции возникает в проводнике тогда, когда проводник или какая-либо его часть пересекает силовые линии магнитного поля.

Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея – Ленца) формулируется следующим образом: ЭДС индукции в контуре прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (49.1)$$

Знак «минус» определяет направление индукционного тока в соответствии с *правилом Ленца*: индукционный ток в контуре направлен таким образом, что создаваемый им поток магнитной индукции через поверхность, ограниченную контуром, стремится препятствовать тому изменению потока, которое вызвало данный ток. Явление электромагнитной индукции лежит в основе принципа действия генераторов и трансформаторов переменного электрического тока.

Магнитный поток (поток вектора  $\vec{B}$  индукции магнитного поля) через поверхность, ограниченную контуром, определяется интегралом по площади  $S$  поверхности, охватываемой контуром:

$$\Phi = \int \vec{B} \vec{n} dS, \quad (49.2)$$

где  $\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля;  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к поверхности  $S$  в каждой ее точке;  $dS$  – бесконечно малый

элемент поверхности;  $\vec{B}\vec{n}$  – скалярное произведение векторов. В случае однородного магнитного поля ( $\vec{B} = \text{const}$ ) поток через поверхность площадью  $S$

$$\Phi = BS \cos \theta, \quad (49.3)$$

где  $\theta$  – угол между направлением вектора  $\vec{B}$  (направлением силовых линий поля) и нормалью к поверхности  $S$ .

Изменение магнитного потока и, следовательно, возникновение ЭДС индукции может быть обусловлено изменениями: значения индукции поля; площади поверхности, ограниченной контуром; расположения контура относительно силовых линий поля. Поток вектора индукции магнитного поля через поверхность  $S$  равен (или пропорционален) количеству силовых линий поля, проходящих через эту поверхность. Единица измерения магнитного потока в СИ  $[\Phi] = \text{Вб}$ .

Для иллюстрации правила Ленца рассмотрим (рис. 49.1) контур, находящийся в магнитном поле. Поток силовых линий направлен по вектору  $\vec{n}$ . Пусть индукция магнитного поля возрастает со временем. При этом силовые линии поля сгущаются и при таком изменении пересекают проводящий контур, возбуждая ЭДС индукции. В соответствии с правилом Ленца возникающий при этом индукционный ток  $I_{\text{инд}}$  в контуре направлен таким образом, что силовые линии создаваемого им магнитного поля направлены против линий индукции внешнего поля (на рисунке против вектора  $\vec{n}$ ), что препятствует возрастанию первичного магнитного поля.

При уменьшении индукции магнитного поля, в котором находится контур, направление индукционного тока  $I_{\text{инд}}$  изменится на противоположное так, что силовые линии индуцированного поля будут иметь одинаковое направление с линиями индукции первичного поля и препятствовать его ослаблению.

Возникновение ЭДС индукции в проводнике обусловлено действием магнитного поля на носители тока. Для иллюстрации механизма такого действия рассмотрим движение прямолинейного проводника конечной длины  $l$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  со скоростью  $\vec{v}$  перпендикулярно силовым линиям поля (рис. 49.2, а). Движущийся проводник пересекает силовые линии поля, и в нем возникает ЭДС индукции. Поток пересекаемых проводником за бесконечно малый интервал времени  $dt$  силовых линий  $d\Phi = B dS = Blv dt$ . Тогда значение ЭДС индукции в проводнике

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{Blv dt}{dt} = Blv.$$

За счет ЭДС индукции происходит разделение электрических зарядов, и на концах проводника возникает разность потенциалов, равная ЭДС.

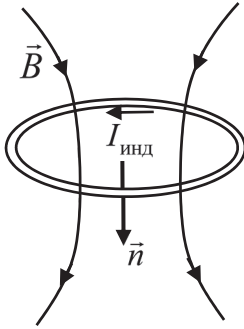


Рис. 49.1

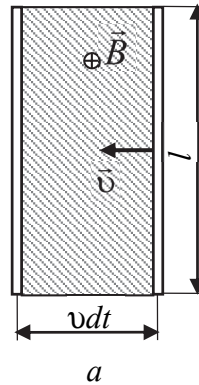
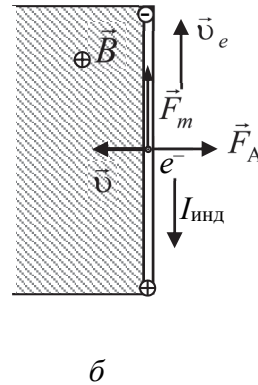


Рис. 49.2



Определим силы, действующие на электрон проводимости металлического проводника, движущегося в магнитном поле со скоростью движения проводника  $\vec{v}$  (рис. 49.2, б). Со стороны магнитного поля на электрон действует составляющая силы Лоренца  $\vec{F}_m = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ , направленная вверх. Под ее действием электроны смещаются к верхнему концу проводника, на котором образуется избыточный отрицательный заряд. На нижнем конце проводника из-за недостатка электронов образуется избыточный положительный заряд (заряд ионизированных атомов, расположенных в узлах кристаллической решетки металла). Движению электронов вверх со скоростью  $\vec{v}_e$  соответствует индукционный ток  $I_{\text{инд}}$  противоположного направления. На проводник с индукционным током со стороны магнитного поля действует сила Ампера  $\vec{F}_A = I[\vec{l} \times \vec{B}]$ , направленная в сторону, противоположную направлению движения проводника и препятствующая этому движению, что находится в соответствии с правилом Ленца.

При протекании индукционного тока на каждый из его носителей в проводящем контуре действует магнитная составляющая силы Лоренца  $\vec{F}_m = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ . Электроны проводимости движутся в

проводнике под действием этой сторонней силы. Разность потенциалов между любыми двумя точками проводящего контура равна при этом нулю.

Электрическое поле сторонних сил напряженностью  $\vec{E}_{\text{ст}}$  возникает в пространстве и в отсутствие проводящего контура. Контур является лишь прибором, позволяющим обнаружить это поле. Силовые линии электрического поля, возбуждаемого изменяющимся магнитным полем, замкнуты. Такое электрическое поле, в отличие от поля, создаваемого электрическими зарядами, *вихревое*.

Выражая ЭДС индукции через циркуляцию вектора напряженности сторонних сил  $\vec{E}_{\text{ст}}$  и используя определение магнитного потока (49.2), закон электромагнитной индукции можно записать в виде

$$\oint \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \vec{n} dS. \quad (49.4)$$

Выражение (49.4) является уравнением Максвелла, утверждающим, что изменяющимся во времени магнитным полем создается вихревое электрическое поле.

Частным случаем электромагнитной индукции является *самоиндукция* – явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении силы тока в этом же контуре. Ток в контуре создает магнитное поле, индукция которого пропорциональна силе тока  $B \sim I$ . Силовые линии этого поля проходят через поверхность, ограниченную контуром, и, в соответствии с (49.2), такой собственный магнитный поток  $\Phi \sim B$ . Следовательно, поток через контур вектора индукции магнитного поля, создаваемого током в этом же контуре, пропорционален силе тока:  $\Phi \sim I$ . Запишем это соотношение в виде равенства:

$$\Phi = LI, \quad (49.5)$$

где коэффициент пропорциональности  $L$  – *индуктивность* контура.

Значение индуктивности зависит от формы и размеров контура, а также от свойств среды, в которой находится контур. Единица измерения индуктивности в СИ  $[L] = \text{Гн}$ .

При изменении во времени силы тока в контуре изменяется магнитный поток  $\Phi$ , и в контуре возникает ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt}(LI). \quad (49.6)$$

Если индуктивность контура не зависит от силы тока в контуре, то ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока:

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (49.7)$$

Для создания магнитного поля часто применяются катушки индуктивности – соленоиды и тороиды, состоящие из большого числа витков провода с изоляцией, намотанных на цилиндрический либо тороидальный каркас.

Индукция магнитного поля в длинном соленоиде, длина которого во много раз больше его диаметра, составляет

$$B = \mu \mu_0 n_0 I, \quad (49.8)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала сердечника, который может быть размещен внутри катушки;  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $n_0$  – количество витков соленоида в расчете на единицу длины (плотность витков);  $I$  – сила тока в обмотке соленоида. Магнитное поле внутри длинного соленоида однородно, его силовые линии параллельны оси соленоида и составляют правовинтовую систему с направлением тока в витках обмотки.

При выводе формулы для определения индуктивности соленоида в выражении (49.5) учитывается поток через все  $N$  витков катушки, называемый *потокосцеплением* соленоида:  $\Psi = N\Phi$ . Потокосцепление представляет собой суммарный магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками катушки индуктивности. *Индуктивность соленоида*

$$L = \frac{\Psi}{I} = \mu \mu_0 n_0^2 V, \quad (49.9)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала сердечника;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $n_0$  – плотность витков;  $V$  – объем соленоида. Формулы (49.8) и (49.9) применимы и для определения индукции магнитного поля  $B$  и индуктивности  $L$  тороидальной катушки.

## 2. Описание установки и метода измерений

Электрические схемы установки для изучения явлений электромагнитной индукции приведены на рис. 49.3 и 49.4. В состав установки входят генератор переменного тока, который является источником питания электрической цепи, а также понижающий

трансформатор  $\text{Tr}$ , соленоид  $L_1$  и секционная катушка  $L_2$ , миллиамперметр  $mA$  и вольтметр  $V$ . Соленоид  $L_1$  представляет собой многослойную первичную катушку. Поверх его многослойной обмотки намотаны девять секций катушки  $L_2$  с выводами каждой из секций на клеммы.

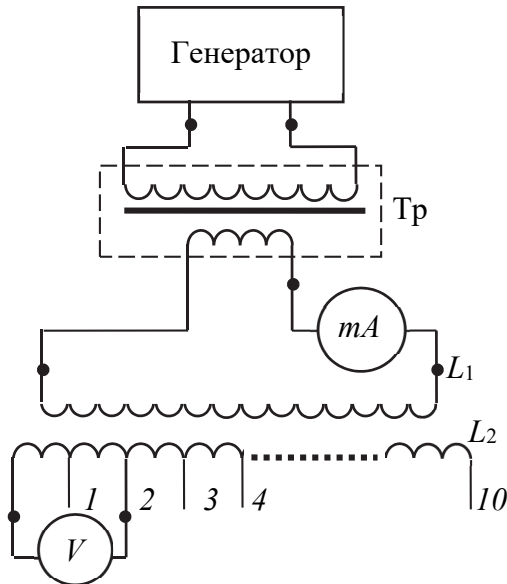


Рис. 49.3

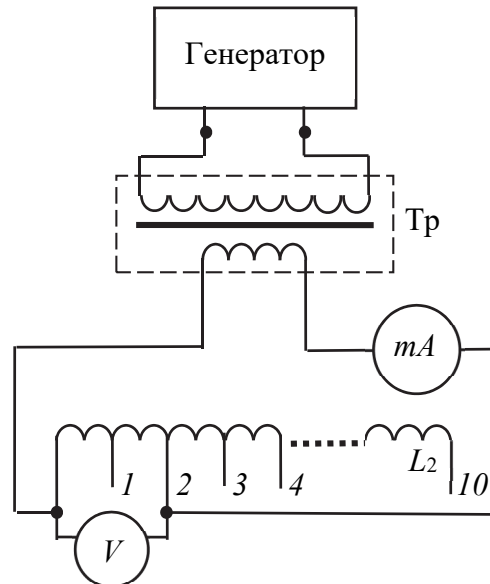


Рис. 49.4

При экспериментальном изучении электромагнитной индукции в заданиях 1 и 2 через обмотку соленоида  $L_1$  (рис. 49.3) пропускается периодически изменяющийся во времени переменный ток:

$$I = I_m \cos 2\pi \nu t, \quad (49.10)$$

где  $I_m$  – амплитудное значение силы тока;  $\nu$  – частота.

В соленоиде  $L_1$  возбуждается магнитное поле, индукция которого (см. (49.8)) также периодически изменяется во времени:

$$B = \mu \mu_0 n_0 I_m \cos 2\pi \nu t = B_m \cos 2\pi \nu t, \quad (49.11)$$

где  $B_m$  – амплитудное значение индукции.

Это магнитное поле создает изменяющийся во времени магнитный поток через поперечное сечение  $S$  соленоида  $L_1$ :

$$\Phi = B_m S \cos 2\pi \nu t = \Phi_m \cos 2\pi \nu t, \quad (49.12)$$

что в соответствии с законом Фарадея – Ленца индуцирует в секциях вторичной катушки  $L_2$  ЭДС:

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\mu\mu_0 n_0 I_m S \cos 2\pi\nu t) = \\ &= 2\pi\nu\mu\mu_0 n_0 I_m S \sin 2\pi\nu t = \mathcal{E}_m \sin 2\pi\nu t.\end{aligned}\quad (49.13)$$

ЭДС индукции периодически изменяется во времени с частотой  $\nu$  изменения тока в первичной катушке  $L_1$ , а ее амплитудное значение  $\mathcal{E}_m$  прямо пропорционально амплитудному значению силы тока  $I_m$ , частоте тока  $\nu$  и магнитной проницаемости  $\mu$  сердечника:

$$\mathcal{E}_m = 2\pi\nu\mu\mu_0 n_0 I_m S. \quad (49.14)$$

При выполнении измерений на панели управления генератора переменного тока задается действующее значение силы тока  $I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$  через обмотку соленоида  $L_1$  и его частота  $\nu$ . Сила тока  $I_d$  измеряется миллиамперметром  $mA$ . Действующее значение ЭДС индукции  $\mathcal{E}_d = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}$  на выводах секций вторичной катушки  $L_2$  измеряется вольтметром  $V$ . Каждая секция вторичной катушки содержит  $n = 100$  витков провода, которые в первых восьми секциях намотаны в одном направлении, а в последней (девятой) – в противоположном. Измеряемое значение ЭДС индуцированной в секциях вторичной катушки зависит от числа витков в этих секциях, а также от знака магнитного потока через витки.

Сравнивая результаты измерения ЭДС в катушке без сердечника и с сердечником, можно определить магнитную проницаемость  $\mu$  материала сердечника. Измеренное значение ЭДС индукции во вторичной катушке пропорционально амплитудному значению  $\Phi_m$  магнитного потока через поперечное сечение катушки  $L_2$ . Поэтому отношение ЭДС индукции, возникающей в секциях при наличии сердечника, к ЭДС тех же секций без сердечника

$$\frac{\mathcal{E}^c}{\mathcal{E}^B} = \frac{\Phi_m^c}{\Phi_m^B} = \frac{B_m^c S_c + B_m^B (S_B - S_c)}{B_m^B S_B}, \quad (49.15)$$

где  $B_m^c$  и  $B_m^B$  – амплитудные значения индукции магнитного поля в поперечных сечениях сердечника площадью  $S_c$  и воздушного пространства внутри соленоида площадью  $S_B$ ;  $S_B - S_c$  – площадь поперечного сечения воздушного пространства в соленоиде с помещенным внутрь его сердечником.

Поскольку  $B_m^c = \mu B_m^b$  и для воздуха  $\mu \approx 1$ , то соотношение (49.15) можно переписать в виде

$$\frac{\mathcal{E}^c}{\mathcal{E}^b} = 1 + (\mu - 1) \frac{S_c}{S_b}. \quad (49.16)$$

Отсюда расчетная формула для определения магнитной проницаемости  $\mu$  материала сердечника

$$\mu = 1 + \left( \frac{\mathcal{E}^c}{\mathcal{E}^b} - 1 \right) \frac{S_b}{S_c}. \quad (49.17)$$

В задании 3 исследуется явление самоиндукции, и переменный ток от генератора пропускается через обмотку секций вторичной катушки  $L_2$ , на выводах которых измеряется ЭДС самоиндукции (см. рис. 49.4).

### 3. Порядок выполнения работы

**Задание 1.** Исследование зависимости ЭДС индукции от числа витков вторичной катушки  $L_2$ . Определение магнитной проницаемости материала сердечника, внесенного в магнитное поле соленоида.

1. Подготовьте таблицу для внесения результатов измерений (табл. 49.1).

