МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДАРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ-ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ

Кафедра технической механики и физики

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ПРОГРАММАМ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ)

Часть 2. Постоянный ток. Электромагнетизм

Зерноград - 2024

© Леонтьев Н.Г., Белоусов А.В.,
Гуриненко Л.А.
© Азово-Черноморский
инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024

Об издании – 1,2
Содержание

УДК 53.08(075)

Издается по решению методической комиссии
по специальностям среднего профессионального образования
социально-экономического и технического профиля
Азово-Черноморского инженерного института
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»
в г. Зернограде.

Рецензенты:
кандидат технических наук, доцент Г.В. Степанчук
кандидат технических наук, доцент А.Б. Портаков

Леонтьев Н.Г. Лабораторный практикум по физике для обучающихся по программам высшего образования (заочной формы обучения) [Электронный ресурс]: Часть 2. Постоянный ток. Электромагнетизм/ Н.Г. Леонтьев, А.В. Белоусов, Л.А. Гуриненко. - Электронное издание._Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024. – 47 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Учебное пособие «Лабораторный практикум по физике для обучающихся по программам высшего образования (заочной формы обучения) : Часть 2. Постоянный ток. Электромагнетизм» предназначено для обучающихся по направлениям подготовки (специальностям) 13.03.01, 13.03.02, 19.03.02, 21.03.02, 23.03.01, 23.03.03, 35.03.06, 44.03.04, 23.05.01.

Рекомендовано к изданию Методическим советом Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ Протокол № 9 от 15.05.2024 года

© Леонтьев Н.Г., Белоусов А.В.,
Гуриненко Л.А.
© Азово-Черноморский
инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024

Оглавление

1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ 4
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ 4
1.2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ 5
1.3. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ, МОЩНОСТИ 7
1.4. РЕОСТАТЫ И МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ 8
1.5. ПОГРЕШНОСТИ И КЛАССЫ ТОЧНОСТИ 9
ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ 9
1.6. МНОГОПРЕДЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ 10
1.7.УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛАХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ 11
1.8. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ 12
2. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ 13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42 14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №43. 17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 44. 20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 47 24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 51 27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 53 30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 56 35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 57 40
ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН 45

1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

При изучении теории электрических явлений в процессе выполнения лабораторных работ студенты проводят измерения физических величин с помощью электроизмерительных приборов. При этом они должны научиться определять тип прибора по обозначениям на шкалах и т.п.

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Электроизмерительные приборы классифицируют по следующим признакам:

1) по роду измеряемой величины;
2) по виду тока;
3) по типу отсчетного устройства;
4) по принципу действия;
5) по классу точности прибора.

Классификация основных типов электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины приведена в таблице 1.

Таблица 1

Род измеряемой величины	Название прибора	Условное обозначение на шкале
Сила тока I	Амперметр	A
Сила тока I	Килоамперметр	kA
Сила тока I	Миллиамперметр	mA
Сила тока I	Гальванометр	G
Напряжение U	Вольтметр	V
Напряжение U	Киловольтметр	kV
Напряжение U	Милливольтметр	mV
Сопротивление R	Омметр	Ω
Сопротивление R	Мост сопротивлений	Ω
Электрическая мощность P	Ваттметр Киловаттметр	W kW
Электрическая энергия W	Счетчик ватт-часов киловатт-часов	Wh kWh
Количество электричества Q	Счетчик ампер-часов Куметр	Ah Q
Фаза φ	Фазометр	$\cos\varphi$

По виду тока электроизмерительные приборы подразделяются на предназначенные для измерения постоянного тока (обозначение на шкале прибора: постоянного (—)), переменного (~), трехфазного и т.п.

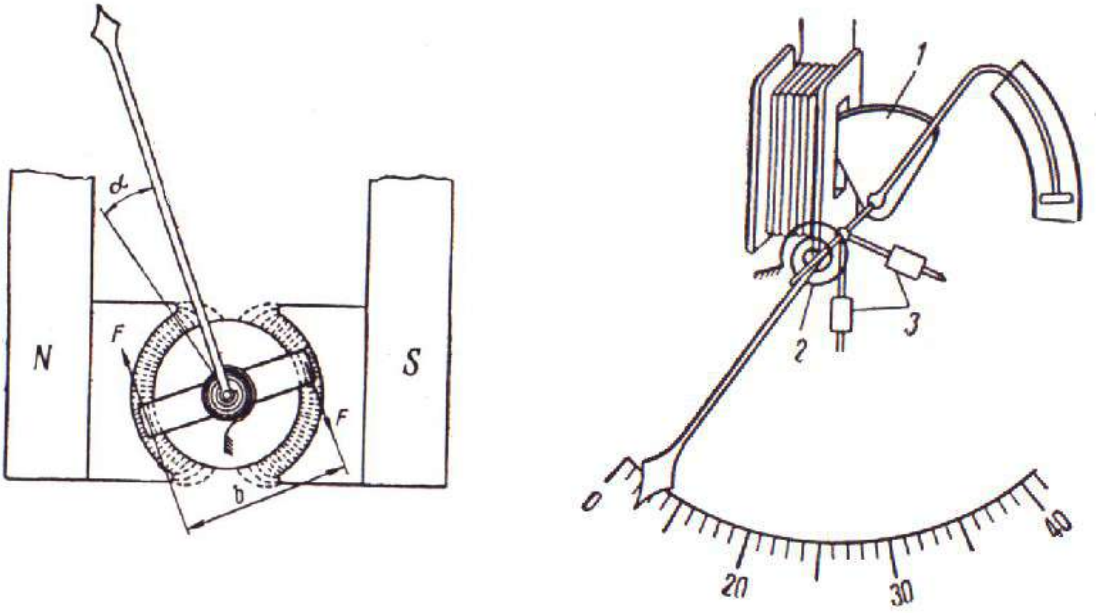
По типу отсчетного устройства электроизмерительные приборы бывают стрелочные, цифровые, самопишущие, цифропечатающие, осциллографы и др.

1.2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Электроизмерительные приборы по принципу действия делятся на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, термоэлектрические, вибрационные и др. Наиболее распространенными для лабораторных измерений являются приборы первых трех систем.

1.2.1. ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии между магнитным полем постоянного магнита и подвижной катушки (рамки), по которой проходит измеряемый ток (рис.1а).



а б

Рис.1. Приборы магнитоэлектрической (а) и электромагнитной (б) систем

При наличии в подвижной рамке электрического тока на нее со стороны магнитного поля действует вращающий момент силы, пропорциональный силе тока. В результате рамка со стрелкой поворачивается на некоторый угол до тех пор, пока вращающий момент не уравновесится противодействующим моментом упругой силы, создаваемым возвращающей пружиной. Так как индукция поля во всех точках зазора постоянного магнита одинакова и направлена радиально, а противодействующий момент силы пружин пропорционален углу поворота подвижной рамке со стрелкой, то отклонение стрелки пропорционально измеряемому току.

Поэтому шкала магнитоэлектрических приборов равномерная, что является одним из достоинств приборов этой системы. К достоинствам приборов магнитоэлектрической системы можно отнести и следующие: а) высокие точность и чувствительность; б) малое влияние внешних магнитных полей и температуры; в) малую потребляемую мощность. Недостатками являются: а) пригодность только для постоянного тока; б) чувствительность к электриче-

ским перегрузкам и механическим воздействиям; в)относительно высокая стоимость.

Приборы магнитоэлектрической системы используют в качестве гальванометров, амперметров и вольтметров в цепях постоянного тока. При наличии детектирующего устройства их используют и для измерений в цепях переменного тока.

На шкале прибора эта система обозначается знаком 
Кроме того, на шкале значком ⎓ указывается то, что прибор может измерять только постоянный ток.

1.2.2. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

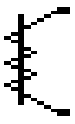
Принцип их работы основан на взаимодействии магнитного поля, образуемого измеряемым током при прохождении его по обмотке неподвижной рабочей катушки с щелевым зазором, и подвижного сердечника в виде диска специальной формы из ферромагнитного сплава, укрепленного эксцентрично на оси со стрелкой. При пропускании тока через катушку диск втягивается в нее и стрелка отклоняется. Противодействующий момент силы создается пружиной. На одной оси со стрелкой также закреплен воздушный успокоитель (демпфер), гасящий колебания стрелки (рис.1б). Момент силы взаимодействия между магнитным полем и ферромагнитным диском только приблизительно пропорционален квадрату силы тока, а противодействующий момент силы пропорционален углу поворота, и шкала электромагнитных приборов неравномерная.

Приборы данной системы пригодны для измерений в цепях как постоянного, так и переменного тока, поскольку направление момента силы, действующего на ферромагнитный диск, не зависит от направления тока, протекающего по обмотке прибора.

Достоинствами электромагнитных приборов являются: а) пригодность для измерений постоянного и переменного тока; б) простота конструкции и сравнительная дешевизна; в) пригодность для измерений больших токов без вспомогательных приспособлений (шунтов, трансформаторов тока); г) устойчивость к токовым перегрузкам и механическим воздействиям.

К недостаткам следует отнести: а) неравномерность шкалы; б) низкую чувствительность; в) зависимость показаний от внешних магнитных полей.

Приборы электромагнитной системы применяются в качестве амперметров и вольтметров.

На шкале прибора эта система обозначается знаком 
Кроме того, на шкале значком ≂ указывается то, что прибор может измерять постоянный и переменный ток.

1.2.3. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей токов, протекающих по двум катушкам. Одна из них неподвижна, а вторая может поворачиваться вокруг оси внутри

первой. В обоих случаях вращающий момент, действующий на подвижную катушку, пропорционален квадрату силы тока, протекающего через прибор, и $\cos\varphi$ между фазами переменных тока и напряжения, рис.2. Поэтому приборы электродинамической системы имеют неравномерную шкалу.

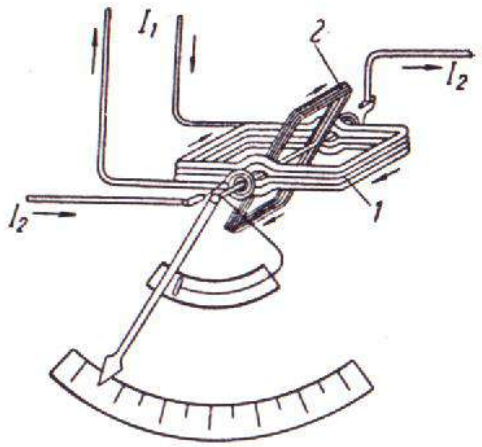


Рис.2. Прибор электродинамической системы

Электродинамические приборы можно применять для измерений в цепях и постоянного, и переменного тока.

Приборы электродинамической системы могут применяться в качестве амперметров, вольтметров и ваттметров. В первом случае обе катушки включаются в цепь последовательно с нагрузкой, во втором - параллельно. В третьем случае одна (токовая) катушка включается последовательно с нагрузкой, а другая (катушка напряжения) - параллельно.

Достоинства электродинамических приборов: а) высокая точность и чувствительность; б) возможность измерений как постоянного, так и переменного тока; в) возможность непосредственного измерения мощности (использования прибора в качестве ваттметра).

Недостатками приборов данной системы являются: а) чувствительность к токовым и механическим перегрузкам, большая потребляемая мощность; б) неравномерная шкала; в) сравнительно высокая стоимость.

На шкале прибора эта система обозначается знаком ⏥. На шкале знаком ≂ указывается то, что прибор может измерять постоянный и переменный ток.

1.3. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ, МОЩНОСТИ

Электроизмерительные приборы рассмотренных систем, как правило, имеют малый предел измерения, т.е. могут служить в качестве гальванометров. Для расширения предела измерения прибора как амперметра к нему нужно подключить параллельно шунт, а в качестве вольтметра – последовательно добавочное сопротивление.

1.3.1. АМПЕРМЕТРЫ

Приборы, предназначенные для измерения силы тока - амперметры - включаются последовательно с измеряемым участком цепи. В этом случае сила тока, проходящего через прибор и измеряемый участок, одинакова. Однако, включение амперметра последовательно с измеряемым участком увеличивает сопротивление участка, что приводит к уменьшению силы тока на

участке, по сравнению с истинным. Для того чтобы включение амперметра не изменяло заметно тока в цепи, его внутреннее сопротивление должно быть достаточно малым по сравнению с сопротивлением участка. Идеальным является амперметр с нулевым сопротивлением.

1.3.2. ВОЛЬТМЕТРЫ

Вольтметры предназначены для измерения электрического напряжения и подключаются параллельно измеряемому участку. При этом падения напряжения на приборе и нагрузке одинаковы. Для того чтобы подключение вольтметра мало влияло на падение напряжения на нагрузке, его сопротивление должно быть значительно больше, чем сопротивление нагрузки. Идеальным является вольтметр с бесконечно большим сопротивлением.

1.3.3. ВАТТМЕТРЫ

Измерение электрической мощности, потребляемой на участке цепи, можно производить с помощью амперметра и вольтметра $P = U * I$. Непосредственный отсчет мощности можно осуществить с помощью приборов электродинамической системы, имеющих две катушки. Ваттметр имеет четыре клеммы и подключается согласно схеме на рис.3а.

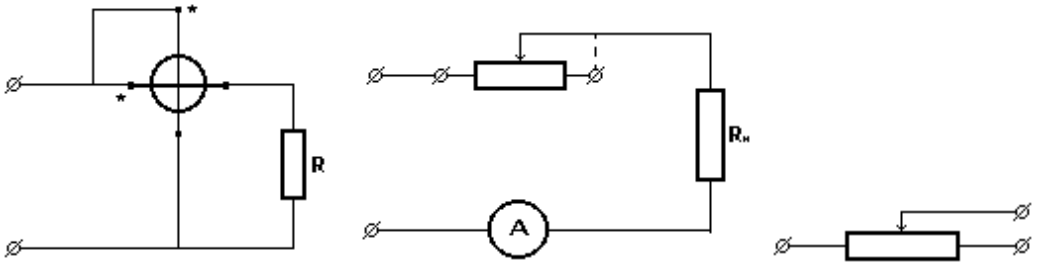


Рис.3 - Подключение прибора электродинамической системы как ваттметра (а). Подключение реостата как дополнительного сопротивления (б) и как делителя напряжения (в)

1.4. РЕОСТАТЫ И МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ

1.4.1. РЕОСТАТЫ

Реостаты - это устройства, служащие для изменения сопротивления электрической цепи. При этом изменяется сила тока в цепи и напряжение на ее участках. В лабораториях при небольших токах применяют ползунковые реостаты. Такой реостат состоит из проволоки, намотанной на керамический каркас. На реостате имеются три клеммы: две нижние - для подключения концов обмотки, и верхняя - для подключения ползунка. Путем перемещения ползунка можно менять число витков проволоки, введенной в цепь, меняя величину вводимого сопротивления. В качестве материала для проволоки берут сплавы, обладающие высоким удельным сопротивлением (константан, манганин, нихром и др.).

1.4.1.1. Включение реостата для регулирования силы тока

Реостат включается в цепь последовательно: к одной из нижних клемм и клемме ползунка (рис.53). Вторая нижняя клемма остается неподключенной. При перемещении ползунка меняется сопротивление и ток в цепи. Перед подключением источника тока ползунок должен быть передвинут к свободной нижней клемме. В этом случае ток будет минимальным. Сопротивление реостата подбирают как минимум на порядок большим, чем сопротивление остальной цепи. Недостаток ограничителя тока в том, что с его помощью нельзя уменьшить ток до нуля.

1.4.1.2. Включение реостата для регулирования напряжения (как делителя напряжения или потенциометра)

В этом случае используются все три клеммы реостата (рис.3в). Полное сопротивление реостата подключается нижними клеммами к источнику напряжения. Если необходимо подать на потребитель не все напряжение источника U_o, а его часть, то рабочий участок цепи подключают между одной из нижних клемм и ползунком. При увеличении сопротивления той части реостата, к которой подключена рабочая цепь, увеличивается напряжение U, подаваемое на нагрузку. Перед подключением источника энергии ползунок должен быть передвинут к той нижней клемме, от которой отходят два провода (на источник тока и на нагрузку). В этом случае U=0. Сопротивление реостата выбирают на порядок меньше, чем сопротивление остальной цепи. В этом случае напряжение на ней будет меняться примерно пропорционально смещению ползунка от крайнего положения.

1.5. ПОГРЕШНОСТИ И КЛАССЫ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Важнейшей характеристикой измерительного прибора является погрешность, т.е. степень приближения его показаний к действительному значению измеряемой величины.

В качестве «истинного» значения измеряемой величины может быть принят результат измерения, выполненного на образцовом приборе.

Разность между показанием рабочего прибора a и истинным значением измеренной величины $a_Д$ называется абсолютной погрешностью измерения: $\Delta a = a - a_Д$. Абсолютная погрешность выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Величина абсолютной погрешности не дает полного представления о точности измерений, она должна быть сопоставлена с измеряемой величиной. Поэтому при оценке точности измерений используется относительная погрешность, равная отношению абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины: $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_Д} \approx \frac{\Delta a}{a}$. Это отношение выражается в относительных единицах либо в процентах.

Из сравнения показания прибора с действительным значением измеряемой величины следует, что на различных участках шкалы относительная погрешность различна по величине. Поэтому для характеристики точности

электроизмерительных приборов используется приведенная относительная погрешность.

Приведенная относительная погрешность $\varepsilon_{ПРИВ}$ - это отношение минимальной абсолютной погрешности $|\Delta a|_{MIN}$ к предельному (номинальному) значению измеряемой величины, т.е. к пределу измерения прибора a_{MAX}:

$$\varepsilon_{ПРИВ} = \frac{|\Delta a|_{MIN}}{a_{MAX}} 100\% . \qquad /1/$$

Приведенная относительная погрешность может быть определена через число делений на шкале прибора N:

$$\varepsilon_{ПРИВ} = \frac{\delta / 2}{a_{MAX}} = \frac{a_{MAX} / 2N}{a_{MAX}} = \frac{1}{2N}, \qquad /2/$$

где δ - цена деления прибора. На практике вместо $\varepsilon_{ПРИВ}$ используют стандартную приведенную относительную погрешность $\varepsilon_{ПРИВ.СТ}$ - класс точности прибора, который обычно указывают на его шкале.

По классу точности приборы делятся на контрольные или поверочные, имеющие классы точности 0.05, 0.1, 0.2; лабораторные, имеющие классы точности 0.5, 1.0, 1.5, и показывающие, имеющие классы точности 1.5, 2.5, 4.0.

Если класс точности прибора известен, то в качестве минимальной средней абсолютной погрешности при измерениях берется ее значение, определяемое по классу точности используемого прибора:

$$\Delta a_{MIN} = \frac{\varepsilon_{ПРИВ.СТ} * a_{MAX}}{100\%} . \qquad /3/$$

Средняя абсолютная погрешность, полученная в эксперименте, будет всегда больше или равна минимальной средней абсолютной погрешности - $\Delta a_{CP} \geq \Delta a_{MIN}$.

Относительная погрешность измерения зависит от значения измеряемой величины и больше (или равна) класса точности прибора - $\varepsilon_{CP} \geq \varepsilon_{ПРИВ.СТ}$.

Для того чтобы средняя относительная погрешность была близка к классу точности прибора, необходимо подобрать прибор так, чтобы измеряемая величина была близка к его пределу измерения $a \to a_{MAX}$, для чего необходимо, чтобы стрелка прибора находилась во второй половине шкалы $a \geq 0{,}5 a_{MAX}$. Тогда $\varepsilon_{ПРИВ.СТ} \leq \varepsilon_{CP} \leq 2\varepsilon_{ПРИВ.СТ}$. Следовательно, при измерениях с заданной точностью ε_{CP} необходимо использовать прибор с классом точности $\varepsilon_{ПРИВ.СТ} \geq 0.5\varepsilon_{CP}$.

1.6. МНОГОПРЕДЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Часто требуется измерять электрические величины в широких пределах с достаточной степенью точности в каждом интервале. Для этой цели удобны многопредельные приборы, в которых изменение пределов достигается включением различных шунтов для амперметров или добавочных сопротив-

лений для вольтметров. Такие наборы различных шунтов или добавочных сопротивлений устанавливают внутри прибора. На панели прибора имеется несколько клемм: одна общая (обозначаемая значками (-) или (*)), а остальные подключены к различным шунтам или добавочным сопротивлениям с соответствующим пределом измерения. Может быть также только пара клемм, и в этом случае изменение пределов измерения производится переключателем на панели прибора.

Как правило, многопредельные приборы имеют одну шкалу, цена деления прибора изменяется при переключении предела. Поэтому цену деления прибора необходимо определять для каждого предела.

Многопредельный прибор надо включать так, чтобы относительная погрешность измерения была близкой к классу точности прибора.

При пользовании многопредельными приборами необходимо руководствоваться следующими правилами:

а) если заранее не известен диапазон измеряемых величин, прибор первоначально включают на максимальный предел во избежание порчи;

б) до начала измерений определяют приближенное значение измеряемой величины на максимальном пределе, а затем переключают прибор на тот предел, значение которого ближе всего к значению измеряемой величины, оставаясь больше нее.

в) если измеряемая величина увеличивается в процессе эксперимента, то измерения на выбранном пределе продолжают до тех пор, пока стрелка не дойдет до конца шкалы, а затем переходят на следующий предел.

При переходе с одного предела измерения на другой необходимо определять цену деления шкалы на каждом пределе.

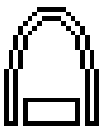
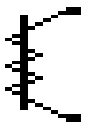
Цена деления определяется как отношение предела измерения, на котором работает прибор, к числу делений его шкалы.

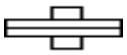
1.7.УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛАХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Технические характеристики электроизмерительного прибора обозначаются условными знаками обычно на лицевой стороне его шкалы. На шкале или над клеммами прибора указывается, для измерения каких величин он предназначен.

Обязательно указываются следующие технические характеристики, приведенные в таблице 4.

Таблица 4

Техническая характеристика	Условное обозначение
Система прибора: магнитоэлектрическая	
электромагнитная	

электродинамическая 

Класс точности прибора 0.2, 1.0,....

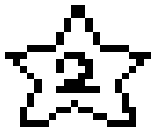
Прибор предназначен для включения в цепь:

- постоянного тока
- переменного тока
- постоянного и переменного тока



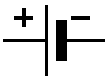
Рабочее положение прибора вертикальное

Рабочее положение прибора горизонтальное

Измерительный механизм изолирован от корпуса, и проведено испытание при напряжении 2 кВ. 

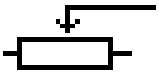
1.8. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

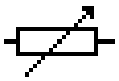
Наименование Обозначение

1. Гальванический элемент 

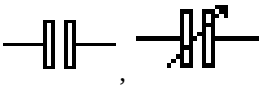
Примечание: знаки полярности можно не ставить.

2. Постоянный резистор (постоянное сопротивление) 

3. Реостат (сопротивление переменное) 



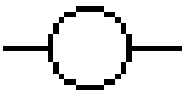
Обозначение переменного сопротивления (реостата), включаемого в цепь последовательно

4. Конденсаторы постоянной и переменной емкости 

5. Катушка индуктивности (дроссель) без сердечника 

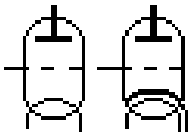
Катушка индуктивности (дроссель) с ферромагнитным сердечником 

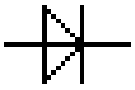
6. Трансформаторы с сердечником и без сердечника 

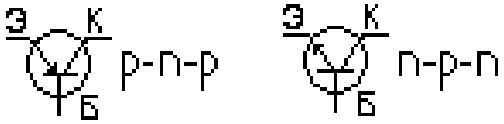
7. Прибор измерительный 



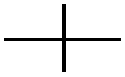
8. Диод вакуумный косвенного накала

9. Триод вакуумный 

10. Диод полупроводниковый 

11. Транзистор 

12. Лампа накаливания 

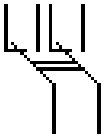
13. Пересечение проводов, электрически не соединенных 

14. Электрические провода с соединением 

15. Заземление 

16. Соединение с корпусом 

17. Выключатель однополюсный **(**ключ**)** 

18. Выключатель двойной (на два положения) 

2. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Каждый студент, выполняющий лабораторный практикум по физике, ведет два журнала: журнал наблюдений и журнал отчетов. Журнал наблюдений и журнал отчетов могут быть выполнены в виде папки или тетради и должны вестись аккуратно.

В журнале наблюдений приводятся следующие сведения:

1. Номер и название лабораторной работы.
2. Расчетные формулы.
3. Таблицы результатов наблюдений.
4. Результаты вычисления искомых физических величин.
5. Конечные результаты.

В журнале отчетов приводятся следующие сведения:

1. Номер и название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Краткая теория с чертежом и принципиальной схемой установки.
4. Таблица результатов наблюдений.
5. Графики, выполненные на миллиметровой бумаге.
6. Результат и выводы.

Лабораторная работа визируется преподавателем после снятия данных подписью в журнале наблюдений и после оформления - подписью в журнале отчетов. Отчеты без подписи в журнале наблюдений не принимаются. Жур-

нал наблюдений и журнал отчетов студент сдает преподавателю в конце сессии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Цель работы: определение электроемкости конденсаторов и изучение закономерностей последовательного и параллельного соединения конденсаторов.

Приборы и принадлежности**:** конденсатор известной емкости (эталонный), конденсаторы неизвестной емкости, баллистический гальванометр, вольтметр, реостат, источник напряжения, двойной переключатель, ключ, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Система, состоящая из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, называется конденсатором. Простейшим является плоский конденсатор, состоящий из двух плоских параллельных друг другу проводящих пластин (обкладок), разделенных тонким слоем диэлектрика.

Электроемкостью конденсатора называется величина, численно равная отношению заряда q, находящегося на одной из обкладок, к разности потенциалов между этими обкладками $C = \frac{q}{U}$. /1/

Несколько конденсаторов можно соединить в батарею. При параллельном соединении емкость батареи равна сумме емкостей каждого из конденсаторов $C = \sum_{i=1}^{n} C_i$. /2/

При последовательном соединении емкость батареи рассчитывается по формуле $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}$. /3/

В данной работе емкость конденсатора определяется баллистическим гальванометром - прибором, предназначенным для измерения протекающего через него электрического заряда. В процессе измерения на рамку действует момент силы, пропорциональный силе тока $M_{вр} = k_1 \cdot I$. /4/

Под действием этого момента рамка будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий момент не будет уравновешен моментом кручения пружины, возвращающим рамку в первоначальное положение. Момент кручения пружины пропорционален углу поворота рамки $M_{возвр} = k_2 \cdot \alpha$. /5/

Из условия равновесия следует $k_1 I = k_2 \alpha$. /6/

Отсюда вытекает, что сила тока, протекающего по рамке гальванометра прямо пропорциональна углу поворота рамки

$$I = \frac{k_2}{k_1}\alpha \qquad \text{или} \qquad I = B\alpha, \qquad /7/$$

где B - постоянная баллистического гальванометра.

Баллистический гальванометр отличается от обычных гальванометров тем, что его рамка обладает большим моментом инерции и, следовательно, большим периодом колебаний. Это свойство позволяет измерять величину заряда, прошедшего через гальванометр, при кратковременном импульсе тока. Так как период поворота рамки значительно больше времени разряда Δt, это позволяет измерить угол поворота α. Зная угол α, можно измерить и заряд $q = I\Delta t$, поскольку заряд, протекающий через рамку прибора, пропорционален углу поворота рамки $q = B\alpha$, /8/

Для отсчета угла поворота α на одной оси с рамкой прикрепляется маленькое зеркало, на которое падает узкий луч света от осветителя. Отраженный световой луч попадает на шкалу, по которой ведется отсчет. При повороте рамки на угол α световой луч отклоняется, смещаясь по шкале на n делений. При небольших отклонениях угол поворота рамки α прямо пропорционален отбросу светового луча n, отсчитываемому по шкале.

Измерение емкости баллистическим гальванометром производится методом сравнения. Если эталонный конденсатор с емкостью С зарядить от источника постоянного тока, а затем разрядить через гальванометр, то на основании /8/ и учитывая, что заряд протекающий при разряде конденсатора через гальванометр равен $q = CU$, можно записать

$$CU = B\alpha.. \qquad /9/$$

Заменив эталонную емкость С неизвестной емкостью C_x, получим:

$$C_xU_x = B\alpha_x. \qquad /10/$$

Разделив /10/ на /11/, получим $\frac{CU}{C_xU_x} = \frac{\alpha}{\alpha_x}$ или $\frac{CU}{C_xU_x} = \frac{n}{n_x}$. /11/

Отсюда можно определить неизвестную емкость $C_x = C\frac{n_x}{n}\frac{U_x}{U}$. /12/

Если измеряемые емкости незначительно отличаются по величине, конденсаторы удобно заряжать при одном и том же напряжении. В этом случае формула для расчета неизвестной емкости принимает вид $C_x = C\frac{n_x}{n}$. /13/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на рис.42.1. На схеме схеме: Е - источник постоянного напряжения; $К_1$ - ключ; $К_2$ - кнопка для замыкания накоротко гальванометра с целью гашения колебания рамки; R - реостат, включенный в цепь в качестве делителя напряжения; V – вольтметр; $К_3$ - двойной переключатель; С – конденсатор; Г - баллистический гальванометр.

2.Подключить эталонный конденсатор С. Движок реостата установить в та-

ком положении, чтобы в цепи было минимальное напряжение. Все ключи

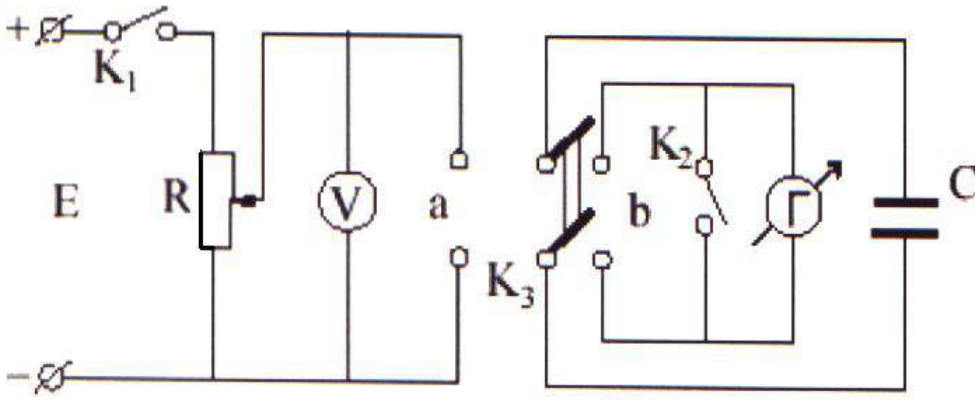


Рис.42.1

разомкнуты.

3.Включить осветитель и установить шкалу так, чтобы на ней получилось резкое изображение нити, совпадающее с нулем шкалы.

4.Включить ключ K_1 и, перемещая движок реостата, установить напряжение U = 0,1 В.

5.Зарядить конденсатор, замкнув переключатель K_2 на клеммы «а». Затем разрядить конденсатор через гальванометр, замкнув переключатель на клеммы «б». Отсчитать при этом первый максимальный отброс зайчика. Повторить измерения не менее трех раз, предварительно погасив колебания рамки гальванометра кратковременным нажатием на кнопку K_2 в момент прохождения светового зайчика через нуль шкалы. Найти среднее значение отклонения зайчика. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

5.Заменить эталонный конденсатор другим - сначала C_1, а затем C_2 и произвести с ними измерения по пункту 4. Определить емкости этих конденсаторов по формуле /13/.

6.Определить по пунктам 4,5 емкость батарей из конденсаторов C_1 и C_2, соединенных параллельно и последовательно. Если отброс зайчика по шкале при измерении емкости батареи мал (менее 10 см), то в этом случае увеличить напряжение зарядки в 2-3 раза. Расчет емкости производить по формуле /12/.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№	Измеряемые емкости	Отклонение луча				$C_{изм.}$, мкф	$C_{вычисл.}$, мкф
		1	2	3	Средн.		
1	Эталон						
2	C_1						
3	C_2						
4	Паралл.соед.						
5	Последов. соед						

7.Данные, полученные в результате измерений при параллельно и последовательно соединенных конденсаторах, сравнить со значениями емкости C_1 и C_2, рассчитанными теоретически при последовательном и параллельном соединении конденсаторов по формулам /2/ и /3/.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое конденсатор?
2. Дайте определение электроемкости конденсатора. В каких единицах измеряется электроемкость?
3. От чего зависит электроемкость конденсатора?
4. Напишите формулу электроемкости плоского конденсатора.
5. Напишите (выведите) формулу для вычисления суммарной емкости батареи конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §93, 94.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - § 26,27.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике.// Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §III.4.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №43.
ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ КИРХГОФА

Цель работы: проверить справедливость правил Кирхгофа для разветвленной цепи.

Приборы и принадлежности: электрическая цепь, смонтированная на панели, вольтметр, два источника питания.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В разветвленных электрических цепях для расчета токов используют два правила, сформулированные Кирхгофом.

Первое правило относится к узлам цепи. Узлом называется точка, в которой сходятся более чем 2 проводника (рис.43.1). Первое правило Кирхгофа гласит: Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum_{k=1}^{n} I_k = 0. \qquad /1/$$

При этом, силы токов, текущих к узлу, считаются положительными, а текущие от узла – отрицательными. Так, для узла на рис.43.1, можно записать

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0. \qquad /1а/$$

Первое правило Кирхгофа вытекает из закона сохранения заряда. В цепи заряды не могут накапливаться, поэтому заряд, пришедший в узел за интервал времени Δt должен быть равен заряду, ушедшему из узла за тоже время.

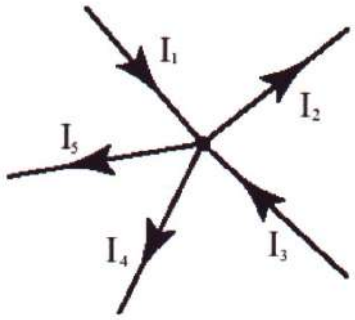


Рис.43.1

Для нахождения неизвестных токов первого правила Кирхгофа недостаточно, так как число независимых уравнений, которое вытекает из него, меньше числа неизвестных токов. Необходимо составить еще несколько независимых уравнений. Для этого применяют второе правило Кирхгофа, которое справедливо для произвольного замкнутого контура в электрической цепи.

Рассмотрим замкнутый контур ABCD (рис.43.2). Зададим направление обхода контура произвольно, например, по часовой стрелке. Применим к каждому из неразветвленных участков контура AB, BC, CD и DA закон Ома для неоднородного участка цепи

$$I_1R_1 = \phi_B - \phi_A + E_1.$$
$$-I_2R_2 = \phi_c - \phi_B - E_2. \qquad /2/$$
$$-I_3R_3 = \phi_D - \phi_C.$$
$$-I_4R_4 = \phi_A - \phi_D.$$

В этих уравнениях падение напряжения берется со знаком (+), если направление тока совпадает с направлением обхода контура и со знаком (-), если направление обхода контура и направление тока противоположны.

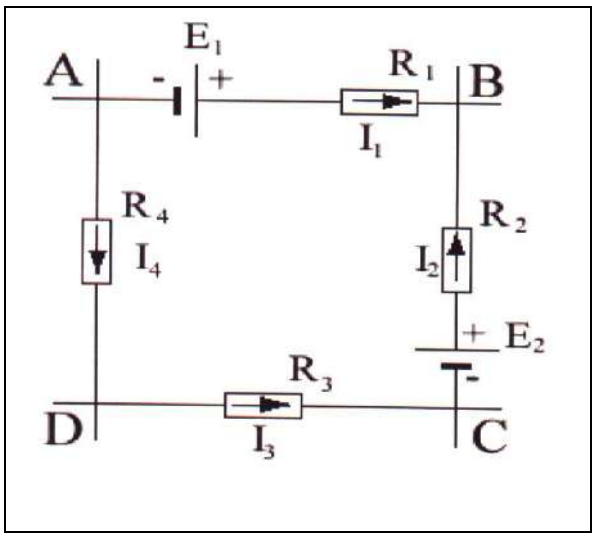


Рис.43.2

Значение Э.Д.С. берется со знаком (+), если направление обхода контура совпадает с направлением от отрицательного полюса источника тока к положительному полюсу, и со знаком (-) - в противном случае.

При сложении уравнений /2/ получаем:

$$I_1R_1 - I_2R_2 - I_3R_3 - I_4R_4 = E_1 - E_2$$

В общем случае получаем уравнение

$$\sum_K I_к R_к = \sum_n E_n, \qquad /2/$$

которое выражает второе правило Кирхгофа: В произвольном замкнутом контуре разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма Э.Д.С. равна алгебраической сумме падений напряжений на соответствующих участках контура.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Начертить в тетради рабочую схему, собранную на панели. Записать в таблицу 1 результатов наблюдений значения всех сопротивлений, обозначив их на схеме соответствующим образом. Величины сопротивлений даны с точностью ± 1%.

2.Подключить источники тока к клеммам, расположенным на панели. С помощью вольтметра определить полярность подключения источников и обозначить ее на схеме.

3.Определить цену деления вольтметра. Измерить вольтметром значения Э.Д.С.(*E*) и падений напряжения (*U*) на всех участках и записать их в таблицу 1 результатов наблюдений. Пользуясь обозначением полярности клемм на вольтметре, определить направления токов на всех участках цепи и показать их стрелками на схеме (направление тока принято брать от положительного полюса вольтметра к отрицательному).

4.Вычислить абсолютные погрешности измеренных значений напряжений и Э.Д.С. по классу точности прибора ε и пределу его измерения $U_{пред}$.

$$\Delta U(\Delta E) = <\varepsilon> \cdot U_{пред} \qquad /3/$$

и относительные погрешности $$\varepsilon_u = \frac{\Delta U}{U}. \qquad /4/$$

5.Используя закон Ома, рассчитать значения сил токов на каждом участке цепи. Вычислить относительные погрешности измерения токов по формуле

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_u^2 + \varepsilon_R^2} \qquad /5/$$

и абсолютные погрешности измерения токов по формуле $\Delta I = \varepsilon_I I$. /6/

Данные занести в таблицу 1 результатов наблюдений.

Таблица 1 результатов наблюдений

Участок Величина	1	2	3
E, В			
ΔE, В			
R, Ом			
$\varepsilon_R = \Delta R/R$			
U, В			
ΔU, В			
$\varepsilon_U = \Delta U/U$			
I, 10^{-3} А			
ΔI, 10^{-3} А			
$\varepsilon_I = \Delta I/I$			

6.Для узлов и контуров, заданных преподавателем, проверить справедливость правил Кирхгофа. При этом левые и правые части уравнений, выражающих правила Кирхгофа, должны отличаться на величину, не превышающую погрешности каждой из этих сумм:

$$\left|\sum_k I_k\right| \le \Delta\left(\sum_k I_k\right) \qquad /7/$$

$$\left|\sum_k U_k - \sum_n E_n\right| \le \Delta\left(\sum_k U_k - \sum_n E_n\right) \qquad /8/$$

Погрешности сумм определяются выражениями

$$\Delta\left(\sum_k I_k\right) = \sqrt{(\Delta I_1)^2 + (\Delta I_2)^2 + \ldots\ldots + (\Delta I_k)^2} \qquad /9/$$

$$\Delta\left(\sum_k U_k - \sum_n E_n\right) = \sqrt{(\Delta U_1)^2 + \ldots + (\Delta U_k)^2 + (\Delta E_1)^2 + \ldots + (\Delta E_n)^2}\,. \qquad /10/$$

Таблица 2. Результаты проверки первого правила Кирхгофа

Узел	$\lvert\Sigma I_k\rvert$	$\Delta(\Sigma I_k)$

Таблица 3. Результаты проверки второго правила Кирхгофа

Контур	$\lvert\Sigma U_k\rvert$	$\lvert\Sigma E_n\rvert$	$\lvert\Sigma U_k\rvert - \lvert\Sigma E_n\rvert$	$\Delta(\lvert\Sigma U_k\rvert - \lvert\Sigma E_n\rvert)$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сила тока? В каких единицах она измеряется?
2. Что такое электродвижущая сила источника тока? В каких единицах она измеряется?
3. Что такое падение напряжения? В каких единицах оно измеряется?
4. Сформулируйте 1 правило Кирхгофа и запишите его математическое выражение. Из какого закона вытекает это правило?
5. Сформулируйте 2 правило Кирхгофа и запишите его математическое выражение. Из какого закона вытекает это правило?
6. Как определяется направление тока на участке цепи с помощью вольтметра?
7. Сформулируйте правила определения знаков токов, падений напряжений и Э.Д.С. источников в 1 и 2 правилах Кирхгофа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §101.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - § 36.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике.// Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §III.8.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 44.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Цель работы: измерить сопротивление катушки мостом постоянного тока и определить удельное сопротивление материала проводника.

Приборы и принадлежности: измерительный мост постоянного тока, катушка (обмотка реостата), штангенциркуль, линейка, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Сопротивление однородного проводника постоянного поперечного сечения можно определить по формуле $$R = \rho \frac{l}{S}, \qquad /1/$$

где ρ - удельное сопротивление материала проводника, l - длина проводника, S – площадь поперечного сечения проводника. Измерив сопротивление, длину и площадь поперечного сечения проводника, можно рассчитать его удельное сопротивление $$\rho = \frac{RS}{l}. \qquad /2/$$

Сопротивление в данной работе определяется с помощью моста постоянного тока. Мост постоянного тока предназначен для измерения сопротивления методом сравнения. Схема простейшего моста изображена на рис.44.1. Он состоит из четырех сопротивлений, образующих замкнутый четырехугольник: R – искомое сопротивление; R^* - магазин сопротивлений, с помощью которого можно набирать различные значения сопротивления в широком диапазоне; R_1 и R_2 - известные сопротивления. В одну диагональ моста (AC) включен источник тока, в другую (BD) - чувствительный гальванометр Г. Если замкнуты ключи K_1 и K_2, то по параллельным ветвям ABC, ADC и в цепи гальванометра пойдут токи, показанные на рисунке. Падения напряжения на всех четырех сопротивлениях определяются из за кона Ома

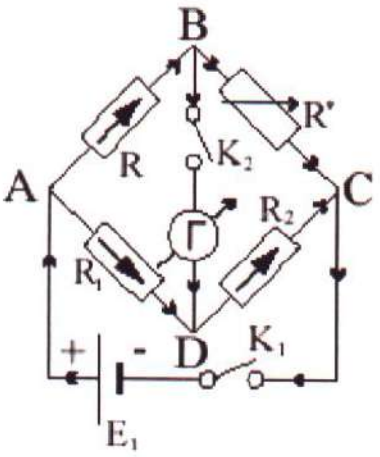


Рис.44.1

$$U = \varphi_B - \varphi_A = IR; \quad U^* = \varphi_C - \varphi_B = I^* R^*;$$
$$U_1 = \varphi_D - \varphi_A = I_1 R_1; \quad U_2 = \varphi_C - \varphi_D = I_2 R_2. \qquad /3/$$

Подбирая соответствующим образом сопротивления, можно добиться, чтобы падения напряжения на участках AB и AD, BC и DC были одинаковы

$$I_1 R_1 = IR \quad \text{и} \quad I^* R^* = I_2 R_2. \qquad /4/$$

В этом случае потенциалы точек B и D будут одинаковы ($\varphi_B = \varphi_D$) и ток в цепи гальванометра $I_г$ будет равен 0. Отсюда по первому правилу Кирхгофа

$$I = I^*, \quad I_1 = I_2. \qquad /5/$$

Такое состояние моста называется уравновешенным. Из равенств (4) и (5) следует $$\frac{R}{R^*} = \frac{R_1}{R_2}. \qquad /6/$$

Зная величины сопротивлений R^*, R_1, R_2 можно определить неизвестное сопротивление $R = \frac{R_1}{R_2} \cdot R^*$. /7/

Равновесия моста можно добиться, изменяя R^*, а также R_1 и R_2. Обычно задаются не значения сопротивлений R_1 и R_2, а их отношение

$$n = \frac{R_1}{R_2}. \qquad /8/$$

Тогда $R = n \cdot R^*$. /9/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью моста постоянного тока измерить сопротивление R реостата. Измерения производить согласно инструкции, данной на рабочем месте.
2. Измерить внешний диаметр витка D штангенциркулем и длину намотки реостата L линейкой.
3. Подсчитать число витков N. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
4. Определить диаметр проволоки по формуле $d = \frac{L}{N}$ /10/
5. Определить средний диаметр витка $D_{ср} = D - d$. /11/
6. Площадь поперечного сечения провода равна $S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi L^2}{4N^2}$. /12/
7. Длина проволоки равна $l = \pi D_{ср} N$. /13/
8. Определить удельное сопротивление проводника, из которого изготовлен реостат по формуле $\rho = \frac{RL^2}{4D_{ср}N^3}$ /14/
9. Формулу относительной погрешности $\varepsilon_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho}$ можно вывести из выражения /15/. При выводе формулы относительной погрешности воспользуемся соотношением

$$\varepsilon_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{\partial(\ln\rho)}{\partial R}\Delta R\right]^2 + \left[\frac{\partial(\ln\rho)}{\partial L}\Delta L\right]^2 + \left[\frac{\partial(\ln\rho)}{\partial D}\Delta D\right]^2 + \left[\frac{\partial(\ln\rho)}{\partial N}\Delta N\right]^2}, \qquad /15/$$

откуда

$$\varepsilon_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{1}{R}\Delta R\right]^2 + \left[\frac{2}{L}\Delta L\right]^2 + \left[\frac{1}{D}\Delta D\right]^2 + \left[\frac{3}{N}\Delta N\right]^2}. \qquad /16/$$

10. Рассчитать относительную погрешность измерения удельного сопротивления по формуле /16/ и абсолютную погрешность измерения удельного сопротивления по формуле $\Delta\rho = \rho\varepsilon_\rho$. При вычислении относительной погрешности измерения удельного сопротивления принять:

$\frac{\Delta R}{R}$ = 0,005= ± 0,5 % (величина определяется по классу точности прибора);

$\Delta L = К_\alpha \frac{\delta}{3}$ - (абсолютная погрешность измерения линейкой $\delta = \pm 0{,}5$мм);

$\Delta D_{ср} = \Delta D = K_\alpha \frac{\delta}{3}$ - (абсолютная погрешность измерения штангенциркулем $\delta = \pm 0{,}05$ мм);

$К_\alpha = 2$ - коэффициент Гаусса при надежности $\alpha = 0{,}95$;

$\Delta N = \pm 1$ виток.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

R, Ом	$\frac{\Delta R}{R}$	L, м	ΔL, м	$\frac{\Delta L}{L}$	D, 10^{-2}м	ΔD, 10^{-2}м	$\frac{\Delta D}{D}$	N	ΔN	$\frac{\Delta N}{N}$	D_{CP}, 10^{-2}м

Записать результат в виде $\rho = \rho_{ср} \pm \Delta\rho$; ε_ρ=.....%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сопротивление проводника? В каких единицах оно измеряется?
2. От чего зависит сопротивление проводника?
3. Запишите формулу для вычисления сопротивления однородного проводника постоянного сечения.
4. Что такое удельное сопротивление материала? В каких единицах оно измеряется?
5. Запишите (выведите) формулу для вычисления сопротивления проводников при их последовательном и параллельном соединении.
6. Изобразите схему моста Уитстона. Для какой цели в нее включен гальванометр?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §98,101.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - §34.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике.// Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §III.8.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 47
ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КОНТАКТА ПОЛУПРОВОДНИКОВ p- и n- ТИПА

Цель работы: ознакомиться с особенностями проводимости p-n перехода и снять вольт - амперную характеристику полупроводникового диода.

Приборы и принадлежности: набор полупроводниковых диодов различных типов, многопредельный миллиамперметр постоянного тока, панель с добавочными сопротивлениями, вольтметр постоянного тока, реостат, коммутирующий ключ (переключатель), источник постоянного тока.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Контакт примесных полупроводников p- и n- типа называется p-n переходом. При контакте электронного (n-типа) и дырочного (p-типа) полупроводников через поверхность соприкосновения происходит диффузия основных носителей тока - электронов из n- полупроводника в p-, а дырок из p- в n-. В результате диффузии в пограничном слое возникает двойной заряженный слой рис.47.1. Напряженность электрического поля, возникающего в зоне контакта, направлена от n – области, заряженной положительно, к p- области, заряженной отрицательно. Это поле препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок. При некоторой напряженности $\overline{E'}$ этого поля установится динамическое равновесие носителей тока.

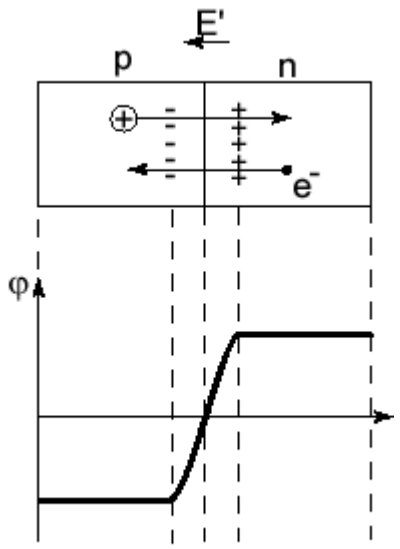


Рис.47.1

Пограничный слой вследствие рекомбинации дырок и электронов обеднен носителями тока и обладает высоким сопротивлением. Этот слой называется запирающим.

Через пограничный слой от p- к n-полупроводнику течет ток основных носителей, а в обратном направлении – ток неосновных носителей. Основными носителями в n-полупроводнике являются свободные электроны, а в p-полупроводнике – дырки. Неосновными носителями в n-полупроводнике являются дырки, в p-полупроводнике – свободные электроны. В отсутствии внешнего поля суммарный ток равен нулю.

Если к p-n переходу приложить внешнее электрическое поле $\overline{E}$ направления, противоположного направлению поля двойного слоя (такое поле называют прямым), подключив к p- полупроводнику «+», а к n-полупроводнику «-» источника тока, то внешнее поле ослабит внутреннее, и высота потенциального барьера уменьшится. Ток основных носителей, текущий через контакт, увеличится, а ток неосновных носителей не изменится. При одном и том же напряжении ток основных носителей во много раз превышает ток неосновных носителей, так как концентрация основных носителей во много раз

превышает концентрацию неосновных. Возникнет суммарный ток, называемый прямым током, как показано на рис.47.2.

Если к p-n переходу приложить внешнее электрическое поле $\overline{E}$ того же направления, что и поле запирающего слоя (такое поле называют обратным), подключив к p- полупроводнику «-», а к n-полупроводнику «+» источника тока, то внешнее поле усилит внутреннее, и высота потенциального барьера возрастет. Это приводит к уменьшению тока основных носителей, а ток неосновных носителей не изменится. Возникнет суммарный ток, называемый обратным, как показано на рис.47.2.

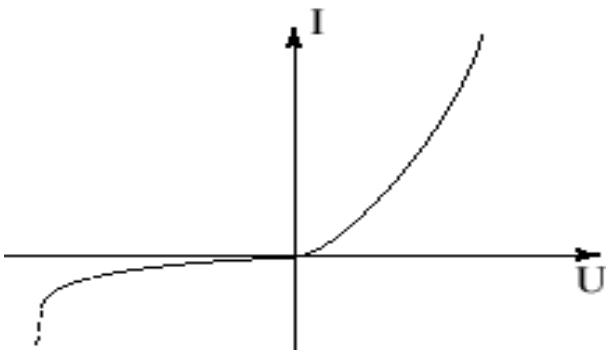


Рис.47.2

Сила прямого и обратного тока через переход зависит от величины приложенного напряжения. Типичная вольт-амперная характеристика p-n-перехода приведена на рис.47.2. Из графика видно, что p-n переход обладает выпрямляющим действием, пропуская ток преимущественно в одном направлении. Полупроводниковые диоды широко применяются в качестве выпрямителей переменного тока.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать схему по рис.47.3а.

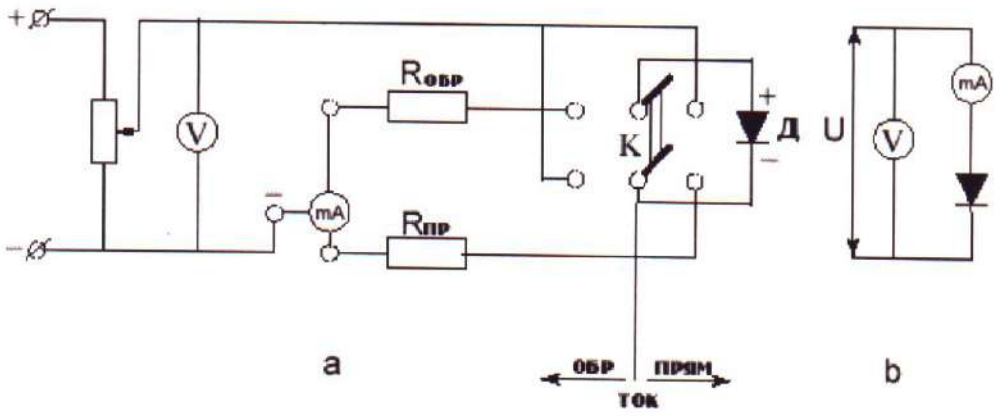


Рис.47.3

На схеме обозначены: R – реостат; V – вольтметр; mA – миллиамперметр; $R_{обр}$, $R_{пр}$ - добавочные резисторы, включаемые для того, чтобы сопротивление миллиамперметра на обоих пределах было равным 1 кОм; К - переключатель для изменения знака напряжения на диоде (стрелками показано его положение для измерения прямого и обратного тока); Д - диод, исследуемый в работе.

2.После проверки схемы преподавателем подключить ее к источнику питания. Постепенно увеличивая ток от нуля (значения тока согласовать с преподавателем), записывать показания миллиамперметра и вольтметра. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

U ,В	1	2	3	4	5	6		и т.д.
I, мА								
$U_Д$, В								

Последняя строка таблицы – напряжение, приложенное к диоду - $U_д$, получается вычитанием силы тока в миллиамперах из соответствующего напряжения на вольтметре, выраженного в вольтах. Возможность таких вычислений определяется тем, что сопротивление амперметра за счет подключения добавочного резистора делается равным R_A = 1 кОм. Из рис.47.3-б следует: $U = U_Д + IR_A$, откуда $U_Д = U - IR_A$. /1/

3.Изменив коммутационным ключом К полярность напряжения на диоде, повторить измерения по п.2 для обратной ветви вольт-амперной характеристики.

4.Повторить п.п. 2 и 3, заменив диод на другой.

5.Результаты измерений изобразить графически, откладывая по оси абсцисс напряжение на диоде - $U_д$, а по оси ординат - ток через диод. Прямой ток и прямое напряжение откладывать в положительном направлении осей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие типы проводимости существуют в полупроводниках?
2. Какие процессы протекают при контакте p- и n -полупроводников? К чему они приводят?
3. Каков принцип действия полупроводникового диода?
4. Изобразите вольт-амперную характеристику диода, объясните ее вид.
5. Пойдет ли ток через контакт полупроводников в направлении p-n, n-p?
6. Каков механизм возникновения разности потенциалов при контакте p- и n-полупроводников?
7. От чего зависит ток через p-n переход?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §240-243,248.

2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - §53,57-59,64.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §V11.2.8-10.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 51
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: ознакомиться с одним из методов определения напряженности магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник постоянной ЭДС, переключатель.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Земля представляет собой огромный магнит, полюса которого лежат вблизи географических полюсов. Величину проекции напряженности земного магнитного поля Н на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_s. Направление этой составляющей принимается за направление магнитного меридиана в данной точке, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется плоскостью магнитного меридиана . Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь около вертикальной оси, будет отклонятся в горизонтальной плоскости тольтолько под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

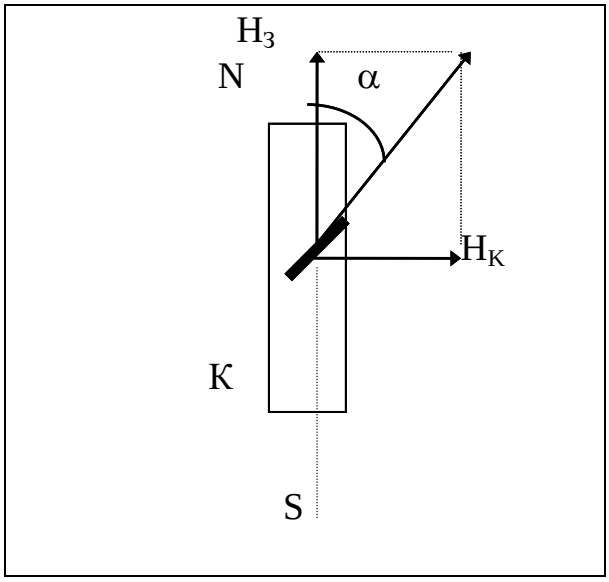


Рис.51.1

Эти свойства магнитной стрелки используются в тангенс-гальванометре для определения H_s. Тангенс-гальванометр (рис.51.1) представляет собой плоскую вертикальную катушку К. В центре катушки в горизонтальной плоскости расположена магнитная стрелка. При отсутствии тока в катушке магнитная стрелка установится вдоль магнитного меридиана Земли N-S. Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если после такой установки катушки по ней пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол α. Объясняется это тем, что на магнитную стрелку будут действовать два поля: горизонтальная составляющая напряженности поля Земли H_s и поле, созданное током ка-

тушки с напряженностью $H_к$. Под действием этих полей магнитная стрелка займет такое положение равновесия, при котором равнодействующая двух полей будет совпадать с линией, соединяющей
полюса стрелки. На рис.51.1 NS – направление магнитного меридиана Земли, вдоль которого устанавливается первоначально магнитная стрелка, помещенная в центре катушки. Магнитное поле, создаваемое катушкой с током в ее центре (вектор $H_к$) направлено перпендикулярно к плоскости витков вдоль оси катушки. Из рис.51.1 видно, что $tg\alpha = {H_К}/{H_3}$. Следовательно

$$H_3 = {H_К}/{tg\alpha}. \qquad /1/$$

Величина напряженности поля $H_к$, созданного током в центре витка, вычисленная по закону Био-Савара-Лапласа для случая кругового тока, равна:

$$H_К = \frac{I}{2r}, \qquad /2/$$

где I - ток, текущий в катушке, r - радиус витка катушки.
Напряженность магнитного поля в катушке с числом витков N вычисляется по формуле /2/ с учетом числа витков. Подставляя значение $H_к$ в формулу /1/, получим:

$$H_3 = \frac{IN}{2rtg\alpha}. \qquad /3/$$

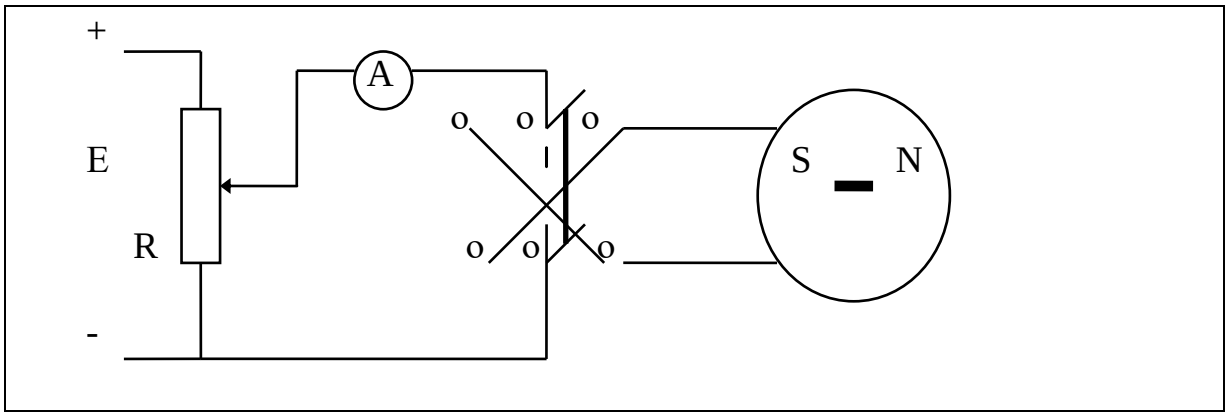


Рис.51.2

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис.51.2 и представить её на проверку преподавателю.
2.Поворачивая тангенс-гальванометр, установить плоскость катушки в плоскости магнитного меридиана. В этом случае стрелка гальванометра должна ориентироваться на угол 90^o либо 270^o.
3.При помощи движка реостата установить заданное значение тока и измерить значение угла α_1 положения стрелки гальванометра с точностью до половины углового градуса.
4.При помощи переключателя К изменить направление тока в катушке. Определить угол отклонения α_2 при той же величине тока. Величину тока и величины углов α_1 и α_2 занести в таблицу результатов наблюдений.

5.Повторить опыт по п.п.2,3 5-6 раз при различных значениях тока. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

6.Вычислить значения $\alpha_1+\alpha_2$. В случае существенного (на величину более 2 угловых градусов) отличия какого-либо значения такой суммы от остальных, проверить соответствующие величины α_1 и α_2.

7.Построить график зависимости $tg\alpha=f(I)$. Убедиться в том, что $tg\alpha$ зависит от тока прямо пропорционально.

8.Вычислить величины H_3 по формуле /3/ для каждого значения тока. Найти среднее значение $H_{3\,CP}$.

9.Рассчитать средние абсолютную и относительную погрешности измерения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», по формуле $\Delta H_3 = t(\alpha, n)\sqrt{\frac{\sum \Delta H_i^2}{n(n-1)}}$.

Значение надежности выбрать $\alpha=0.95$ или по заданию преподавателя.

$\alpha=$, $t_{\alpha,n}=$. Результаты записать в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

n_i	I, A	α_1	α_2	$\alpha_1+\alpha_2$	$\alpha = \frlac{\lvert\alpha_1-\alpha_2\rvert}{2}$	tgα	H_i, А/м	ΔH_i, А/м	ΔH_i^2, $А^2/м^2$

10.Окончательный результат записать в виде

$$H_3 = H_{CP} \pm \Delta H_3 \text{ А/м;} \qquad \varepsilon_N = \frac{\Delta H}{H_3}100\% .$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа и запишите его формулу. Как определяется направление вектора индукции магнитного поля? В каких единицах измеряется индукция магнитного поля в системе СИ?
2. Запишите формулу связи индукции и напряженности магнитного поля. В каких единицах измеряется напряженность магнитного поля в системе СИ?
3. Запишите формулы для вычисления индукции кругового тока, отрезка прямого тока, соленоида.
4. Сформулируйте принцип суперпозиции для индукции магнитного поля.
5. Дайте определение линиям индукции магнитного поля. Сформулируйте правило определения направления линий индукции магнитного поля. Нарисуйте линии индукции магнитного поля кругового тока, отрезка прямого тока, соленоида.

ЛИТЕРАТУРА

1.Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§109,110.
2.Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, -§40,42.
3.Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §III.10.1, III.10.2, III.10.3.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Леонтьева Н.Г. - Зерноград, АЧГАА, - 2002. - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 53

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: исследование зависимости индукции магнитного поля в ферромагнетике от величины намагничивающего поля B=f(H) и зависимости магнитной проницаемости от величины намагничивающего поля μ=f(H)

Приборы и принадлежности: тороидальный трансформатор с сердечником (тороид), электронный осциллограф, амперметр, реостат, интегрирующая RC-цепочка, регулируемый источник переменной ЭДС.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Все вещества обладают магнитными свойствами, т.е. являются магнетиками. При внесении веществ в магнитное поле, происходит их намагничивание. Намагниченный магнетик создает собственное магнитное поле, которое складывается с внешним намагничивающим полем. Вектор магнитной индукции $\overline{B}$ равен сумме векторов магнитной индукции внешнего поля $\overline{B}_0$ и собственного поля магнетика $\overline{B}'$ $\overline{B} = \overline{B}_0 + \overline{B}'$ /1/

Индукция магнитного поля в магнетике связанна с напряженностью намагничивающего поля $\overline{H}$ соотношением $\overline{B} = \mu\mu_0\overline{H}$ /2/

где μ - относительная проницаемость вещества: $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$Г/м - магнитная постоянная (в системе СИ).

По магнитным свойствам вещества делятся на:

1.ПАРАМАГНЕТИКИ, намагничивающиеся по направлению внешнего поля, для них магнитная проницаемость немного больше единицы (μ>1)

2.ДИАМАГНЕТИКИ, намагничивающиеся против внешнего магнитного поля для них магнитная проницаемость немного меньше единицы (μ<1).

3.ФЕРРОМАГНЕТИКИ, которые, как и парамагнетики, намагничиваются по направлению внешнего магнитного поля, но магнитная проницаемость намного больше единицы (μ>>1). Кроме того, магнитная проницаемость ферромагнетиков не является постоянной величиной, а зависит от напряженности внешнего намагничивающего поля H. С увеличением напряженности внешнего намагничивающего поля магнитная проницаемость сначала быстро

возрастает, достигая максимума, причем достигаются значения $\mu>>1$, а затем уменьшается, приближаясь к значению $\mu=1$ при очень сильных полях (рис.53.1).

Поэтому зависимость индукции магнитного поля B от напряженности H не является линейной, как для пара- и диамагнетиков, а носит более сложный характер (рис.53.2). С увеличением напряженности внешнего магнитного

поля H индукция поля в ферромагнетике B сначала резко возрастает и достигает значительной величины при сравнительно небольшой величине напряженности внешнего магнитного поля H, а затем изменяется медленно, возрастая пропорционально H, кривая (а) на рис.53.2, называемая основной кривой намагничивания. Это соответствует состоянию насыщения ферромагнетика (при $\mu\to1$). При насыщении индукция собственного поля ферромагнетика B' перестает расти, и величина суммарной индукции поля B увеличивается только за счет возрастания индукции внешнего поля B_0, которая пропорциональна H. Если затем в ферромагнетике, намагниченном до насыщения уменьшать напряженность внешнего поля H, то индукция поля внутри ферромагнетика B тоже начнет уменьшаться. Однако при полном исчезновении внешнего поля (H=0) ферромагнетик не размагничивается полностью, в нем сохраняется остаточная индукция $B_{ост}$. Для полного размагничивания ферромагнетика нужно создать магнитное поле противоположного направления напряженностью $H_к$; эта напряженность называется коэрцитивной силой. При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик начнет перемагничиваться, и при $H=H_{max}$ намагнитится до насыщения в противоположном направлении. Затем намагничивая ферромагнетик в прямом направлении можно вновь достигнуть $B=B_{max}$. Такое явление отставания изменения магнитной индукции от изменения напряженности намагничивающего поля называется магнитным гистерезисом, а замкнутая кривая (б) на рис.53.2 - петлей гистерезиса.



Рис.53.1.

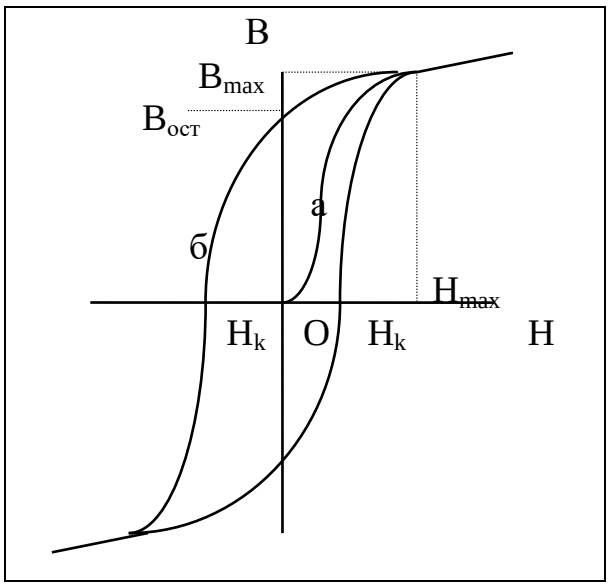


Рис.53.2

Целью данной работы является получение зависимости B=f(H) и μ=f(H) для ферромагнетика. В качестве исследуемого образца используется железный сердечник тороидальной формы. На тороиде имеется две обмотки: ос-

новная (первичная) и вспомогательная (вторичная). Через первичную обмотку тороида пропускается переменный ток. В сердечнике возникает переменное магнитное поле, перемагничивающее образец 50 раз в секунду - в соответствии с частотой переменного тока. При этом напряженность поля периодически изменяется от H_{max} до $-H_{max}$. Максимальная величина напряженности поля связана с амплитудным значением силы переменного тока I_m соотношением

$$H_{\max} = n_1 I_m = \frac{N_1}{l_{CP}} I_m , \qquad /3/$$

где N_1-число витков первичной обмотки; l_{cp} - длина тороида, измеренная по его средней линии.

В соответствии с изменениями напряженности внешнего поля H в сердечнике периодически изменяется и индукция магнитного поля B, зависящая от H. Графически эта зависимость изображается петлей гистерезиса. Для наблюдения петли гистерезиса на экране электронного осциллографа используется схема, приведенная на рис.53.3.

Первичная обмотка тороида питается от источника регулируемого переменного напряжения. С резистора R_1, включенного последовательно в первичную цепь, на пластины электронного осциллографа, отклоняющие электронный луч в горизонтальном направлении (вход «X»), подается напряжение

$$U_m = I_1 R_1 . \qquad /4/$$

Это напряжение пропорционально напряженности магнитного поля

$$U_m = \frac{R_1 l_{cp}}{N_1} H . \qquad /5/$$

Следовательно, величина отклонения электронного луча от оси «X» пропорциональна напряженности магнитного поля.

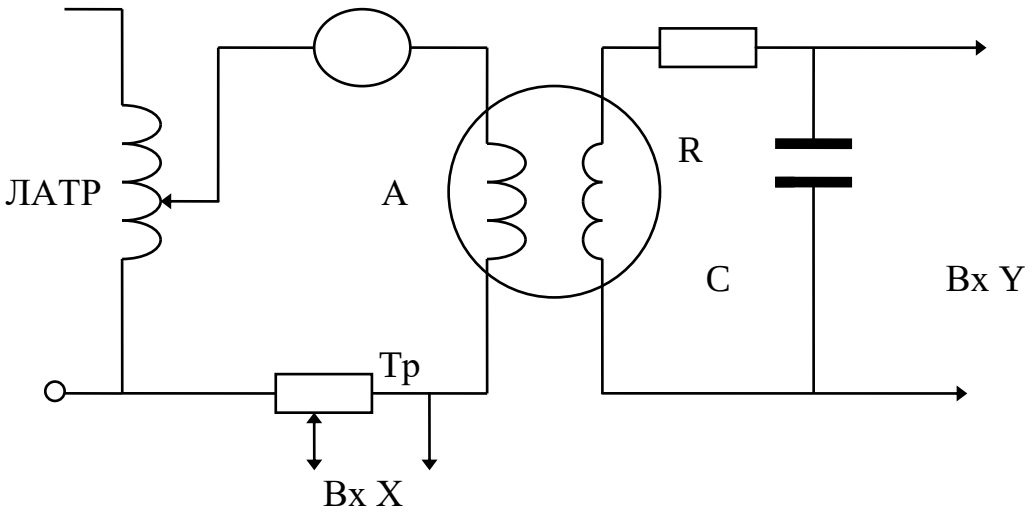


Рис.53.3

Во вторичной обмотке, вследствие изменения магнитного поля, наводится ЭДС индукции, прямо пропорциональная скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки обмотки

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{d\Phi}{dt}, \qquad /6/$$

где N_2 - число витков во вторичной обмотке; $\Phi = BS$ - поток магнитной индукции в сердечнике; S - площадь поперечного сечения сердечника.

Для получения петли гистерезиса на экране осциллографа на вертикально отклоняющие пластины (вход «Y») необходимо подать не напряжение $U_2 \approx \varepsilon_i$, пропорциональное $\frac{dB}{dt}$, а напряжение, пропорциональное индукции B. Для этого во вторичной цепи применена интегрирующая RC-цепочка. На вход цепочки со вторичной обмотки подается ЭДС индукции, которая равна сумме падений напряжения на резисторе - U_R и конденсаторе U_c

$$|\varepsilon_i| = U_R + U_c$$

или $$N_2 S \frac{dB}{dt} = R \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C} Q, \qquad /7/$$

где $I = \frac{dQ}{dt}$ - сила тока во вторичной цепи. Значения сопротивления R и емкости C подбираются таким образом, чтобы $U_R >> U_c$. Тогда

$$N_2 S \frac{dB}{dt} = R \frac{dQ}{dt}. \qquad /8/$$

При изменении индукции поля на величину dB заряд конденсатора изменяется на dQ, причем $$dQ = \frac{N_2 S}{R} dB. \qquad /9/$$

Полный заряд конденсатора в любой момент времени можно найти путем интегрирования $$Q = \frac{N_2 S}{R} \int dB = \frac{N_2 S}{R} B. \qquad /10/$$

Отсюда вытекает, что напряжение на обкладках конденсатора, подаваемое на вход «У» осциллографа, равно $$U_y = \frac{Q}{C} = \frac{N_2 S}{RC} B. \qquad /11/$$

Следовательно, отклонение электронного луча по оси «У» пропорционально индукции магнитного поля B. Поэтому фигура, описываемая электронным лучом на экране осциллографа, выражает зависимость B=f(H), т.е. является петлей магнитного гистерезиса. Если изменять величину амплитуды тока намагничивания в первичной обмотке, то изменяются значения H_{max} и B_{max}, т.е. размеры и форма петли гистерезиса. При этом концы петли лежат на основной кривой намагничивания. Иными словами, основная кривая намагничивания является геометрическим местом крайних точек петли, образуемой при различных значениях тока в первичной обмотке. Поэтому, измеряя координаты X и У концов петли при различных значениях намагничивающего тока, можно получить основную кривую намагничивания, выражающую зависимость B=f(H). Зная величины B и H для основной кривой намагничивания, можно получить относительную магнитную проницаемость для каждого значения напряженности внешнего поля H $$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \qquad /12/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать электрическую цепь по схеме, рис.53.3.

2.Включить осциллограф. После того как на экране появится светящаяся точка, вывести ее ручками «ось Х» и «ось У» в центр экрана.

3.Установить в первичной обмотке тороида максимально возможный ток и ручками «усиление» по осям Х и У добиться, чтобы изображение петли гистерезиса заняло большую часть экрана.

ПРИМЕЧАНИЕ. Если петля повернута в обратную сторону, поменять местами провода на клеммах «вход У».

4.Зарисовать в тетради изображение петли гистерезиса.

5.Вывести на ноль регулятор усиления по оси Х. При этом на экране получится вертикальная линия, длина которой У пропорциональна индукции В. Изменяя величину тока в первичной цепи от 0 до максимального значения через каждые 0.05 А, измерить длину этой линии Y. Значения силы тока и длины линии занести в таблицу результатов наблюдений. По результатам измерений построить график зависимости Y=f(I), который аналогичен графику B=f(H).

ПРИМЕЧАНИЕ. С помощью амперметра измеряется действующее I, а не максимальное значение силы переменного тока. Однако поскольку они находятся в пропорциональной зависимости $\left(I = {I_m}\big/{\sqrt{2}}\right)$, то величина напряженности Н прямо пропорциональна эффективному значению тока..

6.Определить величину $\mu' = \frac{Y}{I}$, которая пропорциональна магнитной проницаемости $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$.

Построить график зависимости $\mu' = f(I)$, которая аналогична зависимости $\mu = f(H)$.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Сила тока [А]										
Ордината линии Y [В]										
μ’										

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение напряженности и индукции магнитного поля. В каких единицах они измеряются? Как они связаны между собой?
2. Что такое ферромагнетики? Какими свойствами они обладают?
3. Что такое домены? Как их можно наблюдать? Какую форму они имеют?
4. Почему возникают домены? Когда прекращается процесс разбиения на домены ?
5. Нарисуйте основную кривую намагничивания ферромагнетиков.
6. Нарисуйте петлю гистерезиса. Что такое коэрцитивная сила и остаточная намагниченность?

ЛИТЕРАТУРА
1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§135,136.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §59;
3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §III.13.5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 56
ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ДОБРОТНОСТИ

Цель работы: получить резонансную кривую колебательного контура и по ширине полосы пропускания рассчитать его добротность и коэффициент затухания.

Приборы и принадлежности: генератор незатухающих колебаний, колебательный контур с микроамперметром, источник питания генератора, соединительные повода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Рассмотрим процессы, происходящие в колебательном контуре, состоящем из конденсатора C, катушки индуктивности L и активного сопротивления R (рис.56.1).

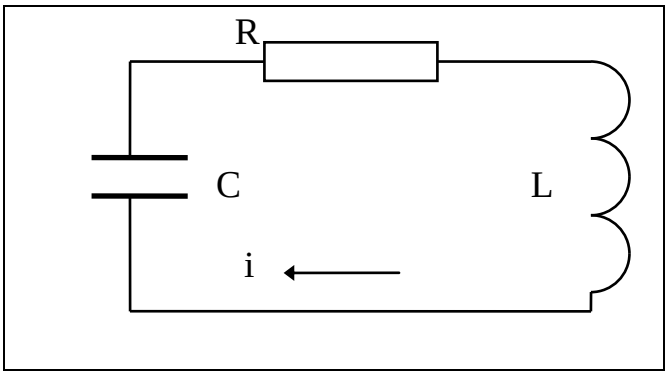


Рис.56.1

Если на обкладках конденсатора имеется заряд q, по цепи идет ток разряда $i = \frac{dq}{dt}$, а в катушке наводится ЭДС самоиндукции $\varepsilon_s = L\frac{di}{dt}$. В любой момент времени на основании закона Ома для неоднородного участка цепи справедливо уравнение динамики затухающих колебаний

$$-L\frac{di}{dt} = Ri + \frac{q}{C}. \qquad /1/$$

Поскольку сила тока по определению равна $i = {dq}/{dt}$, то из /1/ получим дифференциальное уравнение затухающих колебаний

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\cdot\frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}\cdot q = 0. \qquad /2/$$

Здесь q - заряд на конденсаторе. Решение этого обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид

$$q = q_0 e^{-\beta t}\cos\omega t. \qquad /3/$$

Уравнение /3/ называется уравнением кинематики затухающих колебаний. Здесь $q_m = q_0 e^{-\beta t}$ - амплитуда затухающих колебаний; $\beta = \frac{R}{2L}$ - коэффициент затухания, измеряемый в $с^{-1}$. Он равен величине обратной времени, в течение которого амплитуда уменьшается в e раз, где e=2,7183 – основание натуральных логарифмов. Можно показать, что циклическая частота затухающих колебаний ω связана с собственной циклической частотой (циклической частотой собственных гармонических незатухающих колебаний) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и коэффициентом затухания β выражением

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}\ . \qquad /4/$$

График зависимости /3/ показан на рис.56.2.

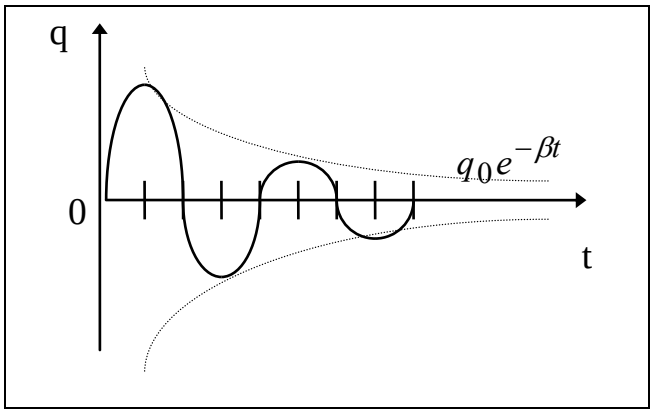


Рис.56.2.

Сила тока в контуре с затуханием равна $I = I_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \varphi_0)$, т.е. опережает заряд по фазе. Добротностью Q называется безразмерная величина, показывающая во сколько раз умноженная на 2π энергия колебаний W больше энергии, потерянной в контуре за период $-\frac{dW}{dt}$. Энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды колебаний

$$W = \frac{Lq_m^2}{2} = \frac{Lq_0^2}{2}\cdot e^{-2\beta t}\ . \qquad /5/$$

Тогда можно показать, что добротность равна

$$Q = \beta T = \frac{\omega}{2\beta} \approx \frac{\omega_0}{2\beta}. \qquad /6/$$

Добротность контура влияет на его избирательность, т.е. на способность контура подавлять сигналы, приходящие на частотах, отличающихся от той, на которую контур настроен. Если в колебательном контуре, рис.56.1 действует переменная ЭДС внешнего источника сигналов $U = U_m \cos\omega t$, то уравнение динамики вынужденных колебаний имеет вид

$$U_m \cos\omega t - L\frac{di}{dt} = Ri + \frac{q}{C}. \qquad /7/$$

По аналогии с /2/ дифференциальное уравнение вынужденных колебаний имеет вид

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\cdot\frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = \frac{U_m}{L}\cos\omega t\ . \qquad /8/$$

Через достаточно большой промежуток времени t собственные колебания контура затухают, и решение этого неоднородного дифференциального уравнения имеет вид

$$q = \frac{U_m}{\omega\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \qquad /9/$$

т.е. заряд меняется с частотой внешней ЭДС. Зависимость силы тока от времени имеет вид

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}). \qquad /10/$$

Зависимость амплитуды тока от циклической частоты переменной ЭДС ω имеет вид

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \qquad /11/$$

и показана на рис.56.3.

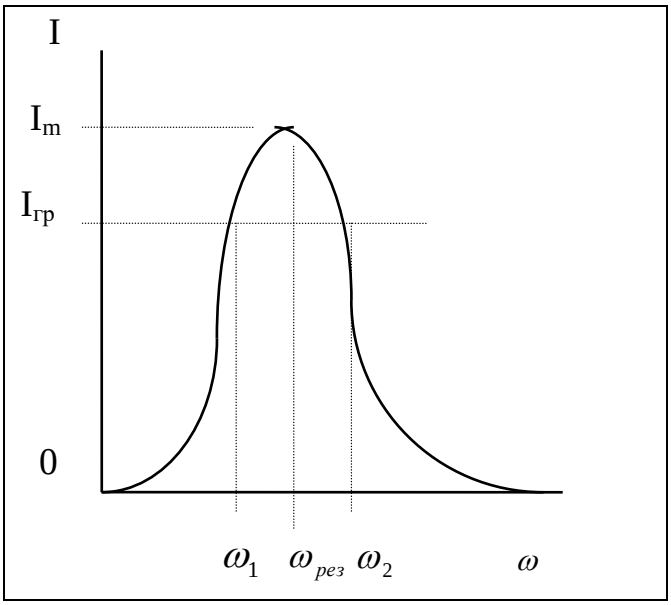


Рис.56.3.

При приближении частоты сигнала к частоте собственных гармонических колебаний контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad /12/$$

амплитуда тока $I_{рез}$ максимальна. Явление резкого возрастания амплитуды колебаний при совпадении частоты внешнего сигнала с частотой собственных колебаний контура называется резонансом. Частота, при которой это происходит, называется резонансной. Она равна

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC + 2(\frac{R}{2L})^2}}. \qquad /13/$$

Амплитуда тока при резонансе равна $I_{рез} = \frac{U_m}{R}.$ /14/

Назовем граничной частоту, на которой энергия колебаний в контуре в 2 раза меньше энергии колебаний на резонансной частоте $W_{гр} = \frac{1}{2} W_{рез}.$

При этом амплитуда тока $I_{гр}$ на граничной частоте равна $I_{гр} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{рез}$

Поскольку энергия в колебательном контуре пропорциональна квадрату тока, получим

$$\left(\frac{I_{\text{р НЬЌ}}}{I_{\text{‹р}}}\right)^2 = \frac{R^2 + \left(\omega_{го} L - \dfrac{1}{\omega_{гр} C}\right)^2}{R^2} = 1 + \left(\frac{\omega_{гр} L}{R} - \frac{1}{\omega_{гр} RC}\right)^2 = 2 . \qquad /15/$$

Здесь $\omega_{\text{‹р}}$ - граничная частота. Корни уравнения /15/ имеют вид

$$\omega_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}} , \qquad \omega_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}} . \qquad /16/$$

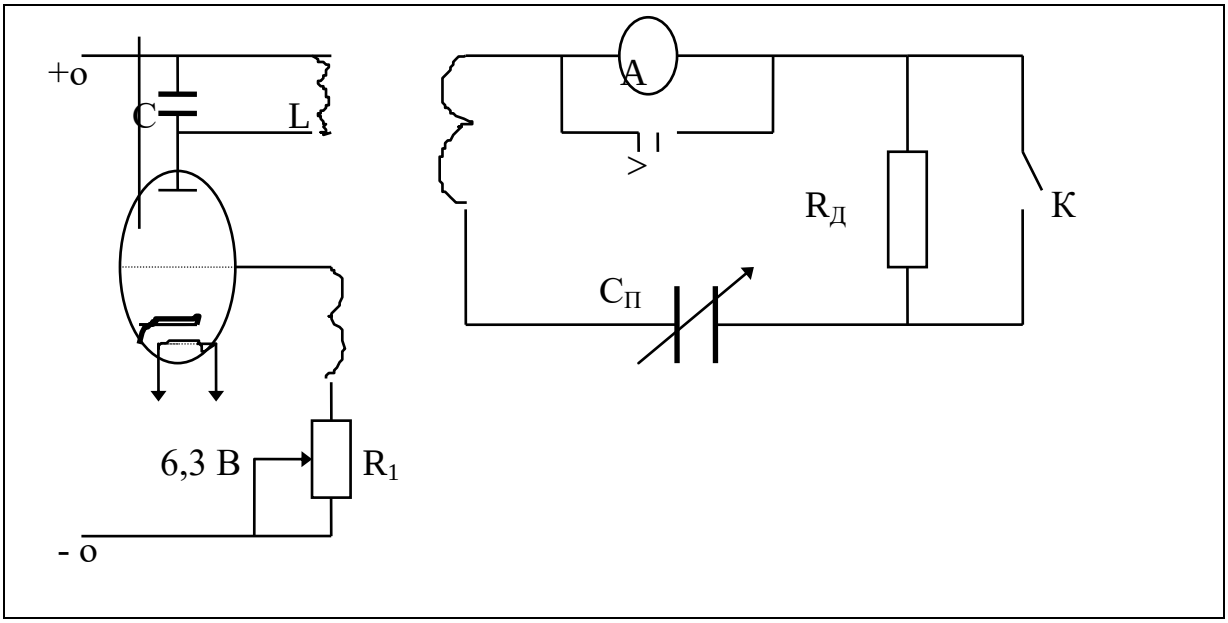
Еще два отрицательных корня отбрасываем, как не имеющие физического смысла. Граничные циклические частоты ω_1 и ω_2 показаны на рис.56.3.

Ширина полосы пропускания контура $\Delta\omega$ - это область циклических частот, на которых энергия ослабляется контуром не больше чем вдвое

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{R}{L} = 2\beta = \frac{\omega_{рез}}{Q} . \qquad /17/$$

Таким образом, чем больше добротность контура, тем уже полоса пропускания, тем лучше отстраивается контур от посторонних сигналов. Колебательные контуры, используемые в радио и телевидении, имеют добротность порядка 10÷200, причем, если Q<10 контур плохой, если Q>100 - хороший.

В работе измеряется добротность и коэффициент затухания контура по ширине полосы пропускания. Установка состоит из генератора колебаний,



«а» Рис.56.4. «б»

(рис.56.4а) и исследуемого контура, в цепь которого включен микроамперметр А, шунтированный высокочастотным диодом (рис.54.4б).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить к генератору источники питания.
2. Расположить исследуемый контур так, чтобы его катушка оказалась на одной оси с катушкой генератора на расстоянии 15-20 см от последнего.

Стрелка ручки управления переменным конденсатором $C_П$ должна стоять примерно на середине шкалы.

3. Вращением ручки переменного резистора R_1 на корпусе генератора добиться возбуждения генератора. Стрелка микроамперметра отклонится от нуля.
4. Изменяя емкость конденсатора, настроить контур в резонанс с генератором, при этом ток в контуре будет максимальным. Перемещением контура относительно генератора добиться отклонения стрелки микроамперметра до значения тока, близкого к максимальному. После этого расположение контура и генератора не изменять.
5. Изменяя емкость контура поворотом ручки подстроечного конденсатора, записать номера 15-20 делений шкалы настройки и соответствующих токов в контуре в таблицу результатов наблюдений 1. Ручку управления подстроечного конденсатора поворачивать на 20 делений вдали от номера деления, соответствующего резонансу, и на 10-5 делений вблизи номера деления, соответствующего резонансу.
6. Повторить п.5, изменив добротность контура подключением добавочного сопротивления $R_Д$ с помощью ключа К. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1.
7. Используя градуировочный график, по номерам деления шкалы настройки определить соответствующие частоты ν, а по ним – циклические частоты, используя соотношение $\omega=2\pi\nu$. По результатам измерений построить резонансные кривые (см. рис.56.3). Определить резонансные частоты $\omega_{рез}$, соответствующие максимальным значениям тока на обоих графиках. На каждом графике на уровне $I_{\text{р}} = {}^{1}\!\!\diagup\!\!_{\sqrt{2}} \cdot I_{\text{р НЬК}}$ провести прямую и на ее пересечении с соответствующей резонансной кривой определить граничные частоты полосы пропускания ω_1 и ω_2 (см. рис.56.3).
8. По формуле /16/ вычислить значения коэффициента затухания контура и добротности для каждого из случаев. Результаты по пп.7,8 занести в таблицу результатов наблюдений 2.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

n	ν, МГц	I_1, мкА	n	ν, МГц	I_2, мкА

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

$\omega_{рез}, 10^6 с^{-1}$	$I_{рез}$, мкА	$I_{гр}$, мкА	$\omega_1, 10^6 с^{-1}$	$\omega_2, 10^6 с^{-1}$	Q	$\beta, 10^6 с^{-1}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите уравнение динамики вынужденных электромагнитных колебаний (закон Ома). Каков физический смысл слагаемых в этом уравнении?
2. Запишите уравнение кинематики (решение уравнения динамики) вынужденных электромагнитных колебаний.
3. Что такое резонанс? При каких условиях он наступает?
4. От каких параметров контура зависит резонансная частота незатухающих колебаний?
5. Нарисуйте график зависимости амплитуды незатухающих колебаний от частоты "вынуждающей силы".
6. Что такое добротность? В каких единицах она измеряется? Как она связана с коэффициентом затухания. От каких параметров схемы она зависит?

ЛИТЕРАТУРА.

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§140, 141, 143, 147, 148.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §88, 89, 90,91;
3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §IV.1.1, IV.1.2, IV.1.3, IV.2.1, IV.2.2, IV.2.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 57
ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: проверить на опыте экспоненциальный характер убывания амплитуды затухающих электромагнитных колебаний, определить логарифмический декремент затухания колебательного контура и его добротность.

Приборы и принадлежности: колебательный контур с генератором возбуждения, электронный осциллограф, источник ЭДС, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

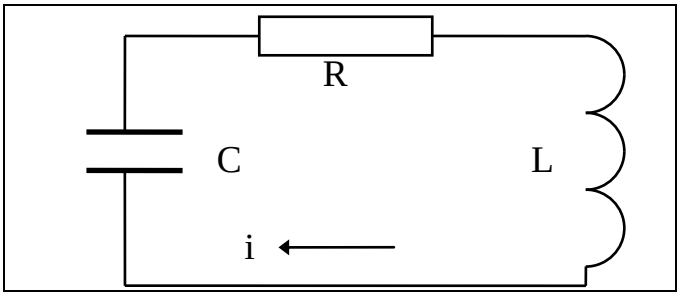


Рис.57.1

Рассмотрим процессы, происходящие в колебательном контуре, состоящем из конденсатора C, катушки индуктивности L и активного сопротивления R (рис.57.1).

Если на обкладках конденсатора имеется заряд q, по цепи идет ток разряда $i = \frac{dq}{dt}$, а в катушке наводится ЭДС самоиндукции $\varepsilon_s = L\frac{di}{dt}$. В любой момент времени на основании закона Ома для неоднородного участка цепи справедливо уравнение динамики затухающих колебаний

$$-L\frac{di}{dt} = Ri + \frac{q}{C}, \qquad /1/$$

где $U_c = \frac{q}{C}$ - напряжение на обкладках конденсатора; $U_R = iR$ - падение напряжения на активном сопротивлении. Поскольку сила тока по определению равна $i = {dq}/{dt}$, то из /1/ получим дифференциальное уравнение затухающих колебаний

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\cdot\frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}\cdot q = 0. \qquad /2/$$

Здесь q - заряд на конденсаторе. Решение этого однородного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид

$$q = q_0 e^{-\beta t}\cos\omega t, \qquad /3/$$

График зависимости /3/ показан на рис.57.2. Уравнение /3/ называется уравнением кинематики затухающих колебаний. Здесь $q_m = q_0 e^{-\beta t}$ - амплитуда затухающих колебаний, $\beta = \frac{R}{2L}$ - коэффициент затухания, измеряемый в $с^{-1}$.

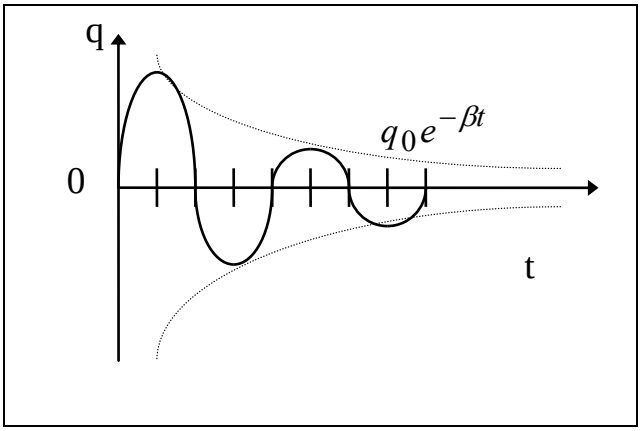


Рис.57.2

Он равен обратной величине времени, в течение которого амплитуда уменьшается в e раз. Можно показать, что циклическая частота затухающих колебаний связана с частотой собственных гармонических незатухающих колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и коэффициентом затухания выражением

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}\ . \qquad /4/$$

Сила тока в контуре с затуханием

равна $I = I_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \varphi_0)$, т.е. опережает заряд по фазе.

Логарифмическим декрементом затухания δ называется натуральный логарифм отношения амплитуд двух следующих друг за другом (через период Т) колебаний

$$\delta = Ln\frac{I_0 e^{-\beta(t+T)}}{I_0 e^{-\beta t}}\ . \qquad /5/$$

Можно показать, что $\delta = \beta T$. /6/

Добротностью Q называется безразмерная величина, показывающая во сколько раз умноженная на 2π энергия колебаний W больше энергии, потерянной в контуре за период $-dW$

$$Q = \frac{2\pi W}{-dW}\ . \qquad /7/$$

Энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды колебаний $W = \frac{Lq_m^2}{2} = \frac{Lq_0^2}{2}\cdot e^{-2\beta t}$. Тогда можно показать, что при малом затухании добротность равна

$$Q = \frac{\pi}{\delta}\ . \qquad /8/$$

Добротность контура не зависит от энергии колебаний и времени. Она, как и логарифмический декремент затухания, является параметром колебательной системы. Выражение /8/ позволяет, зная логарифмический декремент затухания контура, вычислить его добротность.

Лабораторная установка (рис.57.3) представляет колебательный контур, возбуждаемый импульсами от генератора возбуждения ГВ. В контуре воз-

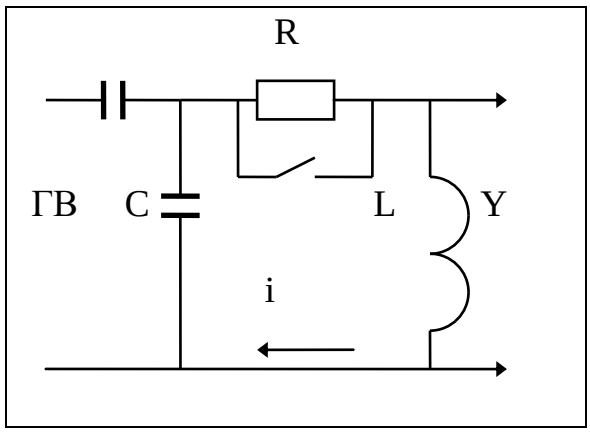


Рис.57.3

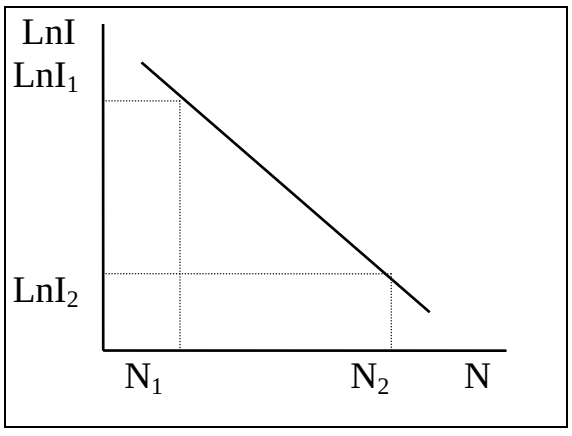


Рис.57.4

никают затухающие колебания, которые подаются на выход «У» электронного осциллографа. На экране осциллографа наблюдается картина, аналогичная представленной на рис.57.2. Амплитуды колебаний *I* можно измерить с помощью осциллографа. Из /5/ следует, что $LnI = LnI_0 - \delta N$, т.е. логарифм амплитуды колебания является линейной функцией номера колебания N,

рис.57.4, и логарифмический декремент затухания может быть найден, как угловой коэффициент этой функции из графика (рис.57.4)

$$\delta = \frac{LnI_1 - LnI_2}{N_2 - N_1}. \qquad /9/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Колебательный контур подключить к входу «У» электронного осциллографа. Осциллограф включить в сеть и дождаться появления изображения в виде горизонтальной линии на экране.

2.Подключить контур (рис.57.3) к выходу сигнала «50 Гц» осциллографа, используемого как генератор возбуждения. При этом на экране возникнет изображение затухающих колебаний. Установить размер максимальной амплитуды колебаний в пределах 4-5 см. Длительность развертки подобрать такую, чтобы изображение стало устойчивым, а его «нулевая» линия совпала с горизонтальной осью шкалы на экране.

3.Перемещая изображение по горизонтали, измерить амплитуды 5-8 колебаний. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 1.

4. Подключить к контуру дополнительное сопротивление $R_Д$=10 Ом и повторить измерения по п.3. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 1.

5.Вычислить логарифмы амплитуд и построить графики LnI=f(N) аналогично изображенному на рис.57.4 (на одном листе миллиметровой бумаги).

6.Расчитать для обоих случаев значения δ по формуле /9/ и Q по формуле /8/. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 2.

7.По изображению затухающих колебаний (аналогичному представленному на рис.54.2), зная масштаб развертки по оси абсцисс на осциллографе, определить количество полных колебаний, приходящихся на определенное расстояние на оси абсцисс на экране. Вычислить значения периодов колебаний T_1 (для случая, когда добавочное сопротивление не включено), и T_2 в случае, когда добавочное сопротивление $R_д$=10 Ом включено. Результаты занести в таблицу результатов наблюдений 2.

8.Вычислить значения коэффициента затухания, используя формулу /6/. Используя выражения для коэффициента затухания для двух случаев измерений, $\beta_1 = \frac{R}{2L}$, и $\beta_2 = \frac{R + R_д}{2L}$, найти сопротивление контура R по формуле

$$R = \frac{R_Д}{(\beta_2 / \beta_1) - 1}, \qquad /10/$$

и его индуктивность L по формуле

$$L = \frac{R_Д}{2(\beta_2 - \beta_1)}. \qquad /11/$$

9. Вычислить циклическую частоту колебаний $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, сравнить ее величину с β_1 и β_2. Убедится, что ω_o намного больше коэффициента затухания $\beta << \omega_0$. Если это условие выполняется, т.е. коэффициент затухания мал, по формуле Томсона $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ найти значение ёмкости С.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

N	$R_д$=0		$R_д$=10 Ом	
	I	lnI	I	lnI

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

N	δ	Q	l,см	N	T, 10^{-3} С.	β	R, Ом	L Гн	С, мкФ
1									
2									

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите уравнение динамики затухающих электромагнитных колебаний (закон Ома). Каков физический смысл слагаемых в этом уравнении?
2. Запишите уравнение кинематики (решение уравнения динамики) затухающих электромагнитных колебаний. Можно ли считать эти колебания гармоническими?
3. Что такое коэффициент и логарифмический декремент затухания? В каких единицах они измеряются?
4. От каких параметров контура зависит коэффициент затухания и логарифмический декремент?
5. От каких параметров контура зависит период затухающих колебаний?
6. Дайте определение добротности контура. Выведите ее выражение. Как связаны между собой Q и δ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §140, 141,143,147,148.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §88,89,90.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §IV.1.1, IV.1.2, IV.1.3, IV.2.1.

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Таблица 1.Электроизолирующие материалы

Диэлектрическая проницаемость ε, напряжённость пробивного электрического поля $E_п$, плотность ρ', удельное сопротивление ρ веществ (при 20 ^{0}C)

Материал	t ^{o}C	ε	$E_п$, 10^6 В/м	ρ', 10^3 кг/м^3	ρ, Ом м
Воздух		1,0006			
Бумага	18	2-2,5			
Текстолит					10^8-10^9
Плексиглас		3,0-3,9	18,5	1,2	10^{11}-10^{13}
Гетинакс		3,5-6,5			
Полистирол		2,2-2,8	25-50	1,05-1,65	510^{13}-510^{15}
Полиэтилен		2,7-3,5			10^{12}-10^{14}
Слюда	18	4,5-8	50-200	2,3-3,2	10^{13}-10^{16}
Кварц					1-3 10^{16}
Стекло		5-10	30-150	2,2-4,0	10^6-10^{15}
Фторопласт		2,5-2,7		2,14	1,2 10^{16}
Эбонит		2,5-4,5	25-100	1,3	2 10^{16}
Янтарь		2,7-2,9	20-30	1,06-1,11	5 10^{18}
Резина		2,2-3,0	16-40		10^{13}
Парафин	20	2,0-2,5	15-50		10^{14}-10^{18}
Фарфор	18	4,4-6,8			7 10^{12}-4 10^{13}

Таблица 2. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов и сплавов (при 200С)

Вещество	t, ^{0}C	ρ, 10^{-8} Ом·м	α,10^{-3} К$^{-1}$
Алюминий		2,82-3,21	3,862-4,9
Железо		9,8	5,0
Железо (0,1%С)		12,0	6,2
Сталь легированная		4,5	1,5
Серебро		1,62	3,6
Медь		1,75	3,9-4,15
Латунь		2,5-8	1,5-7
Бронза оловянистая		18	
Никель		7,24	5,4
Магний		4,46	3,9
Молибден		5,6	4,7
Вольфрам		7,0	
Графит		1300	

Таблица 3.Коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, индукция насыщения и магнитная проницаемость некоторых веществ

Ферромагнетик	$H_к$, Э	$B_{ост}$ Гс	$B_{макс}$ Гс	$\mu_{макс}$
Жёсткие ферромагнетики				
Магнетит ($FeO\ Fe_2O_3$)	50	6000		
Углеродистая сталь (1%C)	40-60	9000-7000		
Хромовая сталь (3%Cr, 1%C)	60-80	10500-8500		
Мягкие ферромагнетики				
Чистое железо (отжиг в водороде)	0,025	2000	21600	280000
Мягкое железо	0,5	8400	21500	8000
Трансформаторное кремнистое железо (1%Si)	0,7	15000	25000	10000
Трансформаторное железо (4%Si)	0,35	5000	20000	15000
Углеродистое железо (0,1%C)	3,0	10000	18000	3000
Пермаллой (78%Ni, 22%Fe)	0,06	5000	10000	80000
Гиперник (50%Ni, 50%Fe)	0,05	6000	11000	70000

Напряжённость магнитного поля на магнитном экваторе - ~ 27,1А/м, у магнитных полюсов - ~ 52,5А/м. В магнитных аномалиях, напряжённость возрастает; в районе Курской магнитной аномалии она достигает~ 160А/м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фундаментальные физические константы ГСССД 1-87 /М.: Госкомстандарт СССР. 1987.
2. Гольдин Л.Л. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Л.Л. Гольдин - М.: Наука, 1973.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. - М.: Мир, 1982.
4. Скороходов Е.А. Общетехнический справочник / Е.А. Скороходов. -М.: Машиностроение, 1982.
5. Кошкин Н.И., Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. - М.: Наука, 1980.
6. Чайлдс У. Физические постоянные / У. Чайлдс. - М.: ГИЗ, 1962.
7. Карякин Н.И., Краткий справочник по физике. / Н.И. Карякин, К.Н. Быстров, П.С. Киреев. - М. ВШ, 1964.
8. Енохович А.С. Справочник по физике и технике /. А.С Енохович. - М.: Просвещение, 1983.

Учебное издание

Леонтьев Николай Георгиевич
канд. физ. мат. наук, доцент
Белоусов Александр Васильевич
канд. физ. мат. наук, доцент
Гуриненко Людмила Александровна
канд. техн. наук, доцент

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ПРОГРАММАМ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ)

ЧАСТЬ 2. Постоянный ток. Электромагнетизм

Редакция авторская

Объём ЭИ: 1,249Мб.
Формат ЭИ: Portable Document Format (PDF).

© Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ
347740, г. ЗЕРНОГРАД Ростовской области, ул. Ленина,21.