

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.С.Гнатюк, З.Ф. Мурашова

Под ред. доктора техн. наук, профессора Н.Н.Морозова

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ И
МАГНЕТИЗМУ**

Допущено Учёным советом МГТУ

в качестве учебного пособия по дисциплине «Физика»

для студентов-бакалавров технических направлений и специальностей

Мурманск

2014

УДК 537 (075.8)

ББК 22.3я73

Л 12

Гнатюк В.С., Мурашова З.Ф., (под ред. доктора техн. наук, профессора Морозова Н.Н.). **Лабораторный практикум по электричеству и магнетизму. [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие по дисциплине «Физика» для студентов-бакалавров технических направлений и специальностей. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2014. – 200 с.**

Информрегистр №

Аннотация: настоящее учебное пособие – лабораторный практикум – включает 12 лабораторных работ по электричеству и магнетизму, методические рекомендации о порядке выполнения работ; краткие теоретические сведения по классификации, описанию и принципу действия, общим элементам, общим свойствам, устройству электроизмерительных приборов, используемых при выполнении лабораторных работ; краткие сведения из теории погрешностей измерений физических величин. Учебное пособие предназначено для студентов-бакалавров технических направлений и специальностей МГТУ.

The summary: the present manual – a laboratory practical work– includes 12 laboratory works on the electricity and magnetism, methodical recommendations for the order of performance of works; brief theoretical information on the classification, description and operating principle, common elements common properties, device of electric devices used at performance of laboratory works; brief information from the theory of errors of measurements of physical quantities. The manual is intended for students-bachelors of technical directions and specialties of MGTU.

Рецензенты –В.С. Шолохов, канд. физ.-мат. наук, доцент.

Гнатюк Виктор Степанович

Мурашова Зоя Федоровна

Морозов Николай Николаевич

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ
И МАГНЕТИЗМУ**

© ФГБОУВПО Мурманский государственный
технический университет 2014

© В.С. Гнатюк 2014

© З.Ф. Мурашова 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Краткие теоретические сведения	
1. Основная классификация электроизмерительных приборов.....	6
1.1. Краткое описание приборов и их принципа действия.....	6
1.2. Общие элементы приборов.....	10
2. Общие свойства приборов.....	10
2.1. Классы точности электроизмерительных приборов.....	10
2.2. Цена деления шкалы.....	12
2.3. Определение внутреннего сопротивления прибора.....	12
Часть 1. Электростатика. Постоянный ток	
Лабораторная работа № 1 «Градуирование гальванометра и различные схемы его включения».....	16
Лабораторная работа № 2 «Исследование полезной мощности и КПД источника постоянного тока».....	32
Лабораторная работа № 3 «Измерение сопротивления при помощи моста Уитстона».....	58
Лабораторная работа № 4 «Градуирование термопары».....	74
Лабораторная работа № 5 «Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры».....	96
Лабораторная работа № 6 «Изучение зависимости сопротивления полупроводников от температуры».....	107
Часть 2. Электромагнетизм	
Лабораторная работа № 7 «Изучение распределения магнитного поля соленоида и определение его индуктивности».....	119
Лабораторная работа № 8 «Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли».....	136
Лабораторная работа № 9 «Определение удельного заряда электрона	146

методом магнетрона».....	
Лабораторная работа № 10 «Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса для магнитомягких материалов с помощью осциллографа».....	156
Лабораторная работа № 11 «Определение точки Кюри ферромагнитных материалов».....	173
Лабораторная работа № 12 «Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу».....	188

Предисловие

Учебное пособие предназначено для курсантов и студентов всех специальностей МГТУ.

Цель данного учебного пособия – помочь курсантам и студентам при прохождении физического практикума.

Учебное пособие содержит 12 классических лабораторных работ физического практикума, охватывающих основные темы раздела «Электричество и магнетизм».

Пособие содержит: краткие теоретические сведения по классификации, описанию и принципу действия, общим элементам, общим свойствам, устройству электроизмерительных приборов, используемых при выполнении лабораторных работ; часть 1, в которой приведены указания к проведению 6 лабораторных работ по темам «Электростатика. Постоянный ток»; – часть 2, в которой приведены указания к проведению 6 лабораторных работ по темам «Электромагнетизм».

Каждое описание к лабораторной работе содержит подробные теоретические сведения, теорию лабораторной работы, указания к проведению измерений и обработки результатов, технические характеристики используемых установок, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы. Составлены таким образом, чтобы курсанты и студенты, проходящие физический практикум в лаборатории, могли самостоятельно освоить методику измерений; провести обработку и оценить погрешности полученных результатов; сделать анализ и подготовиться к защите лабораторной работы, оформить отчет.

Приступая к выполнению лабораторной работы, студент должен знать ее основные теоретические положения, представлять цель работы, последовательность действий при проведении измерений. Подробная теоретическая часть может рассматриваться как достаточный теоретический минимум, однако, для защиты лабораторной работы, необходимо дополнить знания, изучив теоретический материал по рекомендуемой, в конце каждого описания учебной литературе и конспектам лекций.

В конце описания каждой лабораторной работы содержится ряд контрольных вопросов, служащих тестами на правильное понимание цели работы, физической теории, методики измерений и обработки данных.

В постановке лабораторных работ и написании методических указаний к ним в разное время принимали участие преподаватели и сотрудники кафедры физики МГТУ.

Краткие теоретические сведения

1. Основная классификация электроизмерительных приборов

В зависимости от способа, который используется для сравнения измеряемой величины с единицей измерения, электроизмерительные приборы подразделяются на *приборы непосредственной оценки* (вольтметр) и *приборы сравнения*, служащие для сравнения измеряемой величины с известными, которые иногда монтируются в прибор (мост для измерения сопротивления).

По способу получения отсчета измерительные приборы подразделяются на *приборы с непосредственным отсчетом*, *управляемым отсчетом* и *самотишущие*.

Электроизмерительные приборы классифицируются по роду измеряемой величины: амперметр, вольтметр и т. д.

Классификация по роду тока: приборы постоянного, переменного, постоянно – переменного тока.

Приборы с непосредственным отсчетом, кроме того, подразделяются по принципу действия в зависимости от системы: приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической систем; цифровые и т.д.

по степени точности: *приборы классов (см. ниже) точности* 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 .

1.1. Краткое описание приборов и их принципа действия

Магнитоэлектрическая система

Принцип работы основан на взаимодействии тока, протекающего по обмотке подвижной катушки, с магнитным полем постоянного магнита.

Основные детали: постоянный магнит и подвижная катушка (рамка), по которой проходит ток, пружины (рис. 1).

При прохождении тока через рамку возникает вращающий момент, под действием которого подвижная часть прибора поворачивается вокруг своей оси на некоторый угол φ .

Вращающий момент приборов магнитоэлектрической системы прямо пропорционален силе тока:

$$M_{вр} = k_1 I,$$

где: $k_1 = B \cdot S \cdot n$, B – магнитная индукция поля постоянного магнита, S – площадь катушки, n – число витков катушки.

Противодействующий момент создается спиральными пружинами и пропорционален углу поворота рамки:

$$M_{пр} = k_2 \varphi,$$

где k_2 – коэффициент, характеризующий упругие свойства пружины.

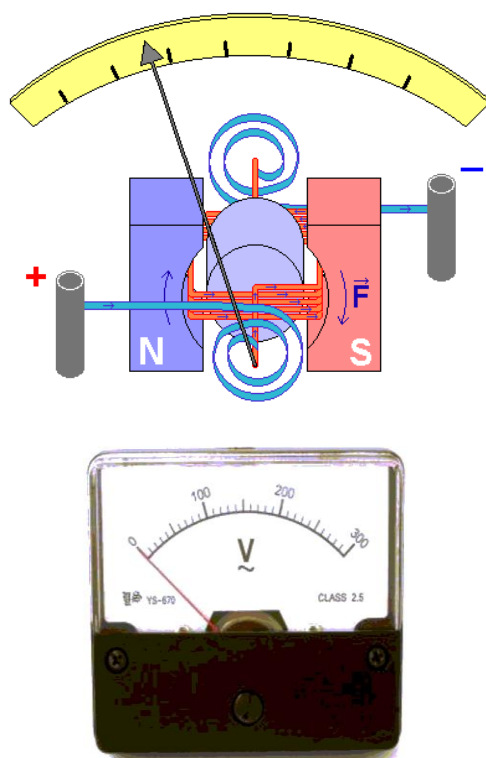


Рис. 1.

При равновесии подвижной части прибора вращающий момент равен противодействующему. Из этого условия равновесия для приборов магнитоэлектрической системы $\varphi \sim I$, и поэтому их шкалы равномерны.

Поворачиваясь, катушка отклоняет стрелку прибора. Магнитоэлектрические приборы служат только для измерения постоянного тока и напряжения, так как направление поворота рамки зависит от направления тока в ней. Если по катушке пропустить переменный ток частотой 50 Гц, то направление вращающего момента станет меняться сто раз в секунду, подвижная часть не будет успевать за током и стрелка не отклонится. Приборы данной системы пригодны для использования в цепях постоянного тока.

Электромагнитная система

Принцип работы основан на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки с сердечником из ферромагнитного материала, внесенного в это поле.

Вращающий момент в электромагнитных измерительных механизмах возникает в результате взаимодействия магнитного поля катушки, по обмотке которого протекает измеряемый ток, с одним или несколькими ферромагнитными сердечниками, обычно составляющими подвижную часть механизма.

Вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, пропорционален квадрату силы тока:

$$M_{вр} = CI^2,$$

где C – коэффициент, зависящий от числа витков катушки, материала, формы сердечника и его положения относительно подвижной части.

Наибольшее применение получили три конструкции измерительных механизмов: а) с плоской катушкой, б) с круглой катушкой, в) с замкнутым магнитопроводом.

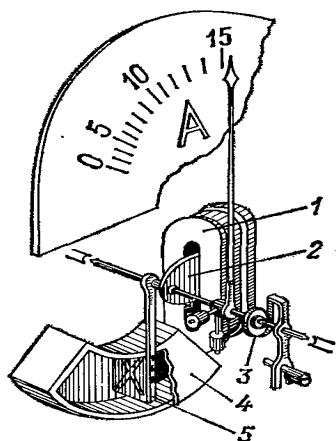


Рис.2.

электротехническая (кремнистая) сталь, а в точных переносных приборах – пермаллой.

При наличии тока в катушке сердечник стремится расположиться в месте с наибольшей концентрацией поля, т.е. втягивается в зазор катушки. При этом закручиваются пружинки 3, в результате чего возникает противодействующий момент. Для успокоения движения подвижной части в электромагнитных

измерительных механизмах применяют обычно воздушные или жидкостные успокоители. На рисунке представлен измерительный механизм с воздушным успокоителем, состоящим из камеры 4 и крыла 5.