Таблица 49.1

$d_c =$	$d_b =$	$v =$	$I_d =$
Число секций	Количество витков $N$	ЭДС индукции $\mathcal{E}_d$ ,	
		без сердечника	с сердечником

2. Измерьте диаметры сердечника  $d_c$  и воздушного пространства внутри соленоида  $d_b$  и полученные значения внесите в верхнюю строку табл. 49.1.

3. Ознакомьтесь с расположением элементов панели управления генератора и порядком его включения.

4. По схеме установки ознакомьтесь с расположением входящих в ее состав приборов и их назначением. Определите цену деления шкал каждого из измерительных приборов: миллиамперметра и вольтметра. Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой, приведенной на рис. 49.3. С разрешения преподавателя

подключите генератор к сети, включите прибор. Вначале измерения выполняются без внесения сердечника внутрь соленоида  $L_1$ .

5. По шкале генератора установите значение рабочей частоты  $\nu$  из диапазона 500–1000 Гц. Ручкой регулятора выходного напряжения генератора установите действующее значение  $I_d$  силы тока в обмотке первичной катушки  $L_1$  из интервала 20–40 мА, контролируя по показаниям миллиамперметра, и поддерживайте силу тока неизменной в процессе измерений. Значения  $\nu$  и  $I_d$  внесите в верхнюю строку таблицы.

6. Подключите вольтметр  $V$  к выводам первой секции вторичной катушки  $L_2$  (к выводам 0–1), измерьте действующее значение ЭДС индукции  $\mathcal{E}_d$  в секции и внесите его в таблицу.

7. Последовательно подключайте вольтметр к большему числу секций (поочередно подключая правый провод к выводам секций) катушки  $L_2$  и измерьте значения ЭДС, индуцируемой в этих секциях по мере увеличения количества витков. Результат каждого измерения внесите в таблицу.

8. Вставьте внутрь соленоида  $L_1$  ферромагнитный сердечник и выполните аналогичные п. 5–7 измерения при тех же значениях частоты  $\nu$  и силы тока  $I_d$  в обмотке соленоида  $L_1$ . По окончании измерений удалите сердечник из соленоида.

9. Постройте графики зависимостей ЭДС индукции  $\mathcal{E}_d$  от количества витков вторичной катушки  $L_2$  ( $\mathcal{E}_d = f(N)$ ), полученных при измерениях без сердечника и с ферромагнитным сердечником. Объясните полученные графические зависимости.

10. Вычислите по формуле (49.17) значение магнитной проницаемости материала сердечника, используя значения ЭДС индукции, измеренные при одном и том же количестве витков катушки  $L_2$ .

**Задание 2.** Изучение зависимости ЭДС индукции от силы тока в первичной катушке  $L_1$  и его частоты.

1. Подготовьте таблицу для внесения результатов измерений (табл. 49.2).

Таблица 49.2

$i$	$\nu^{\text{const}} =$		$I_d^{\text{const}} =$	
	$I_d,$	$\mathcal{E}_d,$	$\nu,$	$\mathcal{E}_d,$

2. В цепи, собранной в соответствии со схемой, приведенной на рис. 49.3, подключите вольтметр к двум центральным секциям вторичной катушки  $L_2$ , расположенным примерно на середине (например, к клеммам 4 и 6).

3. По шкале генератора установите значение рабочей частоты  $\nu$  из диапазона 500–1000 Гц и внесите его в табл. 49.2. Изменяя регулятором выходного напряжения генератора действующее значение  $I_d$  силы тока в обмотке первичной катушки  $L_1$  в интервале от 5 до 50 мА через каждые 5 мА, измерьте и внесите в таблицу ЭДС индукции, возбуждаемой в секциях вторичной катушки  $L_2$ .

4. Регулятором выходного напряжения генератора установите определенное значение  $I_d$  силы тока в обмотке первичной катушки  $L_1$  из интервала 20–40 мА, внесите его в табл. 49.2. Поддерживая значение силы тока  $I_d$  неизменным, измерьте зависимость ЭДС индукции от частоты тока  $\nu$  при изменении частоты от 200 до 1000 Гц через каждые 100 Гц. Результаты измерений внесите в таблицу.

5. Постройте графики зависимостей ЭДС индукции от значения силы тока  $I_d$  ( $\mathcal{E}_d = f(I_d)$ ) и его частоты  $\nu$  ( $\mathcal{E}_d = f(\nu)$ ). Объясните полученные графические зависимости.

**Задание 3.** Изучение зависимости ЭДС самоиндукции в секциях вторичной катушки от действующего значения силы тока и его частоты.

1. Подготовьте таблицу для внесения результатов измерений (табл. 49.3).

Таблица 49.3

$i$	$\nu^{\text{const}} = 1 \text{ кГц}$		$I_d^{\text{const}} =$	
	$I_d,$	$\mathcal{E}_d,$	$\nu,$	$\mathcal{E}_d,$

2. Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой, приведенной на рис. 49.4. Для этого к выходу генератора подключите две центральные секции вторичной катушки  $L_2$ , расположенные примерно на середине. К этим же секциям подключите вольтметр для измерения ЭДС самоиндукции, возбуждаемой в них при прохождении переменного тока.

3. Установите значение рабочей частоты  $\nu = 1$  кГц. Изменяя силу тока  $I_d$  в интервале от 10 до 100 мА через 10 мА, измерьте действующие значения ЭДС самоиндукции вольтметром и внесите показания в табл. 49.3.

4. Установите определенное значение силы тока в цепи из интервала 20–40 мА, внесите его в таблицу. Поддерживая значение силы тока  $I_d$  неизменным, измерьте зависимость ЭДС самоиндукции от частоты тока  $\nu$  при изменении частоты от 500 до 1000 Гц через каждые 100 Гц. Результаты измерений внесите в табл. 49.3.

5. Постройте графики зависимостей ЭДС самоиндукции от силы тока ( $\mathcal{E}_d = f(I_d)$ ) и частоты ( $\mathcal{E}_d = f(\nu)$ ). Объясните полученные графические зависимости.

6. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается сущность явления электромагнитной индукции? 2. Каков смысл правила Ленца? 3. Каков механизм возбуждения ЭДС индукции в катушках лабораторной установки? 4. Что понимают под силовыми линиями магнитного поля? 5. Каков физический смысл магнитного потока? Как определяется знак потока? 6. Каким образом формулируется теорема Гаусса для магнитного поля? Каков физический смысл теоремы? 7. В чем сущность явления самоиндукции? 8. Что понимают под индуктивностью контура? 9. От каких параметров зависит индуктивность катушки? 10. При каких условиях индуктивность катушки будет зависеть от силы тока в ее обмотке? 11. Каков физический смысл магнитной проницаемости вещества?

## Лабораторная работа № 50 ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

**Цель работы:** изучить собственные электромагнитные колебания в электрическом колебательном контуре; исследовать зависимость амплитуды затухающих колебаний от времени; определить основные параметры, характеризующие процесс затухания колебаний, и их зависимость от активного сопротивления колебательного контура.

## 1. Теоретическое введение

*Электромагнитные колебания* – периодически изменяющиеся во времени взаимосвязанные электрическое и магнитное поля. При этом имеют место периодические изменения (колебания) напряженности электрического и индукции магнитного полей и периодическое взаимопревращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля.

Электромагнитные колебания возникают в цепи, называемой электрическим колебательным контуром, схема которого приведена на рис. 50.1. Контур состоит из конденсатора емкостью  $C$ , катушки индуктивности  $L$  и резистора сопротивлением  $R$ .

Если конденсатор зарядить от источника постоянного электрического напряжения, то он начнет разряжаться через катушку индуктивности, и в контуре появится ток. В катушке при прохождении нарастающего тока возникнет ЭДС самоиндукции, препятствующая изменению тока в соответствии с правилом Ленца. Поэтому ток нарастает постепенно до тех пор, пока вся энергия электрического поля конденсатора не перейдет в энергию магнитного поля катушки. В этот момент заряд на обкладках конденсатора станет равным нулю, а сила тока в катушке индуктивности достигнет максимального значения.

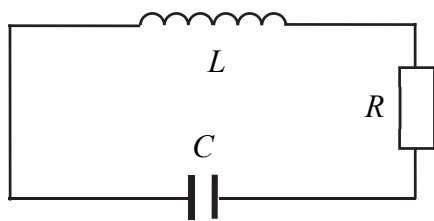


Рис. 50.1

Далее ток, не изменяя направления, начнет убывать, но из-за электромагнитной индукции сила тока будет уменьшаться не мгновенно, а постепенно. При этом конденсатор будет перезаряжаться, и возникающее в цепи электрическое поле будет тормозить движение зарядов, что постепенно приведет к уменьшению силы тока до нуля. В этот момент заряд на обкладках конденсатора и энергия электрического поля достигнут максимальных значений, а энергия магнитного поля вновь станет равной нулю. К этому времени завершается первый полупериод процесса в колебательном контуре. Во время второго полупериода ток в контуре течет в обратном направлении, постепенно увеличивая энергию магнитного поля, и после того, как сила тока достигнет максимума, начнется новая перезарядка конденсатора.

Заряд  $q$  и напряжение  $U$  на обкладках конденсатора, а также сила тока  $I$  в контуре изменяются во времени по периодическому

закону. Если бы сопротивление контура (включая сопротивление провода обмотки катушки и подводящих проводов) было равно нулю ( $R = 0$ ), то колебания в контуре могли бы продолжаться неограниченно долго, что соответствует *собственным электромагнитным колебаниям* без потерь энергии. Соотношение между ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}$ , возникающей в катушке индуктивности,

и напряжением  $U = \frac{q}{C}$  на обкладках конденсатора в таком идеальном контуре будет

$$\frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (50.1)$$

С учетом определения силы тока  $I = \frac{dq}{dt}$  получим дифференциальное уравнение собственных незатухающих электромагнитных колебаний:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (50.2)$$

Введя обозначение

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2, \quad (50.3)$$

выражение (50.2) сведем к виду

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0. \quad (50.4)$$

Решением дифференциального уравнения (50.4) является выражение

$$q(t) = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (50.5)$$

где  $q_m$  – амплитудное значение заряда на обкладках конденсатора;  $\omega_0$  – циклическая частота собственных электромагнитных колебаний в контуре (собственная частота);  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний.

Уравнение (50.5) – уравнение собственных электромагнитных колебаний, описывает зависимость заряда на обкладках конденсатора от времени.

Собственная циклическая частота электромагнитных колебаний (из (50.3))

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (50.6)$$

Собственная частота колебаний

$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (50.7)$$

Период собственных незатухающих колебаний в контуре

$$T_0 = \frac{1}{\nu_0} = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (50.8)$$

Энергия электромагнитных колебаний в колебательном контуре периодически с частотой вдвое большей частоты самих колебаний перераспределяется между электрическим и магнитным полями. Полная энергия колебаний, равная сумме энергий электрического и магнитного полей в каждый момент времени, равна максимальному значению энергии электрического поля в конденсаторе либо максимальному значению магнитного поля в катушке:

$$W = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}. \quad (50.9)$$

Реальный колебательный контур всегда обладает сопротивлением электрическому току. В контуре, имеющем сопротивление  $R$ , энергия, запасенная в колебательной системе, постепенно расходуется на выделение теплоты (закон Джоуля – Ленца), и колебания затухают. По закону Ома, сила тока в таком контуре (рис. 50.1)

$$I = \frac{U + \mathcal{E}_L}{R}, \text{ или } IR = U - L \frac{dI}{dt}. \quad (50.10)$$

С учетом определения силы тока  $I = \frac{dq}{dt}$

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0; \quad \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (50.11)$$

Введя обозначение

$$\frac{R}{L} = 2\beta \quad (50.12)$$

и с учетом выражения (50.3), окончательно запишем дифференциальное уравнение собственных затухающих электромагнитных колебаний:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (50.13)$$

Решением дифференциального уравнения (50.13) является выражение, отображающее зависимость заряда на обкладках конденсатора в реальном колебательном контуре от времени (уравнение затухающих электромагнитных колебаний):

$$q(t) = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (50.14)$$

где  $q_0$  – максимальное (амплитудное) значение заряда на обкладках конденсатора в начальный момент времени;  $\beta$  – коэффициент затухания;  $\omega$  – циклическая частота затухающих электромагнитных колебаний в контуре;  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний.

Так как заряд  $q$  на обкладках конденсатора прямо пропорционален напряжению  $U$  между ними ( $q = CU$ ), то зависимость напряжения от времени при затухающих колебаниях следующая:

$$U(t) = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (50.15)$$

где  $U_0$  – максимальное (амплитудное) значение напряжения между обкладками конденсатора в начальный момент времени.

Характер зависимости напряжения от времени изображен графически (рис. 50.2).

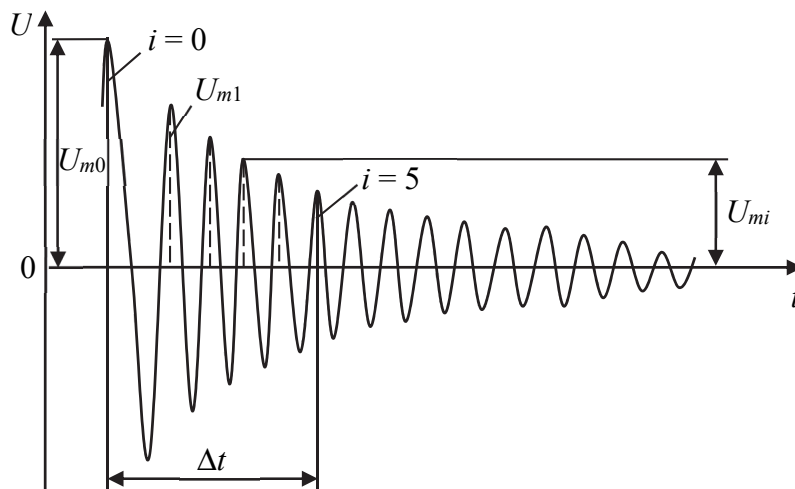


Рис. 50.2

При затухающих колебаниях амплитудные значения заряда  $q_0 e^{-\beta t}$  и напряжения  $U_0 e^{-\beta t}$  на конденсаторе уменьшаются со временем экспоненциально. В частности,

$$U_m(t) = U_0 e^{-\beta t}. \quad (50.16)$$

Циклическая частота  $\omega$  затухающих колебаний отличается от собственной частоты  $\omega_0$  незатухающих колебаний:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (50.17)$$

Соответственно, период затухающих колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (50.18)$$

несколько больше периода  $T_0$  собственных незатухающих колебаний в контуре.

*Коэффициент затухания колебаний (из (50.12))*

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (50.19)$$

возрастает с увеличением сопротивления  $R$  цепи. Если сопротивление контура так велико, что  $\omega_0^2 - \beta^2 \leq 0$   $\left( \frac{R^2 C}{4L} \geq 1 \right)$ , то процесс изменения заряда в цепи уже не будет колебательным, а станет аperiodическим. Критическое значение сопротивления контура, при котором колебательный процесс становится аperiodическим,

$$R_{\text{кр}} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (50.20)$$

Затухание колебаний характеризуется *логарифмическим декрементом затухания*  $\delta$ , равным натуральному логарифму отношения амплитуд колебаний, отличающихся по времени измерения на период. В частности, для амплитуд напряжений

$$\delta = \ln \frac{U_m(t)}{U_m(t+T)}. \quad (50.21)$$

Выражая амплитуды по формуле (50.16), получим соотношение между логарифмическим декрементом затухания  $\delta$  и коэффициентом затухания  $\beta$ :

$$\delta = \ln \frac{U_0 e^{-\beta t}}{U_0 e^{-\beta(t+T)}} = \ln e^{[-\beta t - (-\beta t - \beta T)]} = \ln e^{\beta T} = \beta T;$$

$$\delta = \beta T. \quad (50.22)$$

Время  $\tau$ , по истечении которого амплитуда колебаний убывает в  $e$  раз ( $e$  – основание натурального логарифма,  $e \approx 2,71826$ ), называется временем затухания:

$$\tau = \frac{1}{\beta}. \quad (50.23)$$

За время  $\tau$  в контуре совершается  $N$  полных колебаний:

$$N = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{\beta T}.$$

Таким образом, логарифмический декремент затухания  $\delta$  связан с числом колебаний  $N$ , приводящим к уменьшению амплитуды колебаний в  $e$  раз, соотношением  $\delta = \frac{1}{N}$ .

Подставляя в формулу (50.22) выражения (50.18) и (50.19) и учитывая (50.6), получим

$$\delta = \frac{R}{2L} \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{\pi R}{L\omega_0 \sqrt{1 - \frac{R^2}{4L^2} LC}} = \frac{\pi R}{L\omega_0 \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}}} = \frac{\pi R}{\sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}}}.$$

Если затухание невелико  $\left( \frac{R^2 C}{4L} \ll 1 \right)$ , то декремент затухания зависит от параметров колебательного контура следующим образом:

$$\delta = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (50.24)$$

Важнейшей характеристикой колебательного контура является величина, обратно пропорциональная логарифмическому декременту, называемая добротностью:

$$Q = \frac{\pi}{\delta} = \pi N. \quad (50.25)$$

*Добротность* контура есть умноженное на  $\pi$  число  $N$  полных колебаний, по истечении которых амплитуда колебаний уменьшится в  $e$  раз.

Из (50.24) и (50.25) следует зависимость добротности от параметров элементов (емкости  $C$  конденсатора, индуктивности  $L$  катушки и сопротивления  $R$  резистора), входящих в состав колебательного контура, при слабом затухании:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (50.26)$$

Чем выше добротность контура, тем меньше относительные потери энергии при затухающих колебаниях.

## 2. Описание установки и метода измерений

Схема установки для изучения затухающих электромагнитных колебаний приведена на рис. 50.3.

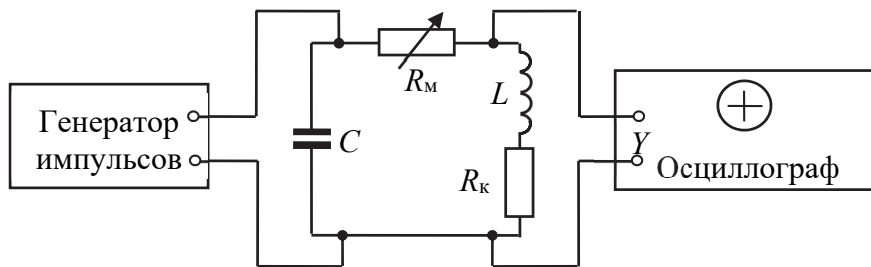


Рис. 50.3

Колебательный контур установки состоит из конденсатора  $C$ , катушки индуктивности  $L$  и магазина сопротивлений  $R_M$ . Конденсатор заряжается под воздействием периодически повторяющихся прямоугольных импульсов напряжения, которые вырабатываются генератором. В промежутках между соседними импульсами в контуре совершаются электромагнитные колебания. Затухание колебаний определяется в основном потерями энергии в сопротивлении обмотки катушки  $R_K$  и магазина сопротивлений  $R_M$ . Возбуждаемые в контуре колебания напряжения подаются на вход  $Y$  электронного осциллографа. Генератор временной развертки осциллографа синхронизируется переменным напряжением, частота которого совпадает с частотой повторения импульсов напряжения, подаваемого на конденсатор. На экране осциллографа воспроизводится зависи-

мость напряжения  $U$  на обкладках конденсатора от времени  $t$  при затухающих электромагнитных колебаниях в контуре, которые совершаются в промежутках времени между импульсами напряжения, заряжающего конденсатор. Магазин сопротивлений  $R_m$  предназначен для изменения активного сопротивления  $R$  контура, которое представляет собой сумму сопротивлений обмотки катушки  $R_k$  и  $R_m$ , выбранного на магазине сопротивлений ( $R = R_k + R_m$ ).

### 3. Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для внесения и обработки результатов измерений.

$R_k =$		$R_m = 0 \text{ Ом}$	$\delta_x =$		$\delta_y =$			
$i$	$U_{mi},$	$\ln(U_{m0} / U_{mi})$	$T,$	$\beta,$	$\delta$	$Q$	$L,$	$C,$
0								
1								
...								

2. По схеме установки ознакомьтесь с расположением входящих в ее состав приборов и устройств и их назначением, а также с расположением элементов управления генератора и осциллографа. Внесите значения сопротивления обмотки катушки  $R_k$  в верхнюю строку таблицы. Установите на магазине сопротивлений значение  $R_m = 0 \text{ Ом}$  (активное сопротивление колебательного контура при этом будет равно  $R_k$ ). После проверки собранной цепи с разрешения преподавателя подключите приборы к сети и включите их.

3. Задайте значение частоты импульсов напряжения, подаваемого от генератора на конденсатор,  $\nu_{\text{имп}} = 50 \text{ Гц}$ . При необходимости отрегулируйте фокусировку и яркость луча на экране осциллографа. Получите на экране неподвижное изображение цуга затухающих колебаний. Используя переключатели масштабов осей осциллографа:  $X$  – «Время/дел» и  $Y$  – «В/дел», отрегулируйте изображение зависимости напряжения от времени (см. рис. 50.2) на экране осциллографа так, чтобы его размер был максимальным. Соответствующие значения масштабов  $\delta_x$  и  $\delta_y$  внесите в верхнюю строку таблицы:  $\delta_x$  – цена деления шкалы осциллографа по горизонтальной оси времени;  $\delta_y$  – по вертикальной оси напряжения.

4. По вертикальной шкале экрана осциллографа измерьте амплитудные значения  $U_{mi}$  напряжения в колебательном контуре при

затухающих электромагнитных колебаниях ( $U_{m0}, U_{m1}, \dots, U_{mn}$ ). Для этого измерьте высоту сигналов по шкале осциллографа (см. рис. 50.2) в делениях и умножьте на цену деления  $\delta_y$ . Значения амплитуд напряжения  $U_{mi}$  внесите в таблицу.

5. По горизонтальной шкале экрана осциллографа измерьте период затухающих электромагнитных колебаний  $T$ . Для этого измерьте время  $\Delta t$ , за которое совершается  $N$  полных колебаний (см. рис. 50.2), и, используя цену деления  $\delta_x$ , определите значение периода  $T = \delta_x \frac{\Delta t}{N}$ , внесите его в таблицу.

По значению периода  $T$  определите частоту  $\nu$  затухающих колебаний в контуре и сравните полученное значение с частотой  $\nu_{\text{имп}}$  импульсов напряжения, заряжающих конденсатор (см. п. 3).

6. Подготовьте новую таблицу для внесения результатов последующих измерений при другом значении сопротивления колебательного контура. Выставьте на магазине сопротивлений значение  $R_m = 100$  Ом (если номер звена нечетный) или  $R_m = 200$  Ом (если номер звена четный). Активное сопротивление колебательного контура при этом  $R = R_k + R_m$ . Выполните измерения в соответствии с п. 4–5 при новом значении  $R$ .

7. Увеличивая ступенями магазина сопротивление  $R_m$ , добейтесь по виду изображения зависимости на экране осциллографа перехода периодического процесса затухания колебаний в апериодический. Запишите соответствующее значение  $R = R_k + R_m$  в качестве критического сопротивления  $R_{\text{кр}}$ .

8. По данным измерений амплитуд напряжения определите экспериментальные значения коэффициента затухания  $\beta$  электромагнитных колебаний в контуре при каждом из двух значений сопротивления контура  $R = R_k + R_m$ .

Для этого экспоненциальную зависимость амплитуды напряжения от времени (50.16) преобразуем в линейную:

$$U_{mi} = U_{m0} e^{-\beta t} \rightarrow \frac{U_{m0}}{U_{mi}} = e^{\beta t} \rightarrow \ln \frac{U_{m0}}{U_{mi}} = \beta t. \quad (50.27)$$

Из (50.27) следует, что зависимость натурального логарифма отношений начальной амплитуды напряжения к последующим прямо пропорциональна времени и коэффициентом пропорциональности является коэффициент затухания  $\beta$ . Следовательно, гра-

фик зависимости  $\ln \frac{U_{m0}}{U_{mi}} = f(t)$  линейный, и угловой коэффициент

линейной зависимости – коэффициент затухания  $\beta$ .

Постройте для каждой из двух серий измерений графики зависимостей  $\ln \frac{U_{m0}}{U_{mi}}$  от времени  $t$ . При построении графиков экспериментальные точки, соответствующие  $i$ -й амплитуде  $U_{mi}$ , по оси времени откладываете через период ( $t = iT$ ).

По каждому из построенных графиков определите значения коэффициента затухания  $\beta$ , которые равны угловым коэффициентам графических зависимостей. Значения  $\beta$  внесите в таблицы.

9. По формулам (50.22) и (50.25) определите значения логарифмического декремента  $\delta$  затуханий и добротности  $Q$  при двух различных значениях  $R = R_k + R_m$ . Значения величин внесите в таблицы.

10. Для каждого из выполненных экспериментов при различных значениях  $R = R_k + R_m$  определите индуктивность  $L$  соленоида и емкость  $C$  конденсатора, входящих в состав колебательного контура. Выражение для расчета индуктивности  $L$  получите из (50.19). Далее электроемкость можно определить из формулы (50.6) для собственной частоты  $\omega_0$ , выражая ее через измеренные значения периода колебаний  $T$  и коэффициента затуханий  $\beta$  (формулы (50.17) и (50.18)):

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega_0^2 L}; \quad \omega_0^2 = \omega^2 + \beta^2; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Полученные значения  $L$  и  $C$  внесите в таблицы. Определите по двум результатам измерений средние значения индуктивности  $L$  соленоида и емкости  $C$  конденсатора в составе колебательного контура.

11. По формуле (50.26) рассчитайте значения добротности  $Q$  колебательного контура при двух различных значениях  $R = R_k + R_m$ . Сравните полученные значения со значениями, рассчитанными ранее (п. 9) по формуле (50.25).

12. По формуле (50.20) рассчитайте критическое значение сопротивления  $R_{кр}$  контура, при котором колебательный процесс становится аperiodическим. Сравните полученное значение со значением, установленным в п. 7 экспериментально.

13. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что представляет собой электрический колебательный контур? 2. Что представляют собой компоненты колебательного контура: конденсатор, катушка индуктивности и резистор? 3. От каких параметров зависят сопротивление проводника, электрическая емкость конденсатора, индуктивность катушки? 4. Что представляют собой электромагнитные колебания в контуре? 5. Что понимают под собственной частотой колебаний? 6. При каких условиях электромагнитные колебания являются затухающими? 7. Каков физический смысл коэффициента затухания? 8. Каков смысл логарифмического декремента затуханий? 9. Каков смысл добротности колебательного контура? 10. От каких величин зависят значения коэффициента затухания, логарифмического декремента затуханий и добротности контура? 10. Поясните, как по графику экспериментальной зависимости  $\ln \frac{U_{m0}}{U_{mi}} = f(t)$  определяется коэффициент затухания колебаний  $\beta$ .

## Лабораторная работа № 51 ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

**Цель работы:** изучить процесс прохождения переменного синусоидального электрического тока в цепи с последовательным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора; измерить сопротивление резистора, индуктивность катушки и емкость конденсатора; проверить выполнение закона Ома в цепи переменного тока; определить полное сопротивление цепи и сдвиг фаз между током и напряжением.

### 1. Теоретическое введение

Электрическая схема цепи переменного электрического тока, в состав которой входят соединенные последовательно резистор  $R$ , конденсатор  $C$  и катушка индуктивности  $L$ , приведена на рис. 51.1. Цепь подключена к источнику переменного синусоидального напряжения:

$$U = U_m \sin \omega t, \quad (51.1)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения;  $\omega$  – циклическая частота.

Рассмотрим процессы, сопровождающие прохождение переменного тока в каждом из элементов цепи: резисторе, конденсаторе и катушке индуктивности.

В соответствии с законом Ома для участка электрической цепи, включающей резистор с сопротивлением  $R$ , сила тока

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_{Rm}}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad (51.2)$$

где  $U_R$  – напряжение на резисторе;  $U_{Rm}$  – амплитудное значение напряжения;  $I_m$  – амплитудное значение силы тока.

Из (51.2) следует, что сила тока в резисторе изменяется во времени так же, как и напряжение – по закону синуса, причем разность фаз между изменением силы тока и напряжения равна нулю.

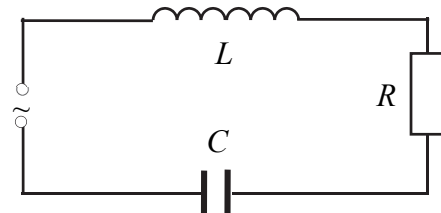


Рис. 51.1

Напряжение и сила тока периодически изменяются во времени в одной фазе: одновременно нарастают и достигают максимальных значений, одновременно уменьшаются, обращаются в ноль и меняют знак и т. д.

Амплитудное значение напряжения на резисторе (из (51.2))

$$U_{Rm} = I_m R. \quad (51.3)$$

Рассмотрим участок цепи, содержащий конденсатор электроемкостью  $C$ . В цепи переменного тока конденсатор периодически перезаряжается.

Между обкладками конденсатора при этом существует переменное электрическое поле, или электрический ток смещения. Если сила тока в цепи изменяется во времени периодически по закону (см. (51.2))

$$I = I_m \sin \omega t, \quad (51.4)$$

то с учетом определения силы тока  $I = \frac{dq}{dt}$  изменение во времени заряда на его обкладках описывается выражением

$$q = \int I dt = \int I_m \sin \omega t dt = -\frac{I_m}{\omega} \cos \omega t. \quad (51.5)$$

Напряжение на обкладках конденсатора

$$U_C = \frac{q}{C} = -\frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t = \frac{I_m}{\omega C} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (51.6)$$

Сравнивая выражения (51.4) и (51.6), видим, что при синусоидальном токе в цепи напряжение на конденсаторе также изменяется по закону синуса, но изменение во времени напряжения на конденсаторе отстает по фазе от колебаний тока на  $\frac{\pi}{2}$ , или на четверть периода электрических колебаний в цепи. Напряжение на конденсаторе в какой-либо момент времени определяется зарядом на его обкладках, который формируется током в цепи на более ранней стадии.

Амплитудное значение напряжения на конденсаторе (из (51.6))

$$U_{Cm} = I_m \frac{1}{\omega C}. \quad (51.7)$$

Рассмотрим участок цепи, содержащий катушку индуктивности  $L$ . В цепи переменного тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}, \quad (51.8)$$

которая в соответствии с правилом Ленца препятствует изменению силы тока в цепи. В результате периодическое изменение силы тока в катушке отстает во времени от периодического изменения напряжения. Если учитывать только индуктивность  $L$  катушки, то можно считать, что приложенное напряжение компенсирует ЭДС самоиндукции:

$$U_L = L \frac{dI}{dt}, \quad (51.9)$$

или с учетом выражения (51.4) для силы переменного тока в цепи напряжение на катушке

$$U_L = L \frac{d}{dt} (I_m \sin \omega t) = I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (51.10)$$

Периодическое изменение силы тока в катушке отстает во времени по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ , или на четверть периода от изменения напряжения.

Амплитудное значение напряжения на катушке (из (51.10))

$$U_{Lm} = I_m \omega L. \quad (51.11)$$

Сравнивая выражения (51.3), (51.7) и (51.11) для амплитудных значений напряжений на элементах цепи, можно заключить, что в соответствии с законом Ома для этих участков в цепи переменного тока наряду с активным (омическим) сопротивлением  $R$  резистора проявляются реактивные сопротивления конденсатора и катушки.

Реактивное емкостное сопротивление конденсатора

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (51.12)$$

Индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = \omega L. \quad (51.13)$$

Гармонически изменяющиеся величины можно наглядно изображать в виде векторных диаграмм, на которых векторами показываются амплитуды величин, а их начальные фазы – углом между осью отсчета и соответствующим вектором. Применим данный подход к описанию рассмотренных процессов в цепи переменного электрического тока, состоящей из резистора, конденсатора и катушки индуктивности (рис. 51.1).

Выберем (рис. 51.2) расположенную горизонтально ось диаграммы таким образом, чтобы вектор, отображающий изменение тока в цепи, был направлен вдоль этой оси, называемой осью токов. Тогда вектор, отображающий изменение напряжения на резисторе  $U_{Rm}$ , будет направлен вдоль оси токов, так как разность фаз между напряжением  $U_R$  и током равна нулю. Модуль (длина) этого

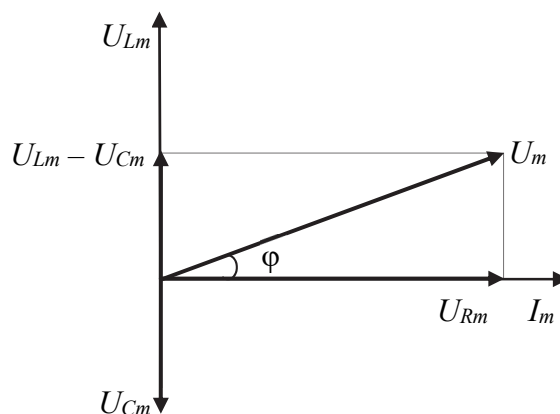


Рис. 51.2

Модуль (длина) этого

вектора равен амплитуде напряжения. Вектор, отображающий изменение напряжения на конденсаторе  $U_C$ , модуль которого  $U_{Cm} = I_m X_C$ , будет направлен под углом  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$  к оси токов, что отражает отставание напряжения на конденсаторе от изменения тока в цепи на четверть периода. Вектор, отображающий изменение напряжения на катушке  $U_L$ , модуль которого  $U_{mL} = I_m X_L$ , направим под углом  $\varphi = +\frac{\pi}{2}$  к оси токов. Это отражает отставание тока на данном участке цепи от изменения напряжения, или опережение напряжением изменений тока.

Полное напряжение на всей цепи, состоящей из соединенных последовательно резистора, конденсатора и катушки индуктивности

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (51.14)$$

определяется суммой векторов, отображающих амплитуды и фазы напряжений на каждом из элементов.

Амплитудное значение полного напряжения (модуль суммарного вектора)

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}, \quad (51.15)$$

или

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (51.16)$$

Сдвиг фаз  $\varphi$  между током и напряжением в цепи определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{Lm} - U_{Cm}}{U_{Rm}} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (51.17)$$

Амплитуда переменного тока в цепи

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}. \quad (51.18)$$

Выражение (51.18) называют *законом Ома для переменного тока* в том смысле, что амплитуда тока прямо пропорциональна

амплитуде напряжения. Однако эта формула применима только к амплитудным значениям силы тока и напряжения, но не к мгновенным значениям этих величин.

Выражение в знаменателе формулы (51.18) называют полным сопротивлением цепи переменного тока:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad (51.19)$$

где  $R$  – активное сопротивление;  $\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$  – реактивное сопротивление цепи.

Для характеристики силы переменного тока за основу принято сравнение теплового действия переменного тока с тепловым действием постоянного тока соответствующей силы. Полученное таким образом значение силы тока называется действующим значением силы тока  $I_d$ . Оно представляет собой среднеквадратичное значение силы переменного тока за период. Аналогично определяется и действующее значение напряжения  $U_d$  в цепи переменного тока. Измерительные приборы – амперметры и вольтметры переменного тока – измеряют именно действующие значения силы тока и напряжения. В цепи переменного синусоидального тока, вызванного синусоидальным напряжением, действующие значения переменного тока и напряжения связаны с амплитудными значениями следующим образом:

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ и } U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (51.20)$$

Следовательно, закон Ома для переменного тока в виде (51.18) выполняется и для измеряемых приборами действующих значений силы тока и напряжения.

## 2. Описание установки и метода измерений

Схема установки приведена на рис. 51.3. Электрическая цепь состоит из катушки индуктивности  $L$  с активным сопротивлением  $R_k$  (сопротивление провода, из которого выполнена обмотка катушки), конденсатора  $C$ , миллиамперметра  $mA$  и реостата  $R_1$ , соединенных последовательно. Питание элементов электрической

цепи может осуществляться от источника ИП постоянного напряжения, а также переменным напряжением промышленной частоты  $\nu = 50$  Гц от понижающего трансформатора Тр. Переключение источников питания выполняется переключателем ПК. Напряжение, подаваемое на элементы цепи, регулируется реостатом  $R_1$  и измеряется цифровым вольтметром  $V$ . Сила тока в цепи измеряется миллиамперметром.

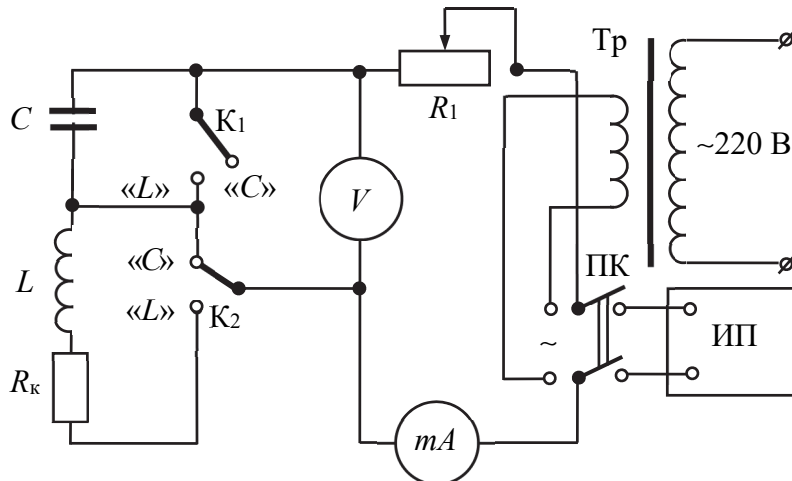


Рис. 51.3

Тумблеры  $K_1$  и  $K_2$  дают возможность подключать к источникам питания каждый из элементов цепи по отдельности (катушку индуктивности  $L$  в задании 1, конденсатор  $C$  в задании 2) или последовательно соединенные катушку и конденсатор (задание 3). При подключении катушки к источнику постоянного тока (задание 1) вольтметром измеряется падение напряжения  $U$  на активном омическом сопротивлении  $R_k$  обмотки катушки, миллиамперметром – сила  $I$  постоянного тока, проходящего по обмотке. При подаче на элементы цепи переменного синусоидального напряжения  $U = U_m \sin \omega t$ , где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения;  $\omega = 2\pi\nu = 314 \text{ с}^{-1}$  – циклическая частота; вольтметром измеряется действующее значение переменного напряжения  $U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ , а миллиамперметром – действующее значение силы тока  $I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ , где  $I_m$  – амплитудное значение силы переменного тока в цепи.

### 3. Порядок выполнения работы

**Задание 1.** Измерение сопротивления и индуктивности катушки.

1. Подготовьте таблицу для внесения и обработки результатов измерений (табл. 51.1).

Таблица 51.1

Катушка	$i$	На постоянном токе				На переменном токе				
		$U$ ,	$I$ ,	$R_k$ ,	$\langle R_k \rangle$ ,	$U_d$ ,	$I_d$ ,	$Z_k$ ,	$\langle Z_k \rangle$ ,	$L$ ,
Без сердечника	1									
	2									
	3									
С сердечником	1									
	2									
	3									

2. По схеме установки ознакомьтесь с расположением входящих в ее состав элементов цепи и измерительных приборов. Изучите также панель цифрового вольтметра. Определите цену деления шкалы миллиамперметра. Подвижный контакт реостата  $R_1$  установите в среднее положение. Тумблеры  $K_1$  и  $K_2$  переключите в положение « $L$ ». При этом в исследуемую цепь будет включена катушка с индуктивностью  $L$  и омическим сопротивлением ее обмотки  $R_k$ . Переключателем ПК подключите цепь к источнику ИП постоянного напряжения. После разрешения преподавателя подключите лабораторную установку к сети, включите источник питания ИП и вольтметр, на котором установите режим измерения постоянного напряжения.

3. Перемещая подвижный контакт реостата  $R_1$ , установите три различных значения напряжения  $U$ , определите соответствующие значения силы тока  $I$  в катушке и внесите значения  $U$  и  $I$  в табл. 51.1. Вставьте внутрь катушки ферромагнитный сердечник и выполните аналогичные измерения. По окончании измерений на постоянном токе выключите источник постоянного напряжения ИП.

4. Установите режим измерения переменного напряжения вольтметра. Переключателем ПК подключите цепь к источнику переменного напряжения. Выполните аналогичные п. 3 измерения на переменном токе. Внесите в таблицу по показаниям приборов дей-

ствующие значения напряжения  $U_d$  и силы тока  $I_d$  (без сердечника и с сердечником). Удалите сердечник из катушки.

5. По результатам каждого измерения вычислите значения омического  $R_k$  и полного  $Z_k$  сопротивлений катушки и их средние значения  $\langle R_k \rangle$  и  $\langle Z_k \rangle$  в каждом из вариантов измерений (без сердечника и с сердечником). Используя средние значения сопротивлений, определите индуктивность  $L$  катушки, учитывая, что в отсутствие в цепи конденсатора полное сопротивление  $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$  (см. (51.19)).

**Задание 2.** Измерение электрической емкости конденсатора.

1. Подготовьте таблицу для внесения и обработки результатов измерений (табл. 51.2).

Таблица 51.2

$i$	$U_d$ ,	$I_d$ ,	$X_C$ ,	$\langle X_C \rangle$ ,	$C$ ,

2. Тумблеры  $K_1$  и  $K_2$  переключите в положение «С». При этом в исследуемую цепь будет включен конденсатор. Переключателем ПК подключите цепь к источнику переменного напряжения. Перемещая подвижный контакт реостата  $R_1$ , установите три различных значения напряжения  $U_d$ , определите соответствующие значения силы переменного тока  $I_d$  в конденсаторе и внесите значения  $U_d$  и  $I_d$  в табл. 51.2.

3. Вычислите по результатам трех измерений значения емкостного сопротивления  $X_C$  цепи и его среднее значение  $\langle X_C \rangle$ . Используя среднее значение  $\langle X_C \rangle$ , определите электрическую емкость  $C$  конденсатора (см. (51.12)).

**Задание 3.** Определение полного сопротивления цепи переменного тока.

1. Подготовьте таблицу для внесения и обработки результатов измерений.

Таблица 51.3

$i$	$U_d$ ,	$I_d$ ,	$Z_{\text{эксп}}$ ,	$Z_{\text{расч}}$ ,	$\varphi$

2. Составьте цепь из последовательно соединенных конденсатора  $C$  и катушки  $L$  (без сердечника). Для этого тумблер  $K_1$  оставьте в положении «С», а тумблер  $K_2$  переключите в положение «L». Переключателем ПК подключите цепь к источнику переменного напряжения.

3. Перемещая подвижный контакт реостата  $R_1$ , установите шесть различных значений напряжения  $U_d$ , определите соответствующие значения силы переменного тока  $I_d$  в цепи и внесите значения  $U_d$  и  $I_d$  в табл. 51.3.

4. По полученным данным постройте график зависимости силы тока от напряжения:  $I_d = f(U_d)$ . Убедитесь в выполнении закона Ома для цепи переменного тока. Используя угловой коэффициент линейной зависимости  $I = f(U)$ , определите экспериментальное значение  $Z_{\text{эксп}}$  полного сопротивления цепи.

5. Рассчитайте значение  $Z_{\text{расч}}$  полного сопротивления цепи по формуле (51.19). В качестве значений омического сопротивления  $R$ , индуктивности катушки  $L$  и емкости конденсатора  $C$  при вычислении возьмите средние значения этих параметров  $R_k$ ,  $L$  и  $C$ , измеренные в заданиях 1 и 2. Сравните полученные значения  $Z_{\text{расч}}$  и  $Z_{\text{эксп}}$ .

6. Используя формулу (51.17), рассчитайте сдвиг фаз  $\varphi$  между напряжением и током в цепи. Определите характер цепи (индуктивный или емкостный).

7. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что представляют собой компоненты электрической цепи: резистор, конденсатор и катушка индуктивности? 2. От каких параметров зависят сопротивление проводника, электрическая емкость конденсатора, индуктивность катушки? 3. Охарактеризуйте процессы в каждом из элементов электрической цепи – резисторе, конденсаторе, катушке индуктивности при их подключении к источнику постоянного напряжения. 4. Охарактеризуйте процессы в каждом из элементов электрической цепи – резисторе, конденсаторе, катушке индуктивности при их подключении к источнику перемен-

ного напряжения. 5. Что понимают под амплитудными значениями напряжения и силы переменного электрического тока? 6. Каков смысл сдвига фаз между током и напряжением в цепи переменного тока? 7. Определите, на какой промежуток времени переменный ток в катушке индуктивности отстает от изменения напряжения промышленной частоты  $\nu = 50$  Гц. 8. Сформулируйте закон Ома для цепи переменного тока. 9. Что понимают под действующими значениями напряжения и силы переменного электрического тока?

## **Лабораторная работа № 52**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ**

**Цель работы:** изучить зависимость амплитуды силы  $I$  тока от частоты  $\nu$  генератора при вынужденных колебаниях в колебательном контуре с последовательным соединением катушки  $L$ , конденсатора  $C$  и резистора  $R$  ( $LCR$ -контур); определить полуширину амплитудно-частотной характеристики контура ( $I = I(\nu)$ ), резонансную частоту, добротность контура.

#### **1. Теоретическое введение**

*Колебательным контуром* называется замкнутая электрическая цепь, содержащая катушку индуктивности  $L$  и конденсатор  $C$ . В такой цепи могут возбуждаться электрические колебания. Если в любом колебательном контуре возбудить свободные электрические колебания, то через некоторое время эти колебания прекратятся. Это связано с тем, что часть запасенной в колебательном контуре энергии затрачивается на разогрев проводников. Для создания и поддержания электрических колебаний в колебательном контуре к нему нужно непрерывно подводить энергию от внешнего источника. В такой цепи через некоторое время установятся стационарные вынужденные колебания, частота которых будет равна частоте вынуждающего напряжения, а фазовые и амплитудные соотношения напряжений и токов для различных элементов колебательного контура будут зависеть от параметров электрической цепи и параметров вынуждающего колебания.

Найдем уравнение колебаний в контуре, содержащем последовательно соединенные конденсатор  $C$ , катушку индуктивности  $L$ , активное сопротивление  $R$  и внешнюю переменную ЭДС  $\mathcal{E}$  (рис. 52.1).

Выберем положительное направление обхода контура, например, по часовой стрелке. Обозначим через  $q$  заряд той обкладки конденсатора, направление от которой к другой обкладке совпадает с выбранным положительным направлением обхода контура. Тогда ток в контуре согласно определению составит  $I = \frac{dq}{dt}$ .

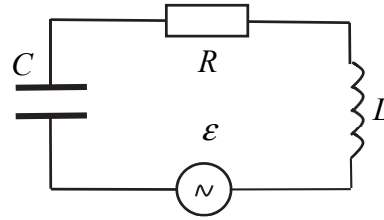


Рис. 52.1

В соответствии с законом Ома, для участка цепи  $IRL$

$$RI = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_S + \mathcal{E}, \quad (52.1)$$

где  $\mathcal{E}_S$  – ЭДС самоиндукции. В нашем случае  $\mathcal{E}_S = -L \frac{dI}{dt}$ ,

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{q}{C}.$$

Поэтому уравнение (52.1) можно переписать в виде

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \mathcal{E}. \quad (52.2)$$

Это и есть дифференциальное уравнение колебательного контура. Если в контур включена внешняя переменная ЭДС  $\mathcal{E}$ , зависящая от времени по гармоническому закону  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cos \omega t$ , то уравнение (52.2) примет вид

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\mathcal{E}_m}{L} \cos \omega t, \quad (52.3)$$

где введены обозначения

$$2\beta = \frac{R}{L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (52.4)$$

Величину  $\omega_0$  называют собственной частотой контура;  $\beta$  – коэффициентом затухания. Можно показать, что решение уравнения (52.3) имеет вид

$$q = q_m \cos(\omega t - \psi), \quad (52.5)$$

где  $q_m$  – амплитуда заряда на конденсаторе;  $\psi$  – разность фаз между колебаниями заряда и внешней ЭДС. Величины  $q_m$  и  $\psi$  определяются только свойствами самого контура и вынуждающей ЭДС.

Чтобы определить постоянные  $q_m$  и  $\psi$ , надо подставить (52.5) в исходное уравнение (52.3) и преобразовать полученное выражение. Найдем ток  $I(t)$ , для чего продифференцируем (52.5) по  $t$ :

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega q_m \sin(\omega t - \psi) = \omega q_m \cos(\omega t - \psi + \frac{\pi}{2}). \quad (52.6)$$

Запишем это выражение в виде

$$I = I_m \cos(\omega_0 t - \varphi), \quad (52.7)$$

где  $I_m$  – амплитуда тока;  $\varphi$  – сдвиг по фазе между током и внешней ЭДС.

$$I_m = \omega q_m, \quad \varphi = \psi - \frac{\pi}{2}. \quad (52.8)$$

Найдем  $I_m$  и  $\varphi$ . Для этого представим исходное уравнение в виде

$$U_L + U_R + U_C = \mathcal{E}_m \cos \omega t, \quad (52.9)$$

где слева записана сумма напряжений на индуктивности  $L$ , сопротивлении  $R$  и емкости  $C$ . Таким образом, сумма этих напряжений равна в каждый момент внешней ЭДС. Учитывая соотношение (52.6), получим выражения для напряжений на элементах цепи  $R$ ,  $L$  и  $C$ :

$$\begin{aligned} U_R &= RI = RI_m \cos(\omega t - \varphi); \\ U_C &= \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t - \psi) = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}); \\ U_L &= L \frac{dI}{dt} = -\omega LI_m \sin(\omega t - \varphi) = \omega LI_m \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}). \end{aligned} \quad (52.10)$$

Анализ соотношений (52.10) показывает, что  $U_R$  находится в одной фазе с током  $I$ ,  $U_C$  отстает по фазе от  $I$  на  $\pi / 2$ , а  $U_L$  опережает ток по фазе на  $\pi / 2$ . Все это можно наглядно представить с помощью векторной диаграммы, изобразив амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned} U_{Rm} &= RI_m; \\ U_{Cm} &= \frac{I_m}{\omega C}; \\ U_{Lm} &= \omega LI_m \end{aligned} \quad (52.11)$$

и их векторную сумму, равную вектору величины  $\mathcal{E}_m$  (рис. 52.2). Из прямоугольного треугольника этой диаграммы легко получить следующие выражения для амплитуды тока и разности фаз:

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (52.12)$$

Резонансными кривыми называют графики зависимостей амплитуд тока  $I$  и напряжений  $U_R$ ,  $U_C$  и  $U_L$  от частоты  $\nu$  внешней ЭДС, определяемых формулами (52.10). Типичная резонансная кривая для силы тока  $I_m(\nu)$  показана на рис. 52.3 ( $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ ).

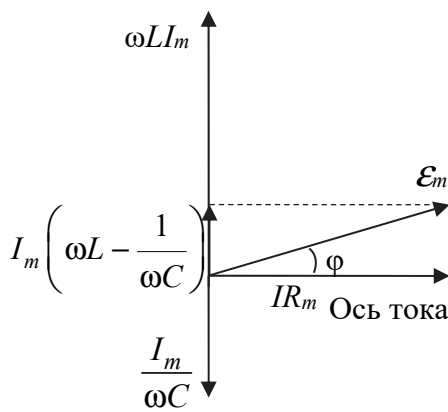


Рис. 52.2

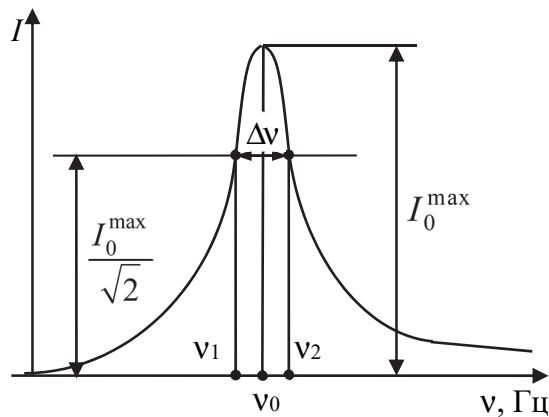


Рис. 52.3

Из выражения (52.12) для тока следует, что его максимальное значение достигается при  $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 0$ . Следовательно, резонансная частота для силы тока совпадает с собственной частотой контура,  $\omega_{\text{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Максимум при резонансе оказывается тем

выше и острее, чем меньше коэффициент затухания  $\beta = \frac{R}{2L}$ .

Найдем резонансную частоту для напряжения на конденсаторе. Уравнение для резонансной кривой напряжения на конденсаторе  $U_{Cm}$  получим из (52.11), подставив в него выражение для тока из (52.12):

$$\begin{aligned}
 U_{Cm} &= \frac{I_m}{\omega C} = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega C \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = \\
 &= \frac{\omega_0^2 \mathcal{E}_m}{L \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}. \quad (52.13)
 \end{aligned}$$

Важной характеристикой резонансной кривой колебательного контура является полоса пропускания, т. е. диапазон частот  $\Delta \nu = \nu_2 - \nu_1$ , в пределах которого значения силы тока составляют не ниже  $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$  от ее максимального значения на резонансной частоте. Максимум амплитуды колебаний заряда достигается на резонансной частоте, которую найдем, приравняв производную по  $\omega$  от знаменателя (52.13) к нулю:

$$8\beta^2 - 4(\omega_0^2 - \omega^2) = 0 \Rightarrow \omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}. \quad (52.14)$$

Аналогично можно найти резонансную частоту для напряжения на индуктивности. В итоге резонансные частоты для напряжений  $U_R$ ,  $U_C$  и  $U_L$  определяются следующими формулами:

$$\omega_{R0} = \omega_0, \quad \omega_{C0} = \omega_0 \sqrt{1 - 2\left(\frac{\beta}{\omega_0}\right)^2}, \quad \omega_{L0} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - 2\left(\frac{\beta}{\omega_0}\right)^2}}. \quad (52.15)$$

При резонансе напряжения  $U_R$  угол  $\varphi$  на векторной диаграмме равен нулю, напряжения  $U_C$  и  $U_L$  находятся в противофазе, а их амплитудные значения равны. Ток в цепи при резонансе определяется только сопротивлением  $R$ . Внешняя ЭДС или напряжение могут быть малыми, однако напряжения на емкости или индуктивности могут достигать достаточно больших значений.

Колебательный контур характеризуется величиной, называемой *добротностью контура*. Добротность контура  $Q$  пропорциональна отношению энергии, запасенной в контуре  $W_i$ , к величине потерь энергии за один период колебаний  $\Delta W = W_i - W_{i+1}$ :

$$Q = 2\pi \frac{W_i}{W_i - W_{i+1}} = 2\pi \frac{U_i^2}{U_i^2 - U_{i+1}^2}. \quad (52.16)$$

Выразив энергию через напряжение на конденсаторе на  $i$ -м колебании  $U_i$  и учитывая, что  $W_i = \frac{CU_i^2}{2} \sim \exp(-2\beta t)$ , а энергия  $(i+1)$ -го колебания  $W_{i+1} = \frac{CU_{i+1}^2}{2} \sim \exp[(-2\beta(t+T))]$ , получим

$$Q = 2\pi \frac{1}{1 - e^{-2\beta T}}, \text{ при } \beta T \ll 1 \Rightarrow Q \approx \frac{\pi}{\beta T} = \frac{\omega_0}{2\beta}. \quad (52.17)$$

Подставив в (52.17) выражения (52.4) для  $\omega_0$  и  $\beta$ , найдем выражение для добротности через параметры контура:

$$Q = \frac{2L}{2\sqrt{LC}R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (52.18)$$

В формуле (52.18)  $R$  – суммарное сопротивление контура, в которое входят сопротивление источника ЭДС, сопротивление обмотки катушки индуктивности, собственное сопротивление контура, а также «внесенное» сопротивление, обусловленное конечной проводимостью диэлектрика конденсатора.

Добротность связана с параметрами контура и резонансной кривой. Из формулы (52.13) при  $\omega = \omega_0$  с учетом (52.18) получим выражение

$$U_{\text{Срез}} = \frac{E_m}{\omega_0 CR} = \frac{E_m \sqrt{LC}}{CR} = E_m Q \Rightarrow Q = \frac{U_{\text{Срез}}}{E_m(v_0)}, \quad (52.19)$$

где  $E_m(v_0)$  – амплитуда входного сигнала генератора на измеряемой частоте резонанса ( $v_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ ). Таким образом, добротность контура показывает, во сколько раз максимальное значение амплитуды напряжения на конденсаторе (или на индуктивности) превышает амплитуду внешней ЭДС.

Добротность контура можно выразить также через ширину полосы пропускания. На граничных частотах полосы пропускания  $\omega_1$  и  $\omega_2$  средняя мощность, поглощаемая последовательным контуром, вдвое меньше средней мощности, поглощаемой при резонансе. При уменьшении мощности в два раза ток должен уменьшаться в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению со значением  $I_{\text{рез}} = I(\omega_0)$ . Из формулы (52.12) следует

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_{\text{рез}}} &= \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{R^2} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \frac{1}{R} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = \pm 1. \quad (52.20) \end{aligned}$$

Учитывая формулы (52.4), уравнение (52.20) можно представить в виде

$$\frac{\omega}{2\beta} \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) = \pm 1 \Rightarrow \omega^2 \pm 2\beta\omega - \omega_0^2 = 0. \quad (52.21)$$

Положительные корни уравнения (52.21) с учетом (52.18) дают выражения для частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$\omega_1 = \omega_0 \left( \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} - \frac{1}{2Q} \right), \quad \omega_2 = \omega_0 \left( \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} + \frac{1}{2Q} \right). \quad (52.22)$$

Тогда полоса пропускания

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_0}{Q}. \quad (52.23)$$

Отсюда следует выражение для добротности последовательного колебательного контура

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\nu_0}{\Delta\nu}, \quad (52.24)$$

где  $\omega_0$  – циклическая резонансная частота;  $\Delta\omega$  – ширина резонансной кривой на уровне, равном  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  от резонансного значения тока;

$\nu_0$  и  $\Delta\nu$  – соответствующие частоты в герцах, измеряемые по резонансной кривой.

## 2. Описание установки и метода измерений

**Задание 1.** Получение резонансной кривой для тока в последовательном колебательном контуре и определение его добротности.

Схема установки представлена на рис. 52.4. Генератор с периодически изменяющейся ЭДС ( $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t$ ) соединен с магазинами индуктивностей  $L$ , емкостей  $C$  и сопротивлений  $R$ . Сила  $I(t)$  тока в контуре пропорциональна напряжению  $U(t)$  на шунте с сопротивлением  $R_{\text{ш}}$  ( $I(t) = U(t) / R_{\text{ш}}$ ).

Действующее значение  $U_{\text{д}}$  этого напряжения измеряется вольтметром  $V$ . Значение частоты  $\nu$  (Гц) отсчитывается по шкале на лицевой панели генератора. Амплитуда и частота ЭДС генератора изменяются рукоятками на его лицевой панели.

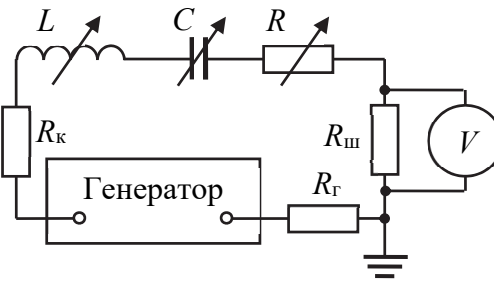


Рис. 52.4

**Задание 2.** Получение резонансной кривой напряжения на конденсаторе с помощью генератора качающейся частоты и цифрового осциллографа.

В состав установки входят компьютер в комплекте с монитором и клавиатурой, осциллограф со встроенным генератором и контейнер с исследуемым колебательным контуром, блоком реле и микроконтроллером (рис. 52.5).

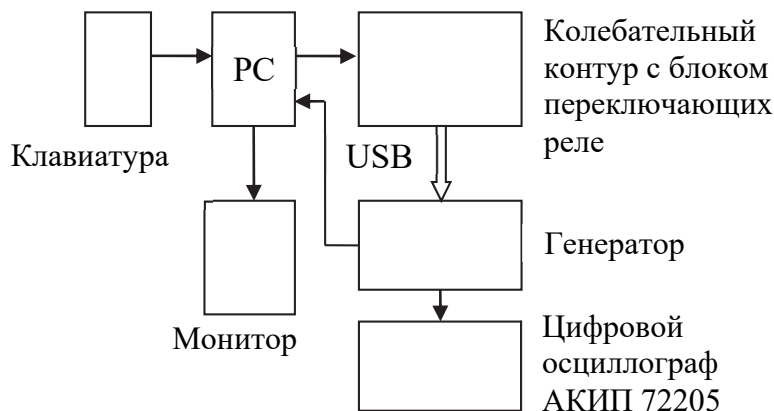


Рис. 52.5

Колебательный контур представляет собой три магазина сопротивлений, емкостей и индуктивностей, которые включаются последовательно в различных сочетаниях с помощью реле. Управление блоком реле и задание параметров контура ( $R$ ,  $L$  и  $C$ )

обеспечивается с клавиатуры компьютера через встроенный микроконтроллер с помощью специальной программы СТЕНД ДОБРОТНОСТЬ. Программа запускается с клавиатуры щелчком левой клавиши мыши на символе контура в нижней части экрана монитора.

Генератор осциллографа формирует сигналы синусоидальной формы различных частот, которые используются для возбуждения контура. В данной работе для получения резонансной кривой применяется режим качания частоты. Частота сигнала увеличивается на некоторый интервал спустя определенный промежуток времени. Шаг увеличения частоты и временной интервал задаются программно с клавиатуры. В память компьютера заносится значение амплитуды сигнала, соответствующее данной частоте возбуждения. На вход исследуемого контура подается сигнал с трансформаторного выхода широкополосного усилителя. В результате достигается низкое выходное сопротивление генератора (0,5 Ом), которое не зависит от частоты в широком диапазоне.

Цифровой осциллограф в данной работе обеспечивает с помощью специальной программы формирование сигнала генератора в нужном режиме, перевод в цифровую форму напряжения на элементах контура, занесение этих данных в память и воспроизведение их на экране. Значение частоты, откладываемое по горизонтальной оси, соответствует номеру ячейки памяти, а значение амплитуды сигнала (вертикальная ось) определяется содержимым этой ячейки. В результате на экране строится амплитудно-частотная характеристика колебательного контура (АЧХ), из которой определяются все необходимые данные.

### 3. Порядок выполнения работы

#### Задание 1.

1. Подготовьте таблицу для занесения и обработки результатов измерений (табл. 52.1).

Таблица 52.1

$R_{\Gamma} + R_{\kappa} =$		$R_{\text{ш}} = 1 \text{ Ом}$		$C =$		$L =$		$\nu_{\text{расч}} =$	
$i$	$R = 0 \text{ Ом}$				$R =$				
	$\nu,$	$I_{\text{д}},$	$\nu_0 / \Delta \nu_0,$	$Q$	$\nu,$	$I_{\text{д}},$	$\nu_0 / \Delta \nu_0,$	$Q$	

2. Занесите в табл. 52.1 значение суммарного выходного сопротивления генератора и катушки индуктивности,  $R_{\Gamma} + R_{\kappa}$ , а также значения  $L$  и  $C$ , которые определите по таблице приложения к установке в соответствии с номером  $n$  вашего звена в подгруппе.

3. Проверьте соответствие соединений приборов на установке и на схеме (рис. 52.4). Включите генератор и вольтметр в сеть.

4. На магазинах индуктивностей и емкостей установите заданные значения  $L$  и  $C$ . На магазине сопротивлений выставьте нули.

5. Убедитесь в том, что при заданных значениях  $L$ ,  $C$  и  $R$  наблюдается максимум на *резонансной кривой* зависимости  $I_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}}}{R_{\text{ш}}}$  от

частоты  $\nu$ . Для этого ручку регулятора выходного напряжения генератора поставьте в среднее положение, затем плавно изменяйте частоту  $\nu$  от наименьшего ее значения до максимально возможного. При этом напряжение на шунте  $R_{\text{ш}}$ , которое измеряется вольтметром  $V$ , сначала должно возрасти, а затем убывать (при  $\nu > \nu_0$ ). Переключатель диапазонов измерений на вольтметре поставьте в такое положение, чтобы стрелка вольтметра при резонансе отклонялась примерно на  $3/4$  его шкалы. Определите цену делений шкал частоты  $\nu$  генератора и напряжения  $U$  вольтметра.

6. После обнаружения резонанса приступите к снятию АЧХ контура, т. е. резонансной кривой ( $I_{\text{д}} = f(\nu)$ ) при  $R = 0$ . Увеличивая частоту  $\nu$  с некоторым шагом  $\Delta\nu$ , снимите показания вольтметра  $U$ . Значения частоты  $\nu$  и соответствующей ей силы тока  $I_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}}}{R_{\text{ш}}}$  занесите в таблицу. При приближении к резонансной ча-

стоте шаг  $\Delta\nu$  надо уменьшить так, чтобы максимально точно определить положение пика (максимума) на резонансной кривой. Пройдя через максимум, шаг  $\Delta\nu$  можно снова увеличить и закончить измерения, когда показания вольтметра уменьшатся примерно до начального деления его шкалы.

7. Выставьте на магазине сопротивлений значение  $R$ , заданное в таблице приложения, в соответствии с номером звена в подгруппе. Выполните измерения по п. 5 и 6.

8. По данным измерений постройте две амплитудно-частотные характеристики контура. Определите из графиков ширину  $\Delta\nu$  (см. рис. 52.3) и добротность  $Q = \frac{\nu_0}{\Delta\nu}$ .

9. Рассчитайте теоретические значения резонансной частоты  $\nu_0$  и добротности  $Q$  контура по следующим формулам:  $\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ,

$Q = \frac{1}{R_r + R_k + R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Сопоставьте экспериментальные и теоретические значения и определите относительные погрешности измерений.

### Задание 2.

1. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений (табл. 52.2).

Таблица 52.2

$R$ ,	$L$ ,	$C$ ,	$U_{\text{срез}}$ ,	$\nu_0$ ,	$\Delta\nu$ ,	$E_m(\nu_0)$ ,	$Q_1$	$Q_2$	$R_c$ ,

2. Для получения резонансной кривой руководствуйтесь инструкцией и иллюстрациями в приложении к лабораторному стенду.

2.1. Включите компьютер и монитор, загрузите операционную систему компьютера. Присоедините щуп осциллографа к выводам сопротивления блока колебательного контура и включите этот блок в сеть.

2.2. Вызовите к работе программу управления осциллографом, после чего откроется рабочий экран управления цифровым осциллографом.

2.3. Кнопкой на экране монитора включите внутренний генератор осциллографа и с помощью мыши введите в соответствующие окна значения параметров, которые указаны в приложении.

На экране монитора будет наблюдаться синусоидальный сигнал постоянной амплитуды с непрерывно изменяющейся частотой.

2.4. Подключите щуп осциллографа к выводам конденсатора. Вызовите окно программы «СТЕНД ДОБРОТНОСТЬ» управления параметрами контура, щелкнув на символе контура в нижней части экрана.

2.5. Вызовите окна, в которых выберите заданные в приложении числовые значения сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$  и активируйте эти значения кнопкой «УСТАНОВИТЬ ЗНАЧЕНИЯ». Значения соответствующих сопротивлений, емкостей и индуктивностей указаны в инструкции к установке. Запишите выбранные значения в соответствующие графы табл. 52.2.

2.6. Включите режим анализатора спектра и выполните его настройку, после чего на экране монитора должна появиться резонансная кривая (амплитудно-частотная характеристика напряжения на конденсаторе).

3. Наведите курсор на вершину полученной кривой, нажмите на левую клавишу мыши и в появившемся окне считайте резонансную частоту  $\nu_0$  и амплитуду напряжения на конденсаторе при резонансе  $U_{\text{Срез}}$ .

4. Наведите курсор на точки кривой на уровне  $\frac{U_{\text{Срез}}}{\sqrt{2}}$ , соответствующие частотам  $\nu_1$  и  $\nu_2$ . Запишите частоты  $\nu_1$  и  $\nu_2$  в нужные графы табл. 52.2.

5. Снова присоедините щуп к выводам сопротивления контура и определите напряжение генератора в режиме качания частоты на частоте резонанса  $E_m(\nu_0)$ . Запишите это значение в соответствующую графу таблицы.

6. По формулам (52.19) и (52.24) определите соответственно значения  $Q_1$  и  $Q_2$  с использованием измеренных данных. Сравните полученные результаты.

7. Используя значение  $Q_1$  или  $Q_2$ , из формулы (52.18) определите значение суммарного сопротивления контура  $R_c$ :

$$R_c = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Результат занесите в табл. 52.2. Сравните  $R_c$  со значением  $R$ , выбранным из таблицы приложения к лабораторной работе.

8. Подготовьте выводы по лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под резонансом напряжения? 2. Какова резонансная частота тока? 3. Постройте векторную диаграмму напряжений и токов при резонансе в цепи с последовательно включенными элементами  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . 4. Выведите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний. 5. Дайте определение добротности колебательного контура. 6. Как определить добротность контура из резонансной кривой тока? 7. Какие резонансы можно наблюдать в цепи с последовательно включенными элементами  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ? 8. При каком условии колебания в контуре возникнуть не могут?

## Лабораторная работа № 53 ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ

**Цель работы:** ознакомиться с принципом работы *уравновешенного моста переменного тока*; освоить методику измерения электрической емкости  $C$  и индуктивности  $L$ .

### 1. Теоретическое введение

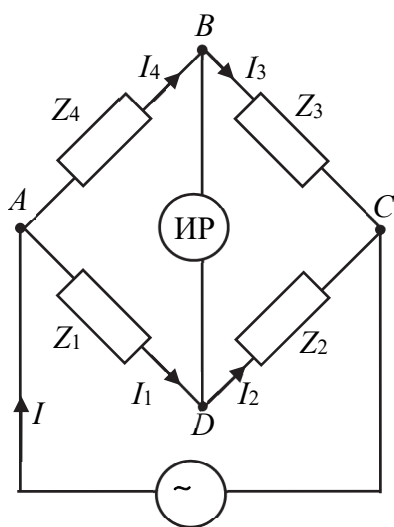


Рис. 53.1

Индуктивность  $L$  катушек и емкость  $C$  конденсаторов проявляются при изменяющихся во времени токах и напряжениях. Одним из распространенных методов измерения этих параметров является метод *уравновешенного моста синусоидального переменного тока\**, схема которого изображена на рис. 53.1. В качестве *индикаторов равновесия* ИР используются устройства с высоким внутренним сопротивлением, например электрометрический усилитель, электронный осциллограф и другие приборы. Каждое из четырех плеч моста в общем случае может содержать емкость  $C$ , индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$ , поэтому полное сопротивление  $Z$  плеча рассчитывается по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad (53.1)$$

где  $\omega L$  и  $\frac{1}{\omega C}$  – *индуктивное* и *емкостное* сопротивления соответственно ( $\omega$  – циклическая частота напряжения генератора). Сдвиг фаз  $\alpha$  между напряжением  $U = U_0 \cos \omega t$  и силой тока  $I = I_0 \cos (\omega t + \alpha)$  в плече моста определяется по формуле

---

\* Методика измерений активных сопротивлений  $R$  с помощью моста постоянного тока изложена в лабораторной работе № 34.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (53.2)$$

Рассмотрим схему моста. К точкам  $A$  и  $C$  моста подключен источник синусоидального напряжения ( $U = U_0 \cos \omega t$ ).

Обозначим через  $U_{10}$ ,  $U_{20}$ ,  $U_{30}$ ,  $U_{40}$  амплитудные значения напряжений на сопротивлениях плеч  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  моста соответственно;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$  – разности фаз между напряжениями на сопротивлениях  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  и  $Z_4$  и напряжением источника. Для напряжений ветвей  $ADC$  и  $ABC$  моста справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} U_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) + U_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) &= U_0 \cos \omega t; \\ U_{40} \cos(\omega t + \varphi_4) + U_{30} \cos(\omega t + \varphi_3) &= U_0 \cos \omega t. \end{aligned} \quad (53.3)$$

При равновесии моста мгновенные значения силы тока в диагонали  $BD$  и напряжения между точками  $B$  и  $D$  должны быть равны нулю. Поэтому для уравновешенного моста мгновенные значения напряжений на сопротивлениях  $Z_1$  и  $Z_4$ , а также на сопротивлениях  $Z_2$  и  $Z_3$  попарно равны, т. е.

$$\begin{aligned} U_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) &= U_{40} \cos(\omega t + \varphi_4); \\ U_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) &= U_{30} \cos(\omega t + \varphi_3). \end{aligned} \quad (53.4)$$

Так как ток через индикатор не течет, то в любой момент времени токи через сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$ , а также через  $Z_3$  и  $Z_4$  должны быть попарно равны. Поэтому, согласно закону Ома ( $I_0 = \frac{U_0}{Z}$ ), можно записать условия для амплитуд сил токов при равновесии моста переменного тока:

$$\begin{aligned} I_1 = I_2 &\Rightarrow \frac{U_{10}}{Z_1} \cos(\omega t + \alpha_1) = \frac{U_{20}}{Z_2} \cos(\omega t + \alpha_2); \\ I_3 = I_4 &\Rightarrow \frac{U_{30}}{Z_3} \cos(\omega t + \alpha_3) = \frac{U_{40}}{Z_4} \cos(\omega t + \alpha_4), \end{aligned} \quad (53.5)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  – разности фаз между токами и напряжениями плеч моста.

Соотношения (53.5) выполняются в любой момент времени, если имеет место равенство сдвигов фаз сил токов

$$\alpha_1 = \alpha_2; \alpha_3 = \alpha_4 \quad (53.6)$$

и условия равенства амплитуд сил токов

$$\frac{U_{10}}{Z_1} = \frac{U_{20}}{Z_2}; \frac{U_{40}}{Z_4} = \frac{U_{30}}{Z_3}. \quad (53.7)$$

Учитывая равенства (53.7) для напряжений, разделим первое уравнение (53.7) на второе. Тогда получим условие для сопротивлений  $Z$  плеч уравновешенного моста:

$$\frac{Z_4}{Z_1} = \frac{Z_3}{Z_2} \Rightarrow Z_4 Z_2 = Z_3 Z_1. \quad (53.8)$$

Таким образом, для уравнивания моста переменного тока (в отличие от моста постоянного тока) нужно уравнивать амплитуды и сдвиги фаз напряжений и токов.

Из условий (53.7) и (53.8) следует, что схема уравновешенного моста переменного тока существенно упрощается, если в одну из ветвей моста (например, состоящую из  $Z_1$  и  $Z_2$ ) включить два активных сопротивления (тогда условие  $\alpha_1 = \alpha_2$  автоматически выполняется). Такие мосты проще по устройству и обладают большей точностью вследствие того, что образцовые резисторы можно изготовить точнее, чем конденсаторы или катушки индуктивности.

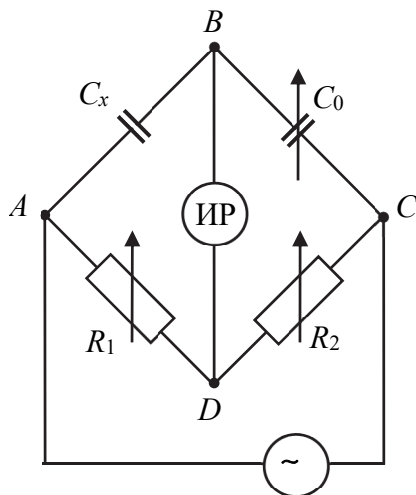


Рис. 53.2

Простейшая схема моста для измерения емкости продемонстрирована на рис. 53.2. Здесь  $C_x$  — измеряемая, а  $C_0$  — образцовая емкости;  $R_1$  и  $R_2$  — образцовые активные сопротивления.

Приведенная схема применима для измерения емкостей конденсаторов с пренебрежимо малыми утечками заряда с их обкладок. В этом случае условие (53.8) существенно упрощается и позволяет установить связь между измеряемой емкостью и остальными параметрами моста:

$$\frac{1}{\omega C_x} R_2 = \frac{1}{\omega C_0} R_1 \Rightarrow C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (53.9)$$

Из полученной формулы следует, что уравновесить мост можно, изменяя образцовую емкость  $C_0$  при заданном отношении  $\frac{R_2}{R_1}$  или изменяя это отношение при постоянной емкости  $C_0$ .

## 2. Описание установки и метода измерений

Принципиальная схема моста переменного тока представлена на рис. 53.3. Плечами  $R_1$  и  $R_2$  являются участки реохорда – калиброванной проволоки с большим удельным сопротивлением, натянутой вдоль миллиметровой шкалы.

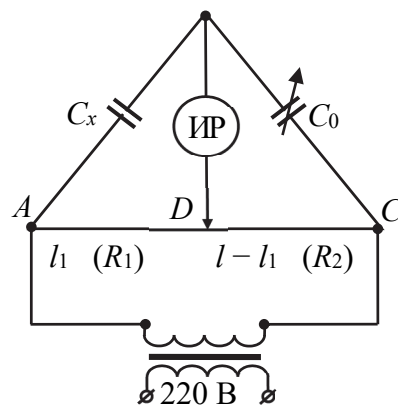


Рис. 53.3

Соединение индикатора ИР с реохордом осуществляется посредством подвижного контакта. Так как сопротивление такой проволоки пропорционально ее длине  $l$ , то, согласно (53.9) и рис. 53.3, имеем

$$C_x = C_0 \frac{l-l_1}{l_1}. \quad (53.10)$$

В качестве образцовой емкости  $C_0$  используется магазин емкостей, индикатором равновесия ИР является *нуль-индикатор*, показание которого пропорционально напряжению в измерительной диагонали  $BD$  моста. Переменное напряжение на реохорд моста подается от вторичной обмотки сетевого трансформатора.

### 3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

Измеряемая емкость	$l_1$ ,	$l - l_1$ ,	$C_0$ ,	$C_x$ ,	$C_x^{\text{ср}}$ ,
$C_{1x}$ ,					

2. Ознакомьтесь с расположением магазина емкостей, нуль-индикатора и конденсаторов, емкости которых следует определить. После проверки цепи преподавателем или лаборантом включите в сеть трансформатор и нуль-индикатор.

3. Присоедините к клеммам « $C_x$ » на установке один из трех конденсаторов с неизвестной емкостью  $C_{1x}$ . Установите подвижный контакт  $D$  посередине реохорда.

4. Выполните балансировку моста и определите значение емкости  $C_0$ . Для этого нажмите на клавишу «1» на передней панели нуль-индикатора. На магазине емкостей подберите такое значение образцовой емкости  $C_0$ , чтобы показание нуль-индикатора стало наименьшим.

5. Выполните измерения по п. 4 при более высокой чувствительности нуль-индикатора (сначала при нажатой клавише «2», а затем – клавише «3»). Значения  $l_1$  и  $C_0$ , полученные при нажатой кнопке «3», занесите в таблицу.

6. Повторите измерения по п. 4, 5, сместив контакт  $D$  реохорда сначала влево, а затем вправо на 5 см от среднего положения.

7. Выполните измерения по п. 3–6 для двух других конденсаторов с неизвестными емкостями  $C_{2x}$  и  $C_{3x}$ .

8. Выполните измерения по п. 3–6 при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов  $C_{1x}$ ,  $C_{2x}$  и  $C_{3x}$ .

9. Используя данные отдельных измерений, по формуле (53.10) определите значения измеряемых емкостей; рассчитайте также их средние значения. Результаты измерений занесите в таблицу.

10. Подготовьте выводы по лабораторной работе.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Какие методы измерения емкости и индуктивности вы знаете? 2. В чем заключается измерение методом моста? 3. Каковы

условия равновесия моста переменного тока? 4. Поясните метод измерения емкости конденсатора методом моста Сотти. 5. Постройте векторную диаграмму напряжений и токов моста переменного тока для измерения емкости.

## Лабораторная работа № 54 ИЗУЧЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

**Цель работы:** измерить вольт-амперную характеристику газоразрядной лампы; определить критическое сопротивление при возбуждении релаксационных колебаний; исследовать зависимость периода релаксационных колебаний от параметров генератора этих колебаний.

### 1. Теоретическое введение

*Релаксационными колебаниями* называются периодически повторяющиеся процессы сравнительно медленного накопления энергии колебательной системой и последующего быстрого ее рассеяния. Эти колебания являются одним из видов автоколебаний и могут происходить как в механических, так и в электрических системах. Электрические релаксационные колебания осуществляются с помощью различного типа генераторов. В данной работе используется простейший генератор релаксационных колебаний на газоразрядной лампе (тиратрон МТХ 90).

Зависимость силы тока  $I$  от напряжения  $U$  для газоразрядной лампы характеризуется рядом особенностей (рис. 54.1). Газовый промежуток лампы становится проводящим только при определенном напряжении  $U_z$  на электродах, которое называется *напряжением зажигания* разряда в лампе. При этом напряжении электроны, которые всегда содержатся в незначительном количестве в газе (их концентрация  $\sim 10^2 - 10^3 \text{ см}^{-3}$ ), на длине свободного пробега приобретают под

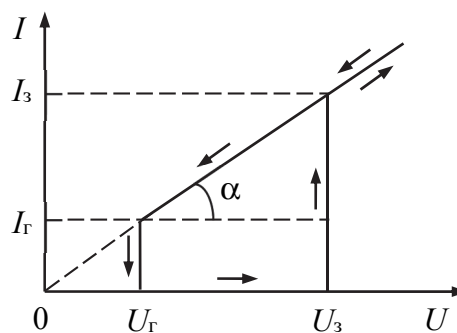


Рис. 54.1

действием электрического поля кинетическую энергию  $\frac{mv^2}{2} = eU$ , достаточную для *ударной ионизации* молекул газа. Вследствие ионизации число носителей заряда (электронов и ионов) в газовом промежутке резко увеличивается и сила тока в лампе скачком возрастает до значения  $I_3$ . Величина  $U_3$  зависит от расстояния между электродами и их формы, а также от давления газа и других факторов. По мере дальнейшего увеличения напряжения сила тока возрастает по закону, близкому к линейному. Так как процесс ионизации сопровождается возбуждением атомов, то при прохождении тока через лампу наблюдается свечение газа. С понижением напряжения сила тока уменьшается также по закону, близкому к линейному. Разряд в лампе продолжает существовать и при напряжении  $U < U_3$ , так как при этих условиях еще поддерживается процесс генерации носителей заряда. Когда разность потенциалов на лампе становится равной  $U_Г$ ,

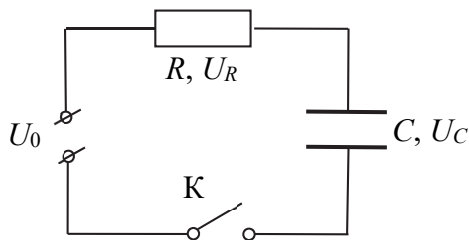


Рис. 54.2

разряд в лампе прекращается и сила тока в лампе падает скачком от  $I_Г$  до нуля. Разность потенциалов  $U_Г$  называют *напряжением гашения*. Это напряжение существенно меньше  $U_3$ .

Рассмотрим процесс зарядки конденсатора с емкостью  $C$  от источника постоянного напряжения  $U_0$  через резистор с сопротивлением  $R$  (рис. 54.2) после замыкания ключа  $K$ . Согласно второму правилу Кирхгофа, для произвольного момента времени  $t$  получим

$$U_R(t) + U_C(t) = U_0. \quad (54.1)$$

Напряжение на резисторе  $U_R = IR$ . Сила тока  $I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU_C}{dt}$ , где  $q$  – заряд на обкладке конденсатора, а  $U_C$  – напряжение на конденсаторе. Тогда  $U_R = RC \frac{dU_C}{dt}$  и уравнение (54.1) примет вид

$$RC \frac{dU_C}{dt} = U_0 - U_C \Rightarrow \frac{dU_C}{U_0 - U_C} = \frac{dt}{RC}. \quad (54.2)$$

Используя начальные условия ( $U_C = 0$  при  $t = 0$ ), проинтегрируем уравнение (54.2) в пределах от 0 до  $U_C$  и от 0 до  $t$ :

$$\int_0^{U_C} \frac{dU_C}{U_0 - U_C} = \frac{1}{RC} \int_0^t dt \Rightarrow U_C = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (54.3)$$

Из выражения (54.3) следует, что напряжение  $U_C$  на конденсаторе, увеличиваясь со временем  $t$  по экспоненциальному закону, асимптотически приближается к напряжению  $U_0$  источника (на рис. 54.3 этому процессу соответствует кривая  $0abc$ ). Нарастание  $U_C$  происходит тем быстрее, чем меньше величина  $RC$  ( $\tau = RC$  – время релаксации напряжения  $U_C$ , его обычно называют *постоянной времени*). Если конденсатор зарядить до разности потенциалов  $U_0$ , а затем замкнуть его на резистор сопротивлением  $R$ , то напряжение на нем со временем будет уменьшаться также по экспоненциальному закону (кривая  $cde$  на рис. 54.3).

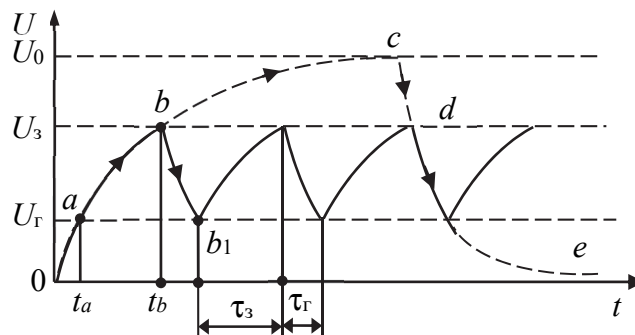


Рис. 54.3

В рассмотренную выше цепь параллельно конденсатору включим газоразрядную лампу с внутренним сопротивлением  $R_1$  (рис. 54.4). Предположим, что конденсатор предварительно разряжен. Сопротивление лампы до момента  $t_3$  зажигания в ней разряда очень велико, и ток через нее практически не проходит. Поэтому напряжение  $U_C$  на конденсаторе, а следовательно, и на электродах лампы будет сравнительно медленно увеличиваться согласно кривой  $0b$  (рис. 54.3).

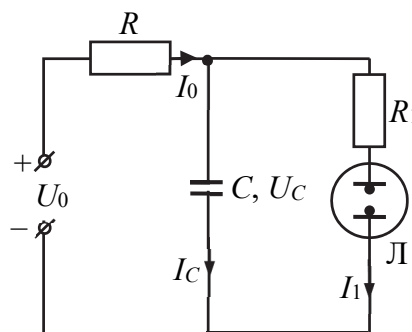


Рис. 54.4

Как только  $U_C$  станет равным напряжению зажигания  $U_3$  лампы, ее сопротивление резко уменьшится и начнется быстрая разрядка конденсатора (кривая  $bb_1$ ).

Вследствие этого напряжение на нем понижается. Когда  $U_C$  снизится до напряжения гашения  $U_T$ , ток через лампу опять перестанет проходить и конденсатор вновь начнет заряжаться. Рассмотренные процессы будут периодически повторяться. Таким образом, возникают электрические колебания, которые в данном случае представляют собой совокупность периодически повторяющихся процессов зарядки и разрядки конденсатора. Такие колебания и называются *релаксационными*. Разрядная лампа является своеобразным ключом, обеспечивающим повторяющиеся процессы накопления энергии конденсатора и ее рассеяния в разрядном промежутке лампы. В рассмотренной схеме генератора амплитуда возникающих пилообразных колебаний равна  $U_3 - U_T$ .

Для возникновения и поддержания релаксационных колебаний в генераторе необходимо выполнение определенных условий (*условий самовозбуждения*). Первое условие  $U_0 > U_3$  является очевидным, так как при его выполнении обеспечивается зажигание разряда в лампе. Второе условие накладывает ограничение на величину сопротивления  $R$  зарядного резистора. Получим расчетную формулу для *критического зарядного сопротивления*  $R_{кр}$ , при котором релаксационные колебания перестают возбуждаться. Для этого рассмотрим процесс разрядки конденсатора, начиная с момента времени  $t_b$  (рис. 54.3).

Согласно первому правилу Кирхгофа,

$$I_0 = I_C + I_1, \quad (54.4)$$

где  $I_C = C \frac{dU_C}{dt}$  – ток зарядки конденсатора;  $I_1 = \frac{U_C}{R_1}$  – ток, протекающий через лампу;  $I_0 = \frac{U_0 - U_C}{R}$  – ток источника питания.

Подставив выражения для сил токов в соотношение (54.4), получим дифференциальное уравнение относительно напряжения  $U_C$ :

$$\frac{U_0 - U_C}{R} = C \frac{dU_C}{dt} + \frac{U_C}{R_1}. \quad (54.5)$$

Разделив переменные и проинтегрировав это уравнение с использованием начального условия  $U_C = U_3$  при  $t = t_b$ , получим

$$U_C = U_3 e^{-\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right) (t - t_b)} + U_0 \frac{R_1}{R_1 + R} \left[ 1 - e^{-\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right) (t - t_b)} \right]. \quad (54.6)$$

Первое слагаемое в формуле (54.6) описывает уменьшение напряжения на конденсаторе  $C$  в процессе его разрядки, начиная с момента времени  $t_b$ . Второе слагаемое описывает подзарядку конденсатора от источника питания во время протекания разряда в лампе. Если скорости разрядки и зарядки конденсатора одинаковы, то напряжение на конденсаторе будет постоянным, т. е.  $\frac{dU_C}{dt} = 0$ , а ток, протекающий через зарядное сопротивление  $R$ , будет равен току, протекающему через лампу, т. е.  $I_0 = I_1$ . Продифференцировав выражение (54.6) по времени и приравняв производную к нулю, получим

$$U_3 - U_0 \frac{R_1}{R + R_1} = 0 \Rightarrow R = R_{\text{кр}} = \frac{U_0 - U_3}{U_3} R_1. \quad (54.7)$$

Формула (54.7) определяет величину критического сопротивления  $R_{\text{кр}}$ , при котором релаксационные колебания не возбуждаются, т. е.  $U_C = \text{const}$ , и лампа горит непрерывно ( $I_1 = I_0$ ). Сопротивление  $R_1$  лампы определяется по тангенсу угла  $\alpha$  наклона вольтамперной характеристики  $I = U / R_1$  (см. рис. 54.1):

$$\text{tg } \alpha = \frac{1}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{U_3 - U_{\Gamma}}{I_3 - I_{\Gamma}}. \quad (54.8)$$

Подставив это выражение в формулу (54.7), получим выражение для критического зарядного сопротивления:

$$R_{\text{кр}} = \frac{(U_0 - U_3)}{U_3} \frac{(U_3 - U_{\Gamma})}{(I_3 - I_{\Gamma})}. \quad (54.9)$$

Величина  $R > R_{\text{кр}}$  обычно выбирается достаточно большой, чтобы постоянная времени  $\tau = RC$  существенно превышала характерное время разрядки  $\tau_{\Gamma}$  конденсатора через лампу ( $\tau \gg \tau_{\Gamma}$ ). Для таких условий период  $T$  релаксационных колебаний ( $T = \tau_3 + \tau_{\Gamma}$ ) практически равен времени  $\tau_{ab}$  зарядки конденсатора до напряжения  $U_3$ , начиная с момента времени, при котором  $U_C = U_{\Gamma}$  (рис. 54.3).

## 2. Описание установки и метода измерений

Выведем формулу для расчета периода  $T$  релаксационных колебаний. Для этого в выражение (54.3) подставим сначала напряжение  $U = U_{\Gamma}$  и время  $t = t_a$  для точки  $a$ , затем напряжение  $U = U_3$  и

время  $t = t_b$  для точки  $b$  (рис. 54.3). В результате для промежутка времени  $\tau_{ab} = t_b - t_a$  получим

$$\tau_{ab} = \tau_c \approx T = RC \ln \frac{U_0 - U_r}{U_0 - U_3}. \quad (54.10)$$

Схема установки изображена на рис. 54.5. В состав установки входят набор кассет ФПЭ – магазин емкостей  $C$ , магазин сопротивлений  $R$ , генератор на тиратроне  $T$  и источник питания ИП, выходное напряжение которого регулируется. Двухпозиционный переключатель ПК обеспечивает возможность включения в схему миллиамперметра  $mA$  или магазина сопротивлений  $R$ . Положение 1 переключателя используется для построения вольт-амперной характеристики тиратрона, положение 2 – для получения релаксационных колебаний. Магазин емкостей включается в цепь кнопочным переключателем  $K$  на кассете ФПЭ. Для защиты тиратрона от перегрузки по току последовательно с ним постоянно включено добавочное сопротивление  $r$ . Для наблюдения релаксационных колебаний и измерения их периода используется осциллограф, на вход  $Y$  которого подается напряжение между точками  $A$  и  $B$ .

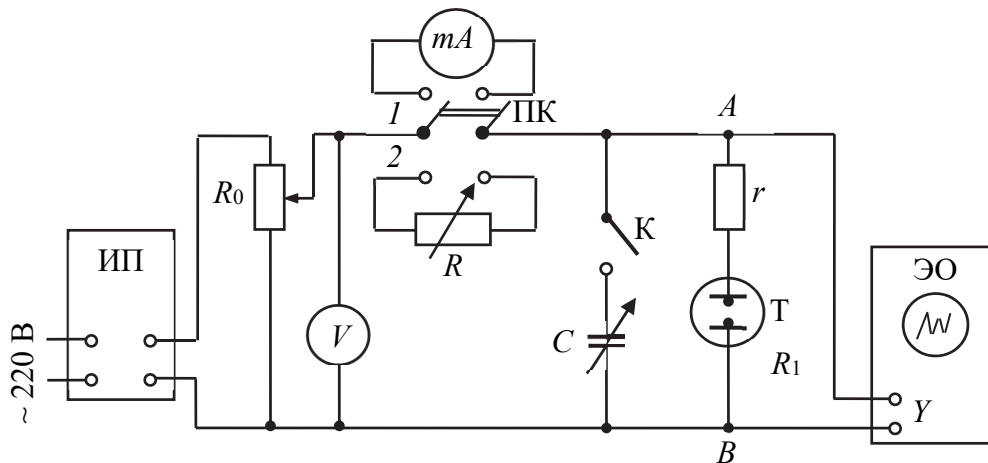


Рис. 54.5

В положении 2 переключателя ПК напряжение на тиратрон  $T$  и конденсатор  $C$  подается через сопротивление магазина  $R$ . Когда напряжение на конденсаторе достигает напряжения зажигания  $U_3$ , возникает электрический разряд в тиратроне, его сопротивление резко уменьшается и конденсатор  $C$  разряжается через тиратрон и добавочное сопротивление  $r$ . При сниже-

нии напряжения на конденсаторе до значения напряжения гашения  $U_{\Gamma}$  разряд в тиратроне прекращается и снова начинается процесс зарядки конденсатора. Таким образом, напряжение между точками  $A$  и  $B$  цепи периодически нарастает и спадает, т. е. в цепи возникают *релаксационные колебания*. Они обусловлены периодическими процессами зарядки и разрядки конденсатора, который осуществляется зажиганием и прерыванием разряда в тиратроне.

### 3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

**Задание 1.** Построение вольт-амперной характеристики тиратрона и определение напряжений зажигания  $U_3$  и гашения  $U_{\Gamma}$ .

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений (табл. 54.1).

Таблица 54.1

$i$	$U,$	$I,$	$U_3,$	$U_3^{\text{ср}},$	$U_{\Gamma},$	$U_{\Gamma}^{\text{ср}},$	$I_3,$	$I_{\Gamma},$

2. По приложению к установке ознакомьтесь с расположением приборов и устройств, входящих в состав установки. С разрешения преподавателя или лаборанта включите источник питания и осциллограф в сеть.

3. Отпустив кнопку на кассете ФПЭ, включите в цепь миллиамперметр  $mA$  (отпущенная кнопка соответствует положению  $I$  переключателя ПК на рис. 54.5). Магазины емкостей  $C$  и сопротивлений  $R$  при этом отключаются.

4. Изменяя напряжение  $U$  на лампе в интервале 0–90 В, измерьте через каждые 5 В соответствующие значения силы  $I$  тока (сначала при увеличении напряжения, а затем при его уменьшении). Результаты измерений занесите в табл. 54.1.

5. Опыт повторите еще 2 раза.

6. По полученным данным постройте три графика зависимости  $I = f_1(U)$ . Из полученной зависимости определите напряжения зажигания  $U_3$  и гашения  $U_{\Gamma}$  и соответствующие им силы тока  $I_3$  и  $I_{\Gamma}$ .

**Задание 2.** Определение условий возбуждения и периода релаксационных колебаний.

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений (табл.54.2).

Таблица 54.2

$i$	$U_0,$	$C,$	$R_{\text{кр}}^{\text{изм}},$	$R,$	$n,$	$t_n,$	$T_{\text{изм}},$	$T_{\text{расч}},$

2. Переключателем К на кассете ФПЭ включите в цепь магазин емкостей. Установите значение емкости  $C = 0,001$  мкФ, а по вольтметру задайте напряжение  $U_0 > U_3^{\text{ср}}$ .

3. Определите критическое сопротивление  $R_{\text{кр}}^{\text{изм}}$ . Для указанного значения  $C$  выберите на магазине наименьшее сопротивление  $R$ , при котором в цепи возбуждаются релаксационные колебания. При отсутствии колебаний лампа продолжает гореть непрерывно, а пилообразные сигналы на экране осциллографа исчезают. Данные занесите в табл. 54.2.

4. При заданных значениях  $U_0$  и  $C$  определите зависимость периода  $T$  релаксационных колебаний от величины зарядного сопротивления  $R$ . Для этого выставьте величину  $R$  ( $R > R_{\text{кр}}^{\text{изм}}$ ) на магазине сопротивлений и по горизонтальной шкале осциллографа измерьте время  $t_n$ , соответствующее  $n$  периодам ( $n = 4-5$ ). Повторите эти же измерения еще для 4 других значений  $R$ . Данные занесите в табл. 54.2.

5. Определите периоды  $T_{\text{изм}}$  колебаний ( $T_{\text{изм}} = \frac{t_n}{n}$ ) при разных значениях  $R$  и постройте график зависимости  $T_{\text{изм}} = f_2(R)$ . Убедитесь в том, что полученная экспериментальная зависимость является линейной.

6. По формуле (54.10) рассчитайте период  $T_{\text{расч}}$  релаксационных колебаний для тех же значений  $R$  и сравните их с  $T_{\text{изм}}$ .

7. По формуле (54.9) рассчитайте критическое сопротивление  $R_{\text{кр}}$ , используя данные  $U_3$ ,  $U_{\Gamma}$ ,  $I_3$ ,  $I_{\Gamma}$ , полученные при выполнении задания 1. Сравните расчетное и измеренное значения  $R_{\text{кр}}$ .

8. Подготовьте выводы по лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие колебания называют релаксационными? Каковы условия возбуждения таких колебаний? 2. Изобразите и объясните вольт-амперную характеристику неоновой лампы. 3. Запишите дифференциальные уравнения зарядки и разряда конденсатора через сопротивление. 4. Охарактеризуйте процессы в электрической цепи, протекающие при формировании релаксационных колебаний. 5. Изобразите схематично график зависимости напряжения  $U$  на обкладках конденсатора от времени  $t$  при возникновении релаксационных колебаний в цепи. 6. От каких параметров зависит значение периода релаксационных колебаний? 7. Как определить емкость конденсатора из осциллограммы релаксационных колебаний? 8. Какую роль играет вакуумная лампа (в данной работе – тиратрон) в процессе генерации релаксационных колебаний?

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

## Основные физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса электрона	$m_e$	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса протона	$m_p$	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Фарадея	$F$	$9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Коэффициент пропорциональности в законе Кулона	$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	$9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Кл}^{-2}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Планка	$h$	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$
Постоянная закона смещения Вина	$b$	$2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Ридберга	$R$	$3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$
Радиус первой боровской орбиты	$a$	$5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Энергия ионизации атома водорода	$E_i$	$13,6 \text{ эВ}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_K$	$2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Число Лоренца	$L$	$2,45 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}^2 \cdot \text{Кл}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$

Таблица П2

**Греческий алфавит**

Обозначения букв	Названия букв	Обозначения букв	Названия букв
Α, α	альфа	Ν, ν	ню
Β, β	бета	Ξ, ξ	кси
Γ, γ	гамма	Ο, ο	омикрон
Δ, δ	дельта	Π, π	пи
Ε, ε	эпсилон	Ρ, ρ	ро
Ζ, ζ	дзета	Σ, σ	сигма
Η, η	эта	Τ, τ	тау
Θ, θ	тета	Υ, υ	ипсилон
Ι, ι	йота	Φ, φ	фи
Κ, κ	каппа	Χ, χ	хи
Λ, λ	ламбда	Ψ, ψ	пси
Μ, μ	мю	Ω, ω	омега

Таблица П3

**Обозначения и названия некоторых единиц**

Обозначение	Название	Обозначение	Название	Обозначение	Название
А	ампер	Кл	кулон	Ом·м	Ом-метр
Вт	ватт	Дж	джоуль	м	метр
Вт·ч	ватт-час	К	кельвин	рад	радиан
Вб	вебер	Ом	ом	с	секунда
В	вольт	Ф	фарад	ср	стерадиан
Гн	генри	Тл	тесла	ч	час
Гц	герц	См	сименс	эВ	электрон-вольт

Таблица П4

**Единицы величин в СИ**

Величина	Единица величины в СИ	Величина	Единица величины в СИ
Электрическое напряжение, электрический потенциал, ЭДС	В	Удельная электрическая проводимость	См/м
Сила тока	А	Электрическая проводимость	См
Электрический заряд	Кл	Индуктивность	Гн
Напряженность электрического поля	В/м	Частота колебаний	Гц
Электрическая емкость	Ф	Магнитный поток	Вб
Электромагнитная энергия	Дж	Магнитная индукция	Тл
Плотность электрического заряда: линейная поверхностная объемная	Кл/м Кл/м <sup>2</sup> Кл/м <sup>3</sup>	Электрическое сопротивление	Ом
		Удельное электрическое сопротивление	Ом·м

Таблица П5

**Десятичные приставки к названиям единиц**

Приставка			Приставка		
Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
экса	Э	10 <sup>18</sup>	деци	д	10 <sup>-1</sup>
пета	П	10 <sup>15</sup>	санتي	с	10 <sup>-2</sup>
тера	Т	10 <sup>12</sup>	мили	м	10 <sup>-3</sup>
гига	Г	10 <sup>9</sup>	микро	мк	10 <sup>-6</sup>
мега	М	10 <sup>6</sup>	нано	н	10 <sup>-9</sup>
кило	к	10 <sup>3</sup>	пико	п	10 <sup>-12</sup>
гекто	г	10 <sup>2</sup>	фемто	ф	10 <sup>-15</sup>
дека	да	10 <sup>1</sup>	атто	а	10 <sup>-18</sup>

Таблица П6

**Некоторые внесистемные единицы**

Единица	Значение в СИ	Единица	Значение в СИ
1 Дб	$3,33 \cdot 10^{-30}$ Кл·м	1 Å	$10^{-10}$ м
1 Мкс	$1 \cdot 10^{-8}$ Вб	1 а. е. м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
1 Гс	$1 \cdot 10^{-4}$ Тл	1 эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
1Э	$\sim 79,6$ А/м	1 кал	4,18 Дж

Таблица П7

**Диэлектрическая проницаемость веществ**

для газов – при  $T = 273$  К, жидкостей и твердых веществ – при  $T = 293$  К

Вещество	$\epsilon$	Вещество	$\epsilon$
Вакуум	1,00000	Слюда	4–10
Воздух	1,00057	Янтарь	2,2–2,9
Азот	1,0058	Эбонит	2,5–4,0
Кислород	1,00055	Резина	3,0–6,0
Водород	1,00057	Каучук	2,5–3,0
Водяной пар (при 373 К)	1,006	Лед (при 263 К)	70
Азот жидкий (при 77 К)	1,4	Древесина сухая	2,2–3,7
Вода	81	Полиэтилен	2,3
Масло трансформаторное	2,2	Полистирол	2,3–2,5
Бензин	1,9–2,0	Полихлорвинил	5
Керосин	2	Бакелит	3–5
Глицерин	43	Парафин	2,2
Этиловый спирт	26	Воск	7,8
Метиловый спирт	33,5	Фарфор	4,4–6,8
Ацетон	21,4	Сегнетова соль	$\sim 9000$
Алмаз	5,7	Титанат бария	$\sim 10^4$
Стекло	6,0–10,0	Дигидрофосфат калия	$\sim 10^5$

Таблица П8

**Зависимость диэлектрической проницаемости жидкостей  
от температуры**

Вещество	Температура, К					
	273	283	293	303	313	323
Ацетон	23,3	22,5	21,4	20,5	19,5	18,7
Бензол	–	2,30	2,29	2,26	2,25	2,22
Вода	87,83	83,86	80,08	76,47	73,02	69,73
Этиловый спирт	27,88	26,41	25,00	23,52	22,16	20,87

Таблица П9

**Магнитная проницаемость веществ**

Вещество	$\mu$	Вещество	$\mu$
Воздух	1,00000038	Вода	0,999991
Кислород	1,0000019	Медь	0,99999
Кислород жидкий (при 80,75 К)	1,0034	Стекло	0,999987
Алюминий	1,000023	Железо*	8000
Водород	0,99999937	Кобальт*	175
Вольфрам	1,000176	Никель*	1100
Висмут	0,999824	Чугун*	600–800

\* Максимальное значение

Таблица П10

**Температура Кюри некоторых веществ**

Вещество	$T_K$ , К	Вещество	$T_K$ , К
Сегнетоэлектрики			
Сегнетова соль*	255–297	Титанат бария	391
Дигидрофосфат калия	123	Ниобат калия	708
Ферромагнетики			
Железо	1043	Никель	631
Кобальт	1604	Тербий	223

\* Указан температурный интервал сегнетоэлектрических свойств.

Таблица П11

**Термоэлектродвижущая сила некоторых пар металлов (в мВ)**

Пара	Температура горячего спая, К								
	373	473	573	673	773	883	973	1073	1273
Железо – кон- стантан	5	11	16	22	27	33	39	46	58
Медь – кон- стантан	4	9	15	21	–	–	–	–	–

\*Температура холодного спая равна 273 К.

Таблица П12

**Удельное электрическое сопротивление веществ (при 293 К)**

Вещество	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Вещество	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Алюминий	0,028	Германий	0,47
Вольфрам	0,055	Кремний	$2,3 \cdot 10^3$
Железо	0,10	Ацетон	$8,3 \cdot 10^4$
Медь	0,017	Этиловый спирт	$1,5 \cdot 10^5$
Серебро	0,016	Вода морская	0,3
Золото	0,024	Вода речная	10–100
Графит	13	Вода дистиллированная	$10^3\text{--}10^4$
Константан (Cu/Ni/Mn: 54/45/1)	0,5	Воздух	$10^{15}\text{--}10^{18}$
		Стекло	$10^9\text{--}10^{13}$
Нихром (Ni/Mn/Cr: 60/4/36)	1,1	Резина	$10^{11}\text{--}10^{12}$
		Древесина сухая	$10^9\text{--}10^{10}$
PbS	9,1	Масло трансформаторное	$10^{10}\text{--}10^{13}$

Таблица П14

**Температурный коэффициент сопротивления (при 293 К)**

Вещество	$\alpha, 10^{-3} \text{ К}^{-1}$	Вещество	$\alpha, 10^{-3} \text{ К}^{-1}$
Алюминий	4,3	Ртуть	0,92
Вольфрам	4,1	Серебро	3,8
Золото	3,9	Константан	0,03
Медь	3,8	Манганин	0,02
Никель	6,5	Никелин	0,23
Платина	3,9	Нихром	0,25

Таблица П15

**Работа выхода электрона**

Вещество	$A$ , эВ	Вещество	$A$ , эВ
Барий	2,4	Барий на вольфраме	1,1
Вольфрам	4,5	Торий	3,4
Платина	5,3	Торий на вольфраме	2,6
Серебро	4,3	Цезий	1,8
Графит	4,7	Цезий на вольфраме	1,4
Оксид бария	1,0	Кальций	2,8

Таблица П16

**Дипольные моменты молекул**

Вещество	$p_e$ , $10^{-30}$ Кл·м	Вещество	$p_e$ , $10^{-30}$ Кл·м
Вода	6,13	Бензол	0
Этиловый спирт	5,57	Бромбензол	5,10
Ацетон	9,04	Хлорбензол	5,24
Глицерин	0,93	Нитробензол	13,11
Пиридин	7,34	СО	0,33
Фенол	7,84	NO	0,23

## ЛИТЕРАТУРА

1. Физика: в 6 ч. Ч. III. Электричество: ЭУМК по учебной дисциплине для всех специальностей I ступени высшего образования БГТУ / И. И. Наркевич, Е. В. Фарафонов, Д. В. Кленицкий [и др.]. – Рег. свид. № 1142125138 от 16.03.2021.

2. Физика: в 6 ч. Ч. IV. Магнетизм: ЭУМК по учебной дисциплине для всех специальностей I ступени высшего образования БГТУ / Н. Н. Крук, И. И. Наркевич, В. В. Чаевский [и др.]. – Рег. свид. № 1142126514 от 09.09.2021.

3. Физика. Лабораторный практикум: учеб. пособие: в 3 ч. / Д. В. Кленицкий, Н. Н. Крук, А. В. Буцень, В. В. Тульев. – Минск: БГТУ, 2024. – Ч. 1: Механика и молекулярная физика.

4. Наркевич, И. И. Физика для ВТУЗов: в 2 т. / И. И. Наркевич, Э. И. Волмянский, С. И. Лобко. – Минск: Выш. шк., 1992. – Т. 1; 1994. – Т. 2.

5. Детлаф, А. А. Курс физики: в 3 т. / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М.: Высш. шк., 1987. – Т. 1; 1989. – Т. 2; 2003. – Т. 3.

5. Савельев, Е. В. Курс общей физики: в 3 т. / Е. В. Савельев. – М.: Наука, 1987–1989. – Т. 1–3.

6. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1985.

7. Бобрович, О. Г. Физика: в 5 ч / О. Г. Бобрович, В. В. Тульев. – Минск: БГТУ, 2011. – Ч. 2: Электростатика. Постоянный электрический ток.

8. Бобрович, О. Г. Физика: в 5 ч. / О. Г. Бобрович, В. В. Тульев. – Минск: БГТУ, 2013. – Ч. 3: Магнитное поле. Электромагнитные волны.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	4
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ .....	6
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.....	12
Лабораторная работа № 31. Измерение диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков .....	12
Лабораторная работа № 32. Определение диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков .....	19
Лабораторная работа № 33. Изучение поляризации сегнетоэлектриков .....	22
Лабораторная работа № 34. Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона.....	32
Лабораторная работа № 36. Изучение закона Видемана – Франца .....	38
Лабораторная работа № 37. Изучение работы вакуумного диода и определение удельного заряда электрона.....	45
Лабораторная работа № 38. Определение работы выхода электрона из металла.....	51
Лабораторная работа № 39. Изучение эффекта Зеебека .....	55
Лабораторная работа № 40. Изучение физических принципов работы осциллографа .....	61
МАГНЕТИЗМ .....	70
Лабораторная работа № 46. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.....	70
Лабораторная работа № 47. Изучение магнитных свойств материалов .....	81
Лабораторная работа № 48. Изучение магнитного гистерезиса с помощью осциллографа.....	90
Лабораторная работа № 49. Изучение явления электромагнитной индукции.....	95

---

Лабораторная работа № 50. Изучение собственных затухающих электромагнитных колебаний.....	105
Лабораторная работа № 51. Изучение цепи переменного электрического тока .....	116
Лабораторная работа № 52. Исследование резонанса напряжений .....	126
Лабораторная работа № 53. Измерение емкости конденсаторов мостовым методом.....	138
Лабораторная работа № 54. Изучение релаксационных электрических колебаний .....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	152
ЛИТЕРАТУРА .....	159

Учебное издание

**Крук** Николай Николаевич  
**Буцень** Андрей Викторович  
**Тульев** Валентин Валентинович  
**Поплавский** Василий Владимирович

# **ФИЗИКА**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**В 3-х частях**

### **Ч. 2. Электричество и магнетизм**

Учебно-методическое пособие

Редактор *Е. И. Гоман*  
Компьютерная верстка *О. А. Солодкевич*  
Дизайн обложки *Д. А. Кускильдина*  
Корректор *Е. И. Гоман*

Подписано в печать 18.12.2025. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 9,6.  
Тираж 300 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/227 от 20.03.2014.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.