Рис.3.

При равновесии подвижной части прибора угол поворота оказывается пропорционален квадрату тока. Вследствие этого шкала приборов электромагнитной системы неравномерна (Рис.3). Вследствие квадратичной зависимости направление отклонения стрелки прибора не зависит от

направления тока, и, следовательно, могут применяться в цепях как постоянного, так и переменного токов.

Электродинамическая система

Принцип работы основан на взаимодействии двух катушек (рамок), по которым течет ток. Одна из них неподвижна, а другая подвижна. Перемещение катушек относительно друг друга обуславливается тем, что проводники, по которым протекают токи одного направления, притягиваются, а с токами противоположных направлений – отталкиваются.

Вращающий момент, действующий на подвижную катушку, пропорционален произведению силы тока в подвижной $I_{\text{п}}$ и неподвижной $I_{\text{н}}$ катушках:

$$M_{\text{вр}} = C I_{\text{п}} I_{\text{н}},$$

где C – коэффициент, зависящий от числа витков катушек, размеров и формы катушек и их взаимного расположения. Из условия равновесия несложно определить, что угол поворота стрелки пропорционален токам, протекающим через катушки и шкалы амперметра и вольтметра электродинамической системы неравномерны, а для ваттметров равномерны.

Электростатическая система

Принцип работы основан на действии электростатического поля, созданного между двумя неподвижными электродами, на подвижный электрод.

Когда к неподвижным электродам приложено напряжение, подвижный электрод стремится расположиться так, чтобы емкость была наибольшей, вследствие чего подвижная часть отклоняется от первоначального положения. Вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, пропорционален квадрату напряжения. Вследствие этого шкала приборов электростатической системы неравномерна.

Цифровые измерительные приборы



Рис. 4.

Основой цифрового вольтметра (рис. 4) является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В настоящее время имеется множество схемотехнических принципов построения АЦП, однако общим из них является сравнение измеряемой величины с набором эталонов. Основными характеристиками АЦП являются точность преобразования (число разрядов в выходном коде) и быстродействие. Можно условно разделить АЦП на два класса:

последовательного счета, когда выходной код определяется равенством измеряемого напряжения с дискретно растущим эталонным напряжением и параллельного, когда сигнал сравнивается с набором эталонных напряжений.

Цифровой амперметр можно реализовать установив на входе цифрового вольтметр калиброванный резистор небольшой величины, через который протекает измеряемый ток. Падение напряжения на входном резисторе, пропорциональное протекающему току, измеряется цифровым вольтметром, табло которого соответствующим образом градуируется.

1.2. Общие элементы приборов

Шкала

Шкала обычно представляет собой светлую поверхность с черными делениями и цифрами, соответствующими определенным значениям измеряемой величины. Форма шкалы зависит от конструкции прибора, класса точности и ряда других факторов.

На шкале каждого прибора наносятся следующие обозначения:

- Обозначение единицы измеряемой величины.
- Условное обозначение системы прибора (или принципа действия прибора).
- Обозначение класса точности прибора.
- Условное обозначение положения прибора.
- Условное обозначение степени защищенности от магнитных и других влияний.
- Величина испытательного напряжения изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу.
- Год выпуска и заводской номер.
- Обозначение рода тока.
- Тип прибора.

Значение силы тока, соответствующее определенным значениям напряжения, и значения напряжения, соответствующие определенным значениям силы тока.

Указатель

Может быть выполнен в виде стрелки или светового пятна с темной нитью посередине. По форме стрелки бывают нитевидными, ножевидными и копьевидными.

2. Общие свойства приборов

2.1. Классы точности электроизмерительных приборов

Главная черта электроизмерительного прибора - это степень точности, с которой им можно измерять. По степени точности измерения

электроизмерительные приборы делят на классы точности. Класс точности обуславливается в зависимости от допустимой меры погрешности прибора, вызванной устройством прибора.

Для оценки точности электроизмерительных приборов служит *приведенная погрешность*, определяемая следующим выражением:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{пред}}} \cdot 100\%,$$

где $A_{\text{пред}}$ – номинальное значение шкалы прибора, т.е. максимальное значение шкалы на выбранном пределе измерения прибора. Приведенная погрешность определяет класс точности прибора.

Числа, указывающие класс точности прибора γ_0 , обозначают наибольшую допустимую приведенную погрешность в процентах ($\gamma_0 \geq \gamma_{\text{пр. max}}$). Т.е. при нормальной эксплуатации максимальное значение приведенной погрешности не должно превышать класс точности.

Пример: амперметр имеет предел измерения $I_{\text{пред}} = 5\text{A}$. Если максимальная абсолютная погрешность прибора $\pm 0,05\text{ A}$, то приведенная погрешность равна $\frac{0,05}{5}$, а класс точности прибора (или наибольшая допускаемая приведенная погрешность) равен

$$\gamma_0 = \frac{0,05}{5} \cdot 100\% = 1\%.$$

На приборе данный класс точности обозначен цифрой 1. Эта погрешность характеризует только точность самого прибора, но не точность измерения.

Пример расчета погрешности измерений по классу точности прибора

$$\gamma_{\text{пред}} = \frac{\Delta I}{I_{\text{пред}}} \cdot 100\%$$

$$\Delta I = \frac{I_{\text{пред}} \cdot \gamma_{\text{пр.}}}{100\%}$$

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\% = \frac{\gamma_{\text{пр.}} \cdot I_{\text{пред.}}}{I} \leq \frac{\gamma_0 \cdot I_{\text{пред.}}}{I}$$

где γ_0 – класс точности, ΔI – абсолютная погрешность при измерении на данном пределе, $I_{\text{пред.}}$ – предельное значение силы тока, I – измеряемая величина тока, γ – относительная погрешность измерения.

Пусть $\gamma_{\text{пред.}} = 0,02\%$; $I_{\text{пред.}} = 8\text{A}$. Тогда:

$$\gamma = \frac{0,02\% \cdot 8}{2} = 0,8\%.$$

В настоящее время электроизмерительным приборам в соответствии со стандартом присвоено девять классов точности: 0,01; 0,02; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Приборы классов точности от 0,01 до 0,5 включительно называются прецизионными и используются для точных лабораторных исследований. Приборы классов точности от 1,0 до 4,0 включительно – технические, выше 4,0 – внеклассовые.

Для повышения точности измерения стрелочным электроизмерительным прибором надо выбирать прибор с такой шкалой, чтобы в процессе измерения располагались во второй половине шкалы прибора.

2.2. Цена деления шкалы

Шкалы приборов имеют деления. Для перевода числа делений в единицы измеряемой величины необходимо отсчет по шкале умножить на цену деления шкалы для данного предела измерения.

Цена деления – это число единиц измеряемой величины, приходящееся на одно деление шкалы.

Чтобы определить цену деления шкалы, нужно предел измерения прибора разделить на общее число делений шкалы.

Пример: предельное значение силы тока $I_{\text{пред.}} = 75\text{A}$, шкала амперметра имеет 150 делений. В этом случае цена деления шкалы:

$$C_r = 0,5 \frac{\text{A}}{\text{дел}}$$

2.3. Определение внутреннего сопротивления прибора

При некоторых измерениях необходимо учитывать или подбирать определенное значение внутреннего сопротивления.

Чтобы определить внутреннее сопротивление прибора, пользуются данными, приведенными на шкале прибора: для вольтметра – силой тока, соответствующей пределу вольтметра, для амперметра – падением напряжения, соответствующему пределу амперметра.

Расчет внутреннего сопротивления прибора производится по закону Ома для участка цепи:

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

Пример: Допустим, на шкале прибора имеется следующая таблица:

mA	0,15	0,3	0,6-1,5	6-60
mV	15	45	65	75





Предельное значение амперметра $I_{\text{пред.}} = 6\text{mA}$, которому соответствует напряжение на шкале прибора $U_{\text{шкалы}} = 75\text{m}$.

Тогда внутреннее сопротивление амперметра на пределе измерения 6mA , равно:




$$R_A = \frac{U_{\text{шкалы}}}{I_{\text{пред.}}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3}} = 12,50\text{m}.$$

Условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы




Обозначения принципа действия прибора

Магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Электромагнитный	
Электродинамический	
Электростатический	

Обозначения тока

Постоянный	
Переменный однофазный	
Постоянный и переменный	

Обозначения положения прибора

Горизонтальное положение шкалы	
Вертикальное положение шкалы	
Наклонное положение шкалы под углом к горизонту	

Обозначения единиц измерения физических величин

1. Ампер - А	10. Микроом – мкОм
2. Миллиампер – мА	11. Фарада – Ф
3. Микроампер – мкА	12. Микрофарад – мкФ
4. Вольт – В	13. Нанофарад - нФ
5. Киловольт – кВ	14. Пикофарад – пФ
6. Милливольт – мВ	15. Генри – Гн
7. Ом – Ом	16. Миллигенри – мГн
8. Мегаом – МОм	17. Микрогенри – мкГн
9. Килоом – кОм	18. Тесла – Тл

Часть 1. «Электростатика. Постоянный ток»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ГРАДУИРОВАНИЕ¹ ГАЛЬВАНОМЕТРА И РАЗЛИЧНЫЕ СХЕМЫ ЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: ознакомиться с методами расширения диапазона измерений электроизмерительных приборов.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Сопротивления	–	–	–	–
2	Реостат	–	–	–	–
3	Гальванометр	-	-	-	-
4	Магазин сопротивлений	-			
5	Вольтметр				
6	Амперметр				

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. Электрический ток

Если изолированный проводник поместить в электрическое поле напряжённостью \vec{E} , то на свободные заряды q в проводнике будет действовать кулоновская сила $\vec{F} = q\vec{E}$. В результате в проводнике возникает

¹ Градуировка средств измерений (нем. graduieren — градуировать, лат. gradus — шаг, ступень, степень) — метрологическая операция, при помощи которой средство измерения (меру или измерительный прибор) снабжают шкалой или градуировочной таблицей (кривой).

кратковременное перемещение свободных зарядов. Этот процесс закончится тогда, когда собственное электрическое поле зарядов, возникших на поверхности проводника, не скомпенсирует полностью внешнее поле. Результирующее электростатическое поле внутри проводника равно нулю. Однако, в проводниках может при определенных условиях возникнуть непрерывное упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда. Такое движение называется *электрическим током*.

Электрическое поле может быть создано, например, двумя разноименно заряженными телами. Соединя проводником разноименно заряженные тела, можно получить электрический ток, протекающий в течение короткого интервала времени. Постоянный электрический ток может быть создан только в замкнутой цепи, в которой свободные носители заряда циркулируют по замкнутым траекториям. Электрическое поле в разных точках такой цепи неизменно во времени. Следовательно, электрическое поле в цепи постоянного тока имеет характер «замороженного» электростатического поля. Но при перемещении электрического заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории, работа электрических сил равна нулю. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в электрической цепи устройства, способного создавать и поддерживать разности потенциалов на участках цепи за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются *источниками постоянного тока*. Силы неэлектростатического происхождения, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются *сторонними силами*. Природа сторонних сил может быть различной. В гальванических элементах или аккумуляторах они возникают в результате электрохимических процессов, в генераторах постоянного тока сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле. Источник тока в электрической цепи играет ту же роль, что и насос, который необходим для перекачки жидкости в замкнутой гидравлической системе.

Скорость направленного движения частиц в проводниках зависит от материала проводника, массы и заряда частиц, окружающей температуры, приложенной разности потенциалов и составляет величину, намного меньшую скорости света. За 1 с электроны в проводнике перемещаются за счет упорядоченного движения меньше чем на 0,1 мм. Несмотря на это, скорость распространения собственно электрического тока равна скорости света, то есть скорости распространения фронта электромагнитной волны.

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.

За направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов.

При этом, если единственными носителями тока являются отрицательно заряженные частицы (например, электроны в металле), то направление тока противоположно направлению движения электронов.

Электрический ток в проводниках представляет собой:

- в *металлах* – направленное движение электронов (проводники первого рода);
- в *электролитах* – направленное движение положительных и отрицательных ионов (проводники второго рода);
- в *плазме* – направленное движение электронов и ионов обоих знаков (проводники третьего рода),
- в *полупроводниках* – направленное движение электронов и дырок.

Движение заряженных частиц внутри проводника нельзя наблюдать, но судить о наличии электрического тока можно по его действиям:

- *теловому* – проводник с током нагревается;
- *магнитному* – вокруг проводника с током возникает магнитное поле;
- *световому* – проводник с током может светиться;
- *химическому* – в проводнике с током изменяется химический состав (такие проводники называются проводниками второго класса).

Для продолжительного существования электрического тока в замкнутой цепи необходимо выполнение следующих условий:

- наличие свободных заряженных частиц (носителей тока);
- наличие электрического поля, силы которого, действуя на заряженные частицы, заставляют их двигаться упорядоченно;
- наличие источника тока, внутри которого сторонние силы перемещают свободные заряды против электростатических (кулоновских) сил.

Количественными характеристиками электрического тока являются *сила тока I* и *плотность тока \vec{j}* .

Сила тока I – скалярная физическая величина, равная отношению заряда Δq , переносимого через поперечное сечение проводника (рис.1) за интервал времени Δt , к этому интервалу времени (первая производная от заряда по времени):

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}, (\text{A}).$$

В Международной системе единиц (СИ) сила тока измеряется в **амперах** (А). Единица измерения тока 1 А устанавливается по магнитному взаимодействию двух параллельных проводников с током.

Плотностью тока называется вектор \vec{j} , модуль которого равен отношению силы тока, протекающего через некоторую площадку,

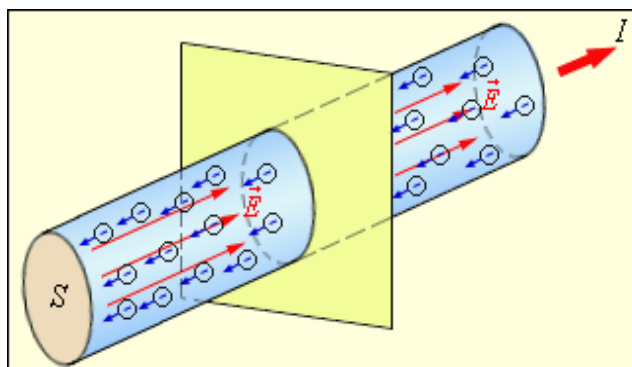


Рис. 1. Упорядоченное движение электронов в металлическом проводнике.

I и S – ток и площадь поперечного сечения проводника,
 \vec{E} – напряжённость электрического поля.

перпендикулярную направлению тока, к величине этой площадки, а направление вектора совпадает с направлением движения положительного заряда в токе:

$$j = \frac{I}{S}, \text{ (A/м}^2\text{)}.$$

Различают *переменный* (англ. *alternating current, AC*) и *постоянный* (англ. *direct current, DC*) токи.

Постоянный ток – ток, направление и величина которого не меняется во времени.

Переменный ток – это ток, направление и величина которого меняется во времени.

Раздел физики, изучающий течение электрического тока в различных средах, называется *электродинамикой сплошных сред*.

В этой работе рассматривается постоянный ток.

1.2. Электрическая цепь постоянного тока

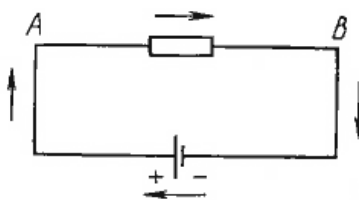


Рис. 2.

Рассмотрим простейшую электрическую цепь постоянного тока, составленную из одного гальванического элемента и проводника (рис.2).

На внешнем участке цепи электрические заряды движутся под действием сил электрического поля. Перемещение зарядов внутри проводника не приводит к выравниванию потенциалов всех точек проводника, так как в каждый момент времени

источник тока доставляет к одному концу электрической цепи точно такое же

Код поля изменен

Код поля изменен

число заряженных частиц, какое из него перешло к другому концу внешней электрической цепи. Поэтому сохраняется неизменным напряжение между началом и концом внешнего участка электрической цепи; напряженность электрического поля внутри проводников в этой цепи отлична от нуля и постоянна во времени.

Цепь постоянного тока можно разбить на определенные участки. Те участки, на которых не действуют сторонние силы (то есть участки, не содержащие источников тока), называются *однородными*. Участки, включающие источники тока, называются *неоднородными*. При перемещении единичного положительного заряда по некоторому участку цепи работу совершают как электростатические (кулоновские), так и сторонние силы.

В общем случае электрическая цепь представляет собой совокупность источников тока, проводников и потребителей электроэнергии и включает:

- *узлы* – точки соединения трёх и более проводников;
- *контур* – замкнутые пути из проводников. При этом каждый проводник может входить в несколько контуров;
- *ветви* – последовательное соединение элементов между двумя ближайшими узлами.

Подобная цепь называется разветвлённой.

1.3. Электрическое сопротивление

Электрическое сопротивление R (э.с.) – физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать прохождению электрического тока, измеряется в Омах (Ом).

Электрическое сопротивление, обусловленное передачей или преобразованием электрической энергии в другие виды: при необратимом преобразовании электрической энергии (преимущественно в тепловую энергию) называется *активным сопротивлением*; Электрическое сопротивление, обусловленное передачей энергии электрическому или магнитному полю (и обратно), называется *реактивным сопротивлением*.

Высокая электропроводность металлов связана с тем, что в них имеется большое количество носителей тока – *электронов проводимости*, образующихся из валентных электронов атомов металла, которые не принадлежат определённому атому. Электрический ток в металле возникает под действием внешнего электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Движущиеся под действием поля электроны рассеиваются на неоднородностях ионной решётки (на примесях, дефектах решётки, а также нарушениях периодической структуры, связанной с тепловыми колебаниями ионов). При этом электроны теряют импульс, а энергия их движения преобразуются во внутреннюю энергию кристаллической решётки, что и

приводит к нагреванию проводника при прохождении по нему электрического тока.

В других средах (полупроводниках, диэлектриках, электролитах, неполярных жидкостях, газах и т. д.) в зависимости от природы носителей заряда физическая причина сопротивления может быть иной. Линейная зависимость, выраженная законом Ома, соблюдается не во всех случаях.

Сопротивление проводника при прочих равных условиях зависит от его геометрии и от *удельного электрического сопротивления* ρ материала, из которого он состоит.

Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где ρ – *удельное сопротивление* вещества проводника, l – длина проводника, а S – площадь сечения.

Удельное сопротивление – скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения.

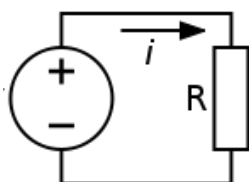
Сопротивление R зависит как от материала, по которому течёт ток, так и от геометрических размеров проводника и от температуры. Сопротивление металлов снижается при понижении температуры; при температурах порядка нескольких Кельвинов сопротивление большинства металлов и сплавов стремится или становится равным нулю (эффект сверхпроводимости). Напротив, сопротивление полупроводников и изоляторов при снижении температуры растёт. Сопротивление также меняется по мере увеличения тока/напряжения, протекающего через проводник/полупроводник.

Проводник, обладающий электрическим сопротивлением, называется *резистором*.

1.4. Закон Ома для однородного участка цепи

Экспериментально установлен в 1826 году, и назван в честь его первооткрывателя Георга Ома.

Однородный участок цепи не содержит источника тока (источника ЭДС).



Сила тока в однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению данного участка цепи (рис. 3):

$$I = \frac{U}{R}.$$

Проводники, подчиняющиеся закону Ома, называются *линейными*.

Графическая зависимость силы тока I от напряжения U (такие графики называются *вольт-амперными характеристиками*,

Рис. 3.

сокращенно ВАХ) изображается прямой линией, проходящей через начало координат. Следует отметить, что существует много материалов и устройств, не подчиняющихся закону Ома, например, полупроводниковый диод или газоразрядная лампа. Даже у металлических проводников при достаточно больших токах наблюдается отклонение от линейного закона Ома, так как электрическое сопротивление металлических проводников растет с ростом температуры.

1.5. Закон Ома в дифференциальной форме

Полезно переписать закон Ома в так называемой дифференциальной форме, в которой зависимость от геометрических размеров исчезает, и тогда закон Ома описывает исключительно электропроводящие свойства материала.

Согласно закону Ома для изотропных материалов плотность тока в среде \vec{j} пропорциональна напряженности электрического поля и удельной электропроводности среды γ :

$$\vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – удельная электропроводность среды (величина, обратная удельному сопротивлению ρ), измеряется в СИ – См/м (сименс на метр).

Все величины, входящие в это уравнение, являются функциями координат и, в общем случае, времени.

Закон Ома можно просто объяснить при помощи теории Друде – Лоренца:

$$\vec{j} = \frac{n \cdot e_0^2 \tau}{m} \cdot \vec{E} = \gamma \cdot \vec{E},$$

где γ – электрическая удельная проводимость, n – концентрация электронов, e_0 – элементарный заряд, τ – время релаксации по импульсам (время, за которое электрон «забывает» о том в какую сторону двигался), m – эффективная масса электрона.

1.6. Последовательное и параллельное соединение проводников

Проводники в электрических цепях постоянного тока могут соединяться последовательно и параллельно.

При последовательном соединении проводников конец первого проводника соединяется с началом второго и т. д. При этом сила тока одинакова во всех проводниках $I = const$, а напряжение U на концах всей цепи равно сумме напряжений на всех последовательно включенных проводниках. Например, для трех последовательно включенных проводников 1, 2, 3 (рис. 4) с электрическими сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 получим:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

По закону Ома для участка цепи:

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2, \quad U_3 = IR_3 \quad \text{и} \quad U = IR, \quad (1)$$

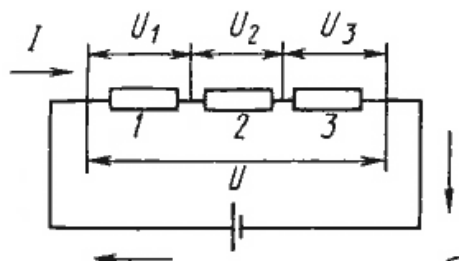


Рис. 4.

сумме электрических сопротивлений всех проводников.

Из соотношений (1) следует, что напряжения на последовательно включенных проводниках прямо пропорциональны их сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

При параллельном соединении проводников 1, 2, 3 (рис. 5) их начала и концы имеют общие точки подключения к источнику тока.

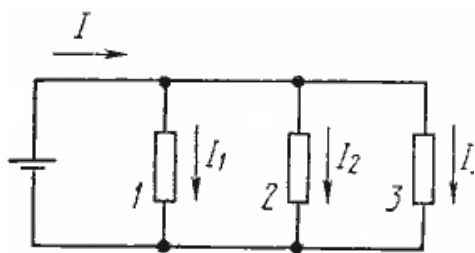


Рис. 5.

При этом напряжение на всех проводниках одинаково

$$(U = const),$$

а сила тока в неразветвленной цепи равна сумме сил токов во всех параллельно включенных проводниках

$$(I = I_1 + I_2 + I_3).$$

Для трех параллельно включенных проводников сопротивлениями R_1 , R_2

и R_3 на основании закона Ома для участка цепи запишем:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3} \quad (3)$$

Обозначив общее сопротивление участка электрической цепи из трех параллельно включенных проводников через R , для силы тока в неразветвленной цепи получим

$$I = \frac{U}{R}. \quad (4)$$

Так как,

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \quad (5)$$

то из выражений (3), (4) и (5) следует, что:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (6)$$

где R — полное сопротивление участка цепи из последовательно включенных проводников. Из выражения и (1) будем иметь:

$$IR = I(R_1 + R_2 + R_3).$$

Таким образом,

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (2)$$

При последовательном соединении проводников их общее электрическое сопротивление равно

При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям всех параллельно включенных проводников.

Параллельный способ включения широко применяется для подключения ламп электрического освещения и бытовых электроприборов к электрической сети.

1.7. Гальванометр, амперметр и вольтметр. Схемы их включения

Для измерения сил токов и напряжений в электрических цепях постоянного тока используются специальные приборы – *гальванометры, амперметры и вольтметры*.

Гальванометр (Г) (от гальвано и метр), высокочувствительный электроизмерительный прибор, реагирующий на весьма малую силу тока или напряжение. Наиболее часто Г. используют в качестве нуль-индикаторов, т. е. устройств для индикации отсутствия тока или напряжения в электрической цепи. Применяют Г. и для измерений малых силы тока и напряжения, определив предварительно постоянную прибора (цену деления шкалы). Различают Г. постоянного и переменного тока.

Цена деления гальванометра это разность ампер (вольт) на шкале (разность значений, соответствующих двум соседним отметкам шкалы).

Чувствительностью гальванометра называют число ампер (вольт) необходимое для отклонения стрелки его на одно деление шкалы.

Амперметр предназначен для измерения силы тока в цепи и представляет собой обычный гальванометр, шкала которого проградуирована в амперах. Включается амперметр в цепь последовательно (рис. 6).

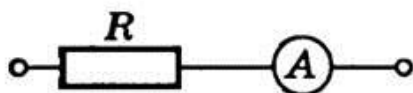


Рис. 6.

В цепи, состоящей из последовательно соединенных проводников, заряд нигде не накапливается и нигде не исчезает. Это значит, что сила тока в такой цепи везде одинакова и амперметр можно включать в любой участок цепи, состоящий из последовательно соединенных проводников.

Амперметр обладает некоторым внутренним сопротивлением R_a . В отличие от вольтметра, внутреннее сопротивление амперметра должно быть достаточно малым по сравнению с полным сопротивлением всей цепи: $R_a \ll R$.

Вольтметр предназначен для измерения напряжения (разности потенциалов) на участке цепи. Он подключается *параллельно* участку цепи, на котором производится измерение разности потенциалов.

Включают вольтметр параллельно тем точкам цепи, напряжение между которыми надо измерить (рис. 7). Вольтметр не должен изменять напряжение на измеряемом участке цепи, поэтому сила тока, проходящего через вольтметр, должна быть много меньше, чем сила тока в измеряемом участке.

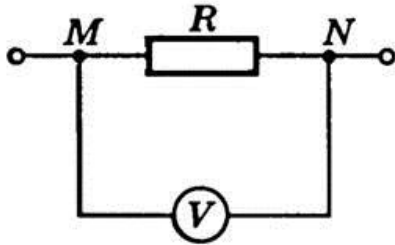


Рис. 7.

Для того чтобы вольтметр не вносил заметных искажений в измеряемое напряжение, его сопротивление должно быть большим по сравнению с сопротивлением участка цепи, на котором измеряется напряжение, т.е. $R_V \gg R$.

Итак, вольтметр можно применять для измерения напряжения на тех участках цепи, сопротивление которых мало по сравнению с сопротивлением самого вольтметра.

Измерительные приборы – вольтметры и амперметры – бывают двух видов: стрелочные (аналоговые) и цифровые. Цифровые электроизмерительные приборы представляют собой сложные электронные устройства. Обычно цифровые приборы обеспечивают более высокую точность измерений.

1.8. Шунт и добавочное сопротивление

Каждый амперметр и вольтметр рассчитаны на некоторые максимальные значения сил токов и напряжений соответственно, при превышении которых прибор может перегореть. Для расширения пределов измерения амперметров применяется шунты, а вольтметров – добавочные сопротивления.

Шунт – шунт (англ. *shunt* – ответвление) – электрический проводник или магнитопровод, присоединяемый параллельно участку электрической или магнитной цепи для отвлечения части электрического тока (магнитного потока) в обход данного участка.

Например, шунты используются для расширения пределов измерений амперметров. Такие шунты должны обладать малым электрическим сопротивлением. Шунты изготавливают в виде пластин, лент, проволоки.

В данной работе шунт – малое электрическое сопротивление, подключаемое параллельно гальванометру.

Пример. Найдем сопротивление $R_{Ш}$ шунта, который необходимо подключить к амперметру для измерения силы тока в цепи, в n раз превышающей силу тока, на которую рассчитан прибор: $I = n \cdot I_a$. Сопротивление амперметра обозначим через R_a . При подключении шунта часть измеряемой силы тока $I_{Ш}$ пойдет по нему. Через амперметр должен идти ток, не превышающий I_a (рис. 8). Сила тока I_a меньше измеряемой в n раз $I_a = \frac{I}{n}$.

Следовательно, цена деления прибора возрастет в n раз для случая, если шкала прибора равномерная, т.е. отклонению стрелки на одно деление будет соответствовать в n раз большая сила тока. Иначе говоря, чувствительность амперметра уменьшится в n раз: при подключении шунта стрелка прибора отклонится на угол, в n раз меньший, чем без него.

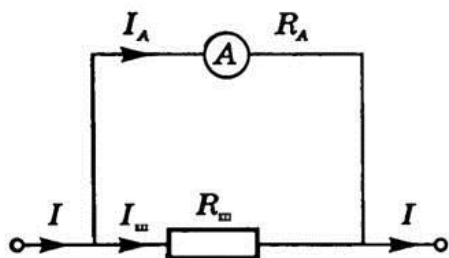


Рис. 8.

При параллельном соединении $I = nI_a = I_a + I_{ш}$, а напряжение на шунте и амперметре одинаково и, согласно закону Ома, равно: $I_a \cdot R_a = I_{ш} \cdot R_{ш}$. Исключая силу тока I_a из двух последних уравнений, получим:

$$R_{ш} = \frac{R_a}{n-1} \quad (7)$$

Дополнительное (добавочное) сопротивление – достаточно большое сопротивление, включенное последовательно с прибором или потребителем тока. Служит для уменьшения напряжения на конечном потребителе. Рассчитывается исходя из необходимого напряжения на потребителе и тока потребления.

В данной работе *добавочное сопротивление* – большое сопротивление, подключаемое последовательно с гальванометром.

Добавочные сопротивления изготавливают чаще всего из манганина или константана. Оба эти материала имеют большое удельное сопротивление и малый температурный коэффициент сопротивления.

Пример. Любой вольтметр рассчитан на предельное напряжение U_v . Но с помощью подключения последовательно с вольтметром добавочного сопротивления R_d можно измерять в n раз большие напряжения: $U = nU_v$. Найдем добавочное сопротивление, необходимое для измерения напряжений, в n раз больших тех, на которые рассчитан прибор.

При включении в цепь вольтметра добавочного сопротивления вольтметр по-прежнему измеряет напряжение U_v , но это составляет лишь $\frac{1}{n}$ часть измеряемого напряжения $U_v = \frac{U}{n}$. Напряжение на добавочном сопротивлении $U_d = U + U_v$ (рис.9). Поэтому пределы измерения

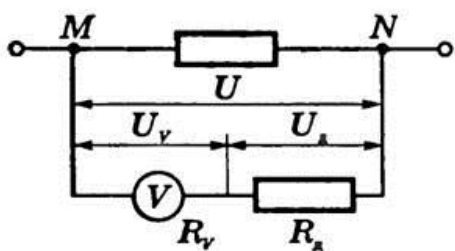


Рис. 9.

увеличиваются в n раз, и во столько же раз увеличивается цена деления вольтметра, а, следовательно, уменьшается его чувствительность.

В вольтметре и добавочном сопротивлении сила тока одинакова, так как они включены последовательно. Поэтому: $U_V = IR_V$, $U_d = IR_d$, и

$$U = nU_V = nIR_V.$$

При последовательном соединении напряжение на участке равно сумме напряжений на отдельных резисторах участка, т.е. $U = U_V + U_d$. Следовательно, $nIR_V = IR_V + IR_d$. Отсюда:

$$R_d = (n - 1)R_V.$$

Шунты и добавочные сопротивления могут быть установлены внутри корпуса прибора или подключаться к его зажимам на время измерений.

В настоящее время, главным образом для нужд лабораторий, изготавливают универсальные приборы, снабжаемые набором шунтов и дополнительных сопротивлений. Такие приборы используются как для измерения токов, так и для измерения напряжений в очень широких пределах. Например, можно измерять токи от 1 мА до сотен ампер. Так же широк диапазон измеряемых напряжений.

В результате включения в цепь $R_{ш}$, и R_d , изменится цена деления (и чувствительность) гальванометра. Поэтому необходимо провести градуировку прибора уже в качестве амперметра или вольтметра, т.е. сопоставить делениям шкалы гальванометра значения тока или напряжения, полученные в результате вычислений.

2. Теория лабораторной работы

Используя гальванометр для измерений в электрических цепях, необходимо знать его основные параметры: I_{Γ} – предельное значение тока, которое вызывает отклонение стрелки на всю шкалу, R_{Γ} – внутреннее сопротивление гальванометра, U_{Γ} – напряжение на клеммах гальванометра, которое вызовет ток I_{Γ} .

На практике гальванометр приходится использовать для измерения токов и напряжений превышающих его паспортные значения I_{Γ} и U_{Γ} . Для расширения пределов измерений используются шунты и добавочные сопротивления.

Часть 1. Использование гальванометра в качестве амперметра

Предположим, что с помощью гальванометра с заданными значениями R_{Γ} и I_{Γ} нужно измерить ток $I > I_{\Gamma}$.

Для этого параллельно R_{Γ} необходимо включить сопротивление $R_{ш}$ (шунт) и отвести от гальванометра «лишний» ток $I_l = I - I_{\Gamma}$ (рис.10).

Сопротивление шунта можно рассчитать по формуле (7):

$$R_{ш} = \frac{R_{\Gamma} \cdot I_{\Gamma}}{I - I_{\Gamma}} = \frac{R_{\Gamma}}{n - 1}, \quad (7)$$

где:
$$n = \frac{I}{I_{\Gamma}} \quad (8).$$

Если $n \gg 1$, то единицей знаменателя можно пренебречь, тогда:

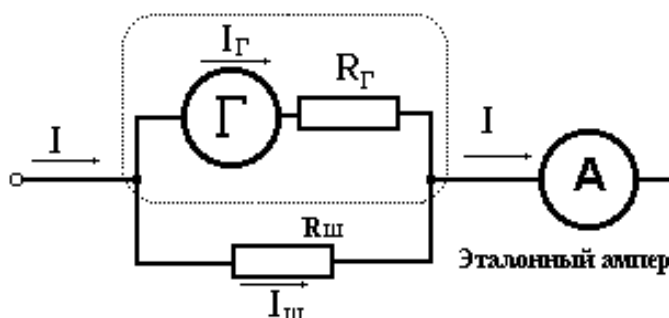


Рис. 10.

$$R_{\text{Ш}} = \frac{R_{\Gamma}}{n} \quad (9).$$

Измерения и обработка результатов

Расчет шунта

1. Рассчитать сопротивление шунта по формуле (8), (9) для тока $I = 1\text{А}$.
Параметры гальванометра: $I_{\Gamma} = 3\text{mA}$; $R_{\Gamma} = 70\text{ Ом}$.
2. Шунт изготовлен из проволоки. Вычислив ее длину по формуле:

$$R_{\text{Ш}} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad \rightarrow \quad l = \frac{R_{\text{Ш}} \cdot S}{\rho},$$

где $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения проволоки, $d = 0,6\text{ мм}$ – диаметр проволоки, $\rho = 1 \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ – удельное сопротивление материала проволоки. Из-за возможной ошибки при измерении толщины проволоки, расчетную длину увеличить на 15 – 20%. Окончательные размеры подобрать согласно пункту 4.

3. После проверки вычисления длины шунта преподавателем, установить на приборе нужную длину шунта.
4. После проверки схемы преподавателем, включить питание и с помощью реостата установить стрелку гальванометра на последнем делении шкалы гальванометра.
5. Отградуировать гальванометр. Для этого необходимо уменьшать ток эталонного амперметра I с помощью реостата на 0,1А до 0А, занося показания в табл. 1.

Таблица 1

Номер измерения	Сопротивление шунта $R_{ш}$, Ом	Длина шунта, l , м	Ток эталонного амперметра, I , А	Отсчет по шкале гальванометра, N делений	Цена деления $C = \frac{\Delta I}{\Delta N}$, А/дел.
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ:

$$I_{\Gamma} = 3\text{mA}; \quad R_{\Gamma} = 70 \text{ Ом}; \quad \rho_{\text{нихром}} = 1 \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad d = 0,6 \text{ мм}.$$

6. Изобразить на графике зависимость показаний гальванометра N от тока эталонного амперметра I .

7. По графику определить цену деления, как $C = \frac{\Delta I}{\Delta N}$, как тангенс наклона прямой к оси абсцисс.

В общем случае $C = \frac{dI}{dN}$, т.е. цена деления – есть производная от I по N , если $I = f(N)$. В нашем случае ток есть линейная функция от числа делений, т.к. используется гальванометр магнитоэлектрической системы.

Часть 2. Использование гальванометра в качестве вольтметра

Тот же гальванометр можно использовать для измерения напряжения U , причем $U > U_{\Gamma}$. В этом случае необходимо последовательно гальванометру включить добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$, на котором "погасится" напряжение $U - U_{\Gamma}$. (рис. 11).

По закону Ома:

$$U = I_{\Gamma} (R_{\Gamma} + R_{\text{доб}}).$$

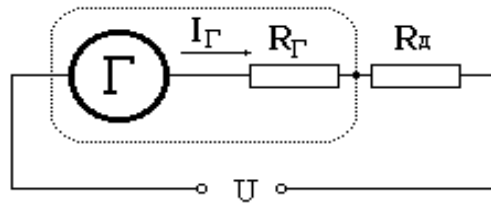


Рис. 11.

Отсюда:
$$R_{\text{доб}} = \frac{U}{I_{\Gamma}} - R_{\Gamma}.$$

Как правило, выполняется условие $\frac{U}{I_U} \gg R_{\Gamma}$, тогда добавочное сопротивление вычисляется: $R_{\text{доб}} \cong \frac{U}{I_{\Gamma}}$ (10).

Расчет добавочного сопротивления

1. Рассчитать добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$ для $U=30\text{В}$ по формуле (10).
2. Используя результаты вычислений (п.1), на магазине сопротивлений установить $R_{\text{доб}}$.
3. После проверки цепи преподавателем, включить питание, установить на вольтметре напряжение U и подобрать окончательно $R_{\text{доб}}$, так, чтобы стрелка гальванометра отклонилась на всю шкалу. Записать окончательное значение $R_{\text{доб}}$.
4. Отградуировать вольтметр. Для этого уменьшаем напряжение на вольтметре на $\Delta U = 1 \div 2\text{В}$ до 0В, занося показания в таблицу 2.

Таблица 2

Номер измерения	Величина добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$, Ом	Напряжение эталонного вольтметра, U , В	Отсчет по шкале гальванометра, N делений	Цена деления $C = \frac{\Delta U}{\Delta N}$, В/дел.
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ: $I_{\Gamma} = 3\text{mA}$; $R_{\Gamma} = 70\ \text{Ом}$.

5. Построить график зависимости $N(U)$.
6. По графику определить цену деления, как, $C = \frac{\Delta U}{\Delta N}$, как тангенс наклона прямой к оси абсцисс.
7. Проанализировать результаты, сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Согласно обозначениям на шкалах электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, указать назначение прибора, тип тока, безопасность, класс точности, систему измерительного механизма, рабочее положение при эксплуатации.
2. По классу точности электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, вычислить их абсолютную (инструментальную) погрешность и указать к какой группе приборов (прецизионным, техническим или внеклассовым) они относятся.
3. Что называется градуировкой электроизмерительного прибора?
4. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи.
5. Сформулируйте порядок расчёта напряжения, силы тока и общего сопротивления в участке цепи постоянного тока при последовательном и параллельном соединении нескольких различных сопротивлений.
6. Что такое шунт, для чего он необходим, как он подключается к гальванометру (последовательно или параллельно)?
7. Что такое дополнительное сопротивление, для чего оно необходимо, как оно подключается к гальванометру (последовательно или параллельно)?
8. Зная основные параметры гальванометра в данной работе рассчитать длину шунта и величину дополнительного сопротивления.
9. Что называется ценой деления и чувствительностью гальванометра?
10. Объяснить, как в данной работе по графику определяется цена деления приборов.

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики. - М.: Высш.школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. Школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики. - М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОЩНОСТИ И КПД ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: исследовать зависимости полной и полезной мощностей и КПД источника тока от величины сопротивления нагрузки.

Приборы и материалы

№ п/п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Источник постоянного тока	-	-	-	-
2	Амперметр				
3	Вольтметр				
4	Магазин сопротивлений	-			

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. Электрический ток

Если изолированный проводник поместить в электрическое поле напряжённостью \vec{E} , то на свободные заряды q в проводнике будет действовать кулоновская сила $\vec{F} = q\vec{E}$. В результате в проводнике возникает кратковременное перемещение свободных зарядов. Этот процесс закончится тогда, когда собственное электрическое поле зарядов, возникших на поверхности проводника, не скомпенсирует полностью внешнее поле. Результирующее электростатическое поле внутри проводника равно нулю. Однако, в проводниках может при определенных условиях возникнуть непрерывное упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда. Такое движение называется *электрическим током*.

Электрическое поле может быть создано, например, двумя разноименно заряженными телами. Соединяя проводником разноименно заряженные тела, можно получить электрический ток, протекающий в течение короткого интервала времени. Постоянный электрический ток может быть создан только в замкнутой цепи, в которой свободные носители заряда циркулируют по замкнутым траекториям. Электрическое поле в разных точках такой цепи неизменно во времени. Следовательно, электрическое поле в цепи постоянного тока имеет характер «замороженного» электростатического поля. Но при перемещении электрического заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории, работа электрических сил равна нулю. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в электрической цепи устройства, способного создавать и поддерживать разности потенциалов на участках цепи за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются *источниками постоянного тока*. Силы неэлектростатического происхождения, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются *сторонними силами*. Природа сторонних сил может быть различной. В гальванических элементах или аккумуляторах они возникают в результате электрохимических процессов, в генераторах постоянного тока сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле. Источник тока в электрической цепи играет ту же роль, что и насос, который необходим для перекачки жидкости в замкнутой гидравлической системе.

Скорость направленного движения частиц в проводниках зависит от материала проводника, массы и заряда частиц, окружающей температуры, приложенной разности потенциалов и составляет величину, намного меньшую скорости света. За 1 с электроны в проводнике перемещаются за счет упорядоченного движения меньше чем на 0,1мм. Несмотря на это, скорость распространения собственно электрического тока равна скорости света, то есть скорости распространения фронта электромагнитной волны.

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.

За направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов.

При этом, если единственными носителями тока являются отрицательно заряженные частицы (например, электроны в металле), то направление тока противоположно направлению движения электронов.

Электрический ток в проводниках представляет собой:

- *в металлах* – направленное движение электронов (проводники первого рода);

- в электролитах – направленное движение положительных и отрицательных ионов (проводники второго рода);
- в плазме – направленное движение электронов и ионов обоих знаков (проводники третьего рода),
- в полупроводниках – направленное движение электронов и дырок.

Движение заряженных частиц внутри проводника нельзя наблюдать, но судить о наличии электрического тока можно по его действиям:

- тепловому – проводник с током нагревается;
- магнитному – вокруг проводника с током возникает магнитное поле;
- световому – проводник с током может светиться;
- химическому – в проводнике с током изменяется химический состав (такие проводники называются проводниками второго класса).

Для продолжительного существования электрического тока в замкнутой цепи необходимо выполнение следующих условий:

- наличие свободных заряженных частиц (носителей тока);
- наличие электрического поля, силы которого, действуя на заряженные частицы, заставляют их двигаться упорядоченно;
- наличие источника тока, внутри которого сторонние силы перемещают свободные заряды против электростатических (кулоновских) сил.

Количественными характеристиками электрического тока являются сила тока I и плотность тока \vec{j} .

Сила тока I – скалярная физическая величина, равная отношению заряда Δq , переносимого через поперечное сечение проводника (рис.1) за интервал времени Δt , к этому интервалу времени (первая производная от заряда по времени):

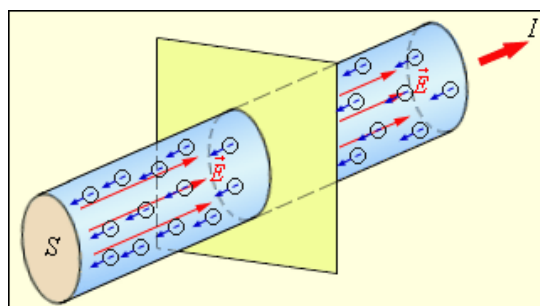


Рис. 1. Упорядоченное движение электронов в металлическом проводнике. I и S – ток и площадь поперечного сечения проводника, \vec{E} – напряжённость электрического поля.

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}, (\text{A}).$$

В Международной системе единиц (СИ) сила тока измеряется в **амперах** (А). Единица измерения тока 1А устанавливается по магнитному взаимодействию двух параллельных проводников с током.

Плотностью тока называется вектор \vec{j} , модуль которого равен отношению силы тока, протекающего через некоторую площадку, перпендикулярную направлению тока, к величине этой площадки, а направление вектора совпадает с направлением движения положительного заряда в токе:

$$j = \frac{I}{S}, (\text{A}/\text{M}^2).$$

Различают *переменный* (англ. *alternating current, AC*) и *постоянный* (англ. *direct current, DC*) токи.

Постоянный ток – ток, направление и величина которого не меняется во времени.

Переменный ток – это ток, направление и величина которого меняется во времени.

Раздел физики, изучающий течение электрического тока в различных средах, называется *электродинамикой сплошных сред*.

В этой работе рассматривается постоянный ток.

1.2. Электрическая цепь постоянного тока

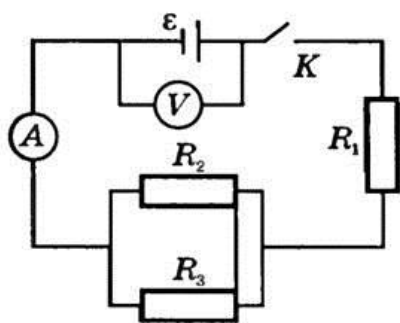


Рис. 2.

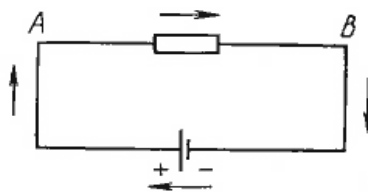


Рис. 3.

Электрическая цепь состоит из источника тока, потребителей электроэнергии, соединительных проводов и ключа, служащего для размыкания и замыкания цепи и других элементов (рис. 2).

Рисунки, на которых изображены способы соединения электрических приборов в цепь, называются *электрическими схемами*. Приборы на схемах обозначаются условными знаками.

Рассмотрим простейшую электрическую цепь постоянного тока, составленную из одного гальванического элемента и проводника (рис.3).

На внешнем участке цепи электрические заряды движутся под действием сил электрического поля. Перемещение зарядов внутри проводника не приводит к выравниванию потенциалов всех точек

Код поля изменен

Код поля изменен

проводника, так как в каждый момент времени источник тока доставляет к одному концу электрической цепи точно такое же число заряженных частиц, какое из него перешло к другому концу внешней электрической цепи. Поэтому сохраняется неизменным напряжение между началом и концом внешнего участка электрической цепи; напряженность электрического поля внутри проводников в этой цепи отлична от нуля и постоянна во времени.

Цепь постоянного тока можно разбить на определенные участки. Те участки, на которых не действуют сторонние силы (то есть участки, не содержащие источников тока), называются *однородными*. Участки, включающие источники тока, называются *неоднородными*. При перемещении единичного положительного заряда по некоторому участку цепи работу совершают как электростатические (кулоновские), так и *сторонние силы*.

В общем случае электрическая цепь представляет собой совокупность источников тока, проводников и потребителей электроэнергии и включает:

- *узлы* – точки соединения трёх и более проводников;
- *контуры* – замкнутые пути из проводников. При этом каждый проводник может входить в несколько контуров;
- *ветви* – последовательное соединение элементов между двумя ближайшими узлами.

Подобная цепь называется разветвлённой.

1.3. Источник постоянного тока

Для того чтобы в проводнике существовал электрический ток длительное время, необходимо поддерживать неизменными условия, при которых возникает электрический ток.

Если в начальный момент времени потенциал точки A проводника выше потенциала точки B , то перенос положительного заряда q из точки A к точке B приводит к уменьшению разности потенциалов между ними. Чтобы разность потенциалов оставалась неизменной, необходимо точно такой же заряд q перенести из точки B в точку A .

Из точки A в точку B электрические заряды движутся под действием сил электрического поля. Перемещение их из точки B в точку A будет происходить в направлении против сил электрического поля. Такое перемещение заряда может осуществляться только под действием

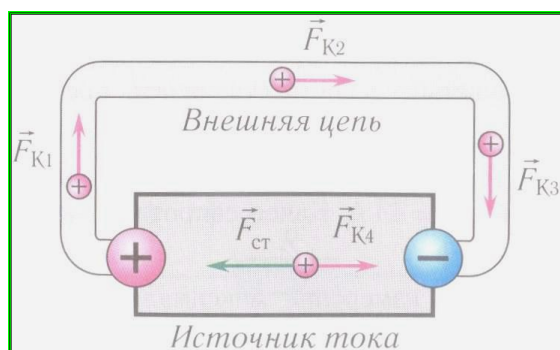


Рис. 4.

сил неэлектростатической природы, действующих в устройствах, называемых источниками постоянного тока (рис. 4). Для поддержания в цепи электрического тока необходимо, чтобы на концах ее существовала постоянная разность потенциалов $\varphi_A - \varphi_B$.

В источнике тока в процессе работы по разделению заряженных частиц происходит превращение механической, световой, внутренней и т.п. энергии в электрическую.

Разделенные частицы накапливаются на полюсах источника тока (места, к которым с помощью клемм или зажимов подсоединяют потребители). Один полюс источника тока заряжается положительно, другой — отрицательно. Между полюсами источника тока создается электростатическое поле. Если полюса источника тока соединить проводником, то в такой электрической цепи возникает электрический ток. При этом характер поля меняется, оно перестает быть электростатическим.

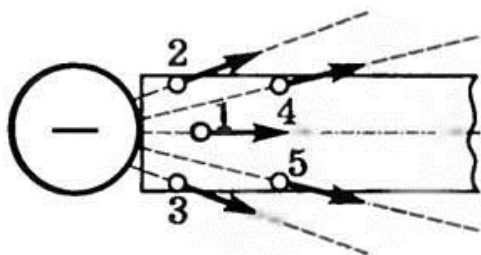


Рис. 5.

На рис. 5 схематично в виде сферического проводника изображена отрицательная клемма источника тока и сечение присоединенного к ней конца металлического провода. Пунктиром показаны некоторые линии напряженности поля клеммы до внесения в него провода, а стрелками — силы, действующие на свободные электроны провода, находящиеся в точках, помеченных цифрами. Электроны в различных точках поперечного сечения провода под действием кулоновских сил поля клеммы приобретают движение не только вдоль оси провода. Например, электрон, находящийся в точке 1, оказывается вовлеченным в "токовое" движение. Но вблизи точек 2, 3, 4, 5 электроны имеют возможность скапливаться на поверхности провода. Причем поверхностное распределение электронов по длине провода не будет равномерным. Следовательно, подключение провода к клемме источника тока приведет к тому, что некоторые электроны начнут двигаться вдоль провода, а часть электронов будет скапливаться на поверхности. Неравномерное распределение электронов на его поверхности обеспечивает неэквипотенциальность этой поверхности, наличие составляющих напряженности электрического поля, направленных вдоль поверхности проводника. Это поле перераспределенных электронов самого проводника и обеспечивает упорядоченное движение других электронов. Если распределение электронов по поверхности проводника с течением времени не изменяется, то такое поле называют *стационарным электрическим полем*. Таким образом, главную роль в создании стационарного электрического поля играют заряды, находящиеся на полюсах источника тока. При замыкании электрической цепи взаимодействие именно этих зарядов со свободными зарядами проводника приводит к появлению на всей поверхности проводника нескомпенсированных поверхностных зарядов. Именно эти заряды создают стационарное электрическое поле внутри проводника по всей его длине. Это поле внутри проводника однородное, и линии напряженности направлены вдоль оси проводника (рис. 6). Процесс установления электрического поля вдоль проводника происходит со скоростью $c \approx 3 \times 10^8 \text{ м/с}$.

Как и электростатическое поле, оно потенциально. Но между этими полями имеются существенные отличия:

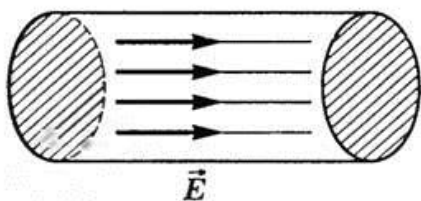


Рис. 6.

Электростатическое поле — поле неподвижных зарядов. Источником стационарного электрического поля являются движущиеся заряды, причем общее число зарядов и картина их распределения в данном пространстве с течением времени не изменяются;

Электростатическое поле существует вне

проводника. Напряженность электростатического поля всегда равна 0 внутри объема проводника, а в каждой точке внешней поверхности проводника направлена перпендикулярно к этой поверхности. Стационарное электрическое поле существует и вне и внутри проводника. Напряженность стационарного электрического поля не равна нулю внутри объема проводника, а на поверхности и внутри объема имеются составляющие напряженности, не перпендикулярные к поверхности проводника.

Потенциалы разных точек проводника, по которому проходит постоянный ток, разные (поверхность и объем проводника не эквипотенциальны). Потенциалы всех точек поверхности проводника, находящегося в электростатическом поле, одинаковы (поверхность и объем проводника эквипотенциальны);

Электростатическое поле не сопровождается появлением магнитного поля, а стационарное электрическое поле сопровождается его появлением и неразрывно с ним связано.

Источники электрического тока могут быть различны по своей конструкции, но в любом из них совершается работа по разделению положительно и отрицательно заряженных частиц. Разделение зарядов происходит под действием *сторонних сил*. Сторонние силы действуют лишь внутри источника тока и могут быть обусловлены химическими процессами (аккумуляторы, гальванические элементы), действием света (фотоэлементы), изменяющимися магнитными полями (генераторы) и т.д. Любой источник тока характеризуют электродвижущей силой – ЭДС.

1.4. Сторонние силы

Постоянный электрический ток может быть создан только в замкнутой цепи, в которой свободные носители заряда циркулируют по замкнутым траекториям. Электрическое поле в разных точках такой цепи неизменно во времени. Следовательно, электрическое поле в цепи постоянного тока имеет характер «замороженного» электростатического поля. Но при перемещении электрического заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории, работа электрических сил равна нулю. Если цепи действуют только электростатические силы, постоянный ток возникнуть не может. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в электрической цепи устройства, способного создавать и поддерживать разности потенциалов на участках цепи за счет работы сил *неэлектростатического происхождения*.

Чтобы преодолеть кулоновское притяжение между зарядами противоположного знака, нужны силы. Академик И.Е.Тамм предложил называть их *сторонними силами*.

Сторонние силы – это силы неэлектростатического происхождения, способные поддерживать разность потенциалов на концах проводника.

Понятие «сторонние силы» – это некоторая абстракция, которая обозначает силы разной природы, выполняющие одну и ту же функцию – преобразование различных видов энергии в энергию электрическую.

Главной задачей сторонних сил является *генерация* электрической энергии, то есть *превращение* энергии различной природы (механической, химической, тепловой, оптической и пр.) в электрическую. Эта задача решается путем

перемещения электрически заряженных частиц *против* сил электростатического поля.

Если в проводнике создать электрическое поле и не принять мер для его поддержания, то, как было уже установлено, перемещение носителей заряда приведет очень быстро к тому, что поле внутри проводника исчезнет и, следовательно, ток прекратится. Для того чтобы поддерживать ток достаточно долго, нужно от конца проводника с меньшим потенциалом (носители тока предполагаются положительными) непрерывно отводить приносимые сюда током заряды, а к концу с большим потенциалом непрерывно их подводить. Т.е. необходимо осуществить круговорот зарядов, при котором они двигались бы по замкнутому пути (рис. 4). Циркуляция вектора напряженности электростатического поля, как известно равна нулю. Поэтому в замкнутой цепи наряду с участками, на которых положительные заряды движутся в сторону убывания потенциала, должны иметься участки, на которых перенос положительных зарядов происходит в направлении возрастания потенциала φ , т.е. против сил электростатического поля. Перемещение зарядов на этих участках возможно лишь с помощью сил не электростатического происхождения, называемых сторонними силами. Таким образом, для поддержания тока необходимы сторонние силы, действующие либо на всем протяжении цепи, либо на отдельных ее участках.

Природа сторонних сил может быть различной. Всякое устройство, в котором возникают сторонние силы, называется *источником электрического тока*. В гальванических элементах или аккумуляторах они возникают в результате электрохимических процессов, в генераторах постоянного тока сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле. Источник тока в электрической цепи играет ту же роль, что и насос, который необходим для перекачивания жидкости в замкнутой гидравлической системе. Под действием сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока *против* сил электростатического поля (рис. 4), благодаря чему в замкнутой цепи может поддерживаться постоянный электрический ток.

Сторонние силы можно охарактеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами. Эта работа складывается из работы, совершаемой против электрического поля внутри источника тока ($A_{ист}$) и работы, совершаемой против сил сопротивления среды (A'), т.е. $A_{ст} = A_{ист} + A'$. Работа сторонних сил не может быть выражена через разность потенциалов, так как сторонние силы не потенциальные и их работа зависит от формы траектории. Так, например, работа сторонних сил при перемещении заряда между клеммами тока вне самого источника равна нулю.

1.5. Внутреннее сопротивление источника тока

В электрической цепи, состоящей из источника тока и проводников с электрическим сопротивлением R , электрический ток совершает работу не только на внешнем, но и на внутреннем участке цепи. Например, при подключении лампы накаливания к гальванической батарее карманного фонаря электрическим током нагреваются не только спираль лампы и подводящие провода, но и сама батарея. *Электрическое сопротивление источника тока называется внутренним сопротивлением*. В электромагнитном генераторе

внутренним сопротивлением является электрическое сопротивление провода обмотки генератора. На внутреннем участке электрической цепи выделяется количество теплоты, равное:

$$Q_{\text{вн}} = I^2 r \Delta t,$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока. Полное количество теплоты, выделяющееся при протекании постоянного тока в замкнутой цепи, внешний и внутренний участки которой имеют сопротивления, соответственно равные R и r , равно:

$$Q_{\text{полн}} = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t = I^2 (R + r) \Delta t.$$

1.6. Электродвижущая сила

Полная работа сил электростатического поля при движении зарядов по замкнутой цепи постоянного тока равна нулю. Под действием сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока *против* сил электростатического поля, благодаря чему в замкнутой цепи может поддерживаться постоянный электрический ток. При перемещении электрических зарядов по цепи постоянного тока сторонние силы, действующие внутри источников тока, совершают работу.

Следовательно, вся работа электрического тока в замкнутой электрической цепи оказывается совершенной за счет действия сторонних сил, вызывающих разделение зарядов внутри источника и поддерживающих постоянное напряжение на выходе источника тока. *Электродвижущая сила (ЭДС) – характеристика способности сторонних сил создавать большую или меньшую разность потенциалов на полюсах источника тока, величина скалярная.*

Физическая величина, равная отношению работы $A_{\text{ст}}$ сторонних (не потенциальных) сил при перемещении положительного электрического заряда q вдоль всей цепи (включая и источник тока) к величине этого заряда, называется электродвижущей силой источника (ЭДС):

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

Электродвижущая сила выражается в СИ тех же единицах, что и напряжение или разность потенциалов, т. е. в *вольтах* (В).

При перемещении единичного положительного заряда по замкнутой цепи постоянного тока работа сторонних сил равна сумме ЭДС, действующих в этой цепи, а работа электростатического поля равна нулю.

Стороннюю силу $\vec{F}_{\text{ст}}$, действующую на заряд, можно представить в виде:

$$\vec{F}_{\text{ст}} = \vec{E}^* q.$$

Векторную величину \vec{E}^* называют напряженностью поля сторонних сил. Работу сторонних сил над зарядом q на всём протяжении замкнутой цепи можно выразить следующим образом:

$$A = \oint_L \vec{F}_{\text{ст}} d\vec{l} = q \oint_L \vec{E}^* d\vec{l}$$

Разделив эту работу на q , получим эдс, действующую в цепи:

$$\varepsilon = \oint \vec{E}^* d\vec{l}$$

Таким образом, ЭДС, действующая в замкнутой цепи, может быть определена как циркуляция вектора напряженности поля сторонних сил.

Последнее выражение дает самое общее определение ЭДС и пригодно для любых случаев. Если известно, какие силы вызывают движение зарядов в данном источнике, то всегда можно найти напряженность поля сторонних сил и вычислить ЭДС источника.

Для участка цепи электродвижущая сила, действующая на некотором участке 1 – 2, очевидно равна:

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 \vec{E}^* d\vec{l}.$$

Кроме сторонних сил на заряд действуют силы электростатического поля:

$$\vec{F}_E = q\vec{E}.$$

Следовательно, результирующая сила, действующая в каждой точке цепи на заряд q , равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{ст}} + \vec{F}_E = q(\vec{E}^* + \vec{E}).$$

Работа, совершаемая этой силой над зарядом q на участке цепи 1 – 2, дается выражением:

$$A_{1-2} = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} + q \int_1^2 \vec{E}^* d\vec{l} = q\varepsilon_{1-2} + q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Для замкнутой цепи работа электростатических сил равна нулю, так что:

$$A = q\varepsilon.$$

Величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется падением напряжения или просто напряжением U на данном участке цепи. Из уравнения: $A_{1-2} = q\varepsilon_{1-2} + q(\varphi_1 - \varphi_2)$ следует, что:

$$U_{1-2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{1-2}.$$

При отсутствии сторонних сил напряжение U совпадает с разностью потенциалов:

$$U_{1-2} = (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Работа против сил электрического поля, по определению равна:

$$A_{\text{ист}} = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Если полюсы источника разомкнуты, то $A' = 0$ и тогда:

$$\varepsilon = (\varphi_1 - \varphi_2),$$

т.е. эдс источника тока при разомкнутой внешней цепи равна разности потенциалов, которая создается на его полюсах. Таким образом, размерность

εds совпадает с размерностью потенциала. Поэтому ε измеряется в тех же единицах, что и φ – в вольтах.

ЭДС величина алгебраическая. Если внутри источника ток идёт от «–» к «+» (направление тока на участке совпадает внутри источника с направлением от отрицательного полюса к положительному), т.е. ЭДС способствует движению положительных зарядов в данном направлении (рис. 7 а), то напряжённость поля

сторонних сил совпадает по направлению с током на участке цепи, и $\varepsilon > 0$; если ток внутри источника идёт от «+» к «–» (рис. 7 б), $\varepsilon < 0$.

Таким образом, ЭДС контура равна алгебраической сумме ЭДС каждого источника, а ЭДС источника равна разности потенциалов на его полюсах при разомкнутой внешней цепи.

Физическая природа электродвижущих сил в разных источниках различна.

Пример. Пусть имеется металлический диск радиуса R (рис. 8), вращающийся с угловой скоростью ω . Диск включен в электрическую цепь при помощи скользящих контактов, касающихся оси диска и его окружности.

Центростремительная сила $F_{ц} = m r \omega^2$, где m – масса электрона; r – расстояние от оси диска. Эта сила действует на электрон и поэтому $E_{ст} = \frac{F}{e} = \frac{m r \omega^2}{e}$, возникающая ЭДС равна:

$$\varepsilon = \int_0^R E_{ст} dr = (m \omega^2 / e) \int_0^R r dr = m \omega^2 R^2 / 2e.$$

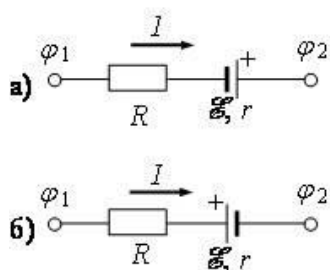


Рис. 7.

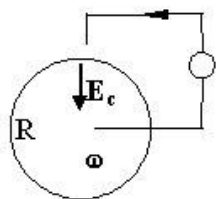


Рис. 8.

1.7. Соединение источников тока

Источники тока соединить в батарею можно также двумя способами: параллельным и последовательным

Параллельное соединение источников тока

Параллельное соединение источников тока первым способом, показано на рис. 9.

При параллельном способе соединения источников тока соединяют между собой все положительные и все отрицательные полюсы. Напряжение на разомкнутой батарее будет равно напряжению на каждом отдельном источнике, т. е. при параллельном способе соединения ЭДС батареи равна ЭДС одного источника. Сопротивление батареи при параллельном включении источников будет меньше сопротивления одного элемента, потому что в этом случае их проводимости суммируются.

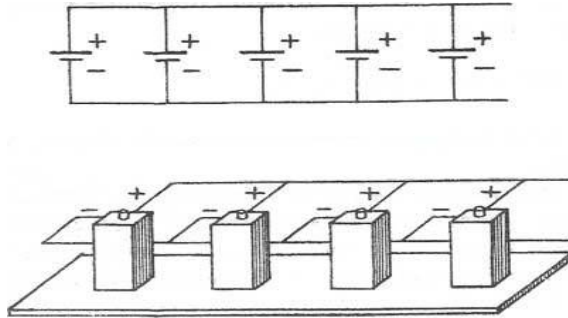


Рис. 9. Параллельное соединение источников тока

При соединении N источников тока с $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N$ и сопротивлениями r_1, r_2, \dots, r_N параллельно одноименными полюсами, если $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_N$, то:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_N \quad \frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_N}.$$

Последовательное соединение источников тока

При последовательном соединении источников тока (рис. 10) два соседних источника соединяются между собой противоположными полюсами.

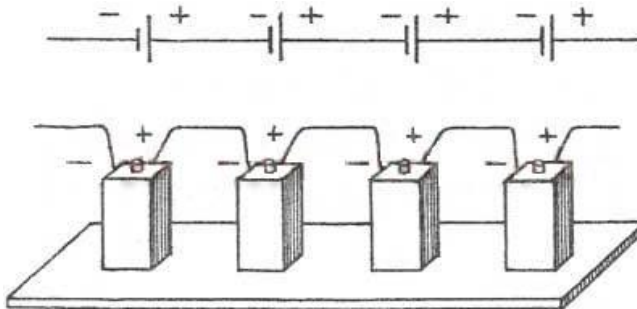


Рис. 10. Последовательное соединение источников тока

Разность потенциалов между положительным полюсом последнего источника и отрицательным полюсом первого будет равна сумме разностей потенциалов между полюсами каждого источника. Из этого вытекает, что при последовательном соединении ЭДС батареи равна сумме ЭДС источников, включенных в батарею. Общее сопротивление батареи при последовательном включении источников равняется сумме внутренних сопротивлений отдельных элементов.

При соединении N источников тока с $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N$ и сопротивлениями r_1, r_2, \dots, r_N последовательно:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \pm \varepsilon_2 \pm \dots \pm \varepsilon_N \quad r = r_1 + r_2 + \dots + r_N.$$

Параллельное соединение источников тока применяют тогда, когда нужно получить источник тока с малым внутренним сопротивлением или когда для нормальной работы потребителя электроэнергии в цепи должен протекать ток больший, чем допустимый ток одного источника. Параллельное соединение

выгодно, когда R невелико по сравнению с r . Иногда применяют смешанное соединение источников.

1.8. Напряжение на неоднородном участке цепи

Рассмотрим вначале однородный участок цепи (рис. 11, а). В этом случае



Рис. 11.

работу по перемещению заряда совершают только силы стационарного электрического поля, и этот участок характеризуют разностью потенциалов $\Delta\varphi$. Разность потенциалов на концах участка $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = A_K \cdot q$, где A_K – работа сил стационарного электрического поля. Т.о., напряжение на концах участка цепи совпадает с разностью потенциалов только в случае, если на этом участке нет ЭДС, т.е. на однородном участке цепи ($\varepsilon = 0$)

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

Уточним понятие напряжения для участка цепи. Напряженность \vec{E} поля в любой точке неоднородного участка цепи равна векторной сумме поля кулоновских сил и поля сторонних сил, т.е.

$$\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_{\text{ст.}}$$

Величина, численно равная работе по переносу единичного положительного заряда суммарным полем кулоновских и сторонних сил на участке цепи (1 – 2), называется **напряжением** на этом участке U_{12} .

Так как $\vec{E}_q d\vec{l} = -d\varphi$, или $\int_1^2 \vec{E}_q d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2$, тогда $U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2)$.

В электротехнике часто используют термин **падение напряжения** – изменение напряжения вследствие переноса заряда через сопротивление: $U = IR$.

Неоднородный участок цепи (рис. 9, б) содержит в отличие от однородного участка источник ЭДС, и к работе сил электростатического поля на этом участке добавляется работа сторонних сил:

$$A_{\text{ст.}} = q\varepsilon,$$

где ε – ЭДС источника тока этого участка цепи. По определению, $A_{\text{ст.}} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, где q – положительный заряд, который перемещается между любыми двумя точками цепи; $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов точек в начале и конце рассматриваемого участка. Тогда напряжение U на участке цепи представляет собой физическую скалярную величину, равную суммарной работе сторонних сил и сил электростатического поля по перемещению единичного положительного заряда на этом участке:

$$U = A_{\kappa}/q + A_{\text{ст.}}/q = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon. \quad (1)$$

Из этой формулы видно, что в общем случае напряжение на неоднородном участке цепи равно алгебраической сумме разности потенциалов и ЭДС на этом участке.

Если же на участке действуют только электрические силы ($\varepsilon = 0$), то:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Таким образом, только для однородного участка цепи понятия напряжения и разности потенциалов совпадают.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

Из выражения (1) следует закон Ома для неоднородного участка цепи (обобщенный закон Ома для участка цепи содержащей источник ЭДС):

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R}, \quad (2)$$

где R – общее сопротивление неоднородного участка.

Обобщенный закон Ома выражает закон сохранения энергии применительно к участку цепи постоянного тока. Он в равной мере справедлив как для пассивных участков (не содержащих ЭДС), так и для активных.

1.9. Закон Ома для замкнутой цепи

Замкнутая цепь (рис.12) состоит из двух частей – внутренней и внешней.

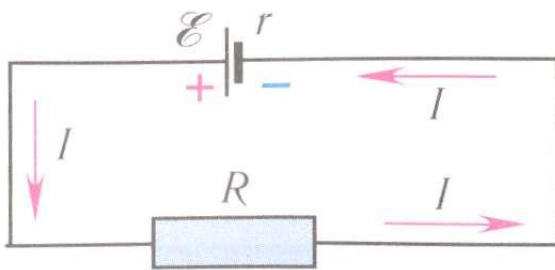


Рис.12.

Внутренняя часть цепи представляет собой источник тока, обладающий внутренним сопротивлением r ; внешняя – различные потребители, соединительные провода, приборы и т.д. Общее сопротивление внешней части

обозначается R . Тогда *полное сопротивление цепи* равно $(r + R)$.

Электрические носители во внешней цепи движутся от точки большего потенциала к точке меньшего потенциала. А так как ток I замкнут и представляет собой движение зарядов, которые нигде не накапливаются, то внутри источника тока заряды движутся от точки меньшего потенциала («–») к точке большего потенциала («+»).

По закону Ома для внешнего (однородного) участка цепи имеем:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = I \cdot R.$$

Внутренний участок цепи является неоднородным. Согласно закону Ома для неоднородного участка цепи:

$$\varphi_2 - \varphi_1 + \varepsilon = I \cdot r.$$

Сложив эти равенства, получим:

$$\varepsilon = I \cdot R + I \cdot r. \quad (3)$$

Из формулы (3) получаем:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}, \quad (4)$$

где: ε – ЭДС источника напряжения (В), I – сила тока в цепи (А), R – сопротивление всех внешних элементов цепи (Ом), r – внутреннее сопротивление источника напряжения (Ом).

Последняя формула (4) представляет собой закон Ома для замкнутой цепи постоянного тока:

Сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.

Формулу (3) можно представить в виде:

$$\varepsilon = I r + IR = U(r) + U(R), \quad (5)$$

где $U(r) = I r$ – напряжение на внутреннем участке цепи, $U(R) = IR$ – напряжение во внешней цепи.

То есть сумма падений напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока и на внешней цепи равна ЭДС источника.

Из формулы (5) следует:

$$\varepsilon = U + I r \Rightarrow U = \varepsilon - I r. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что напряжение на внешнем участке уменьшается с увеличением силы тока в цепи при $\varepsilon = const$.

Подставим в формулу (6) силу тока (4), получим:

$$U = \varepsilon [1 - r/(R + r)]. \quad (7)$$

Проанализируем выражение (7) для некоторых предельных режимов работы цепи.

а) При разомкнутой цепи ($R \rightarrow \infty$), $U = \varepsilon$, т.е. напряжение на полюсах источника тока при разомкнутой цепи равно ЭДС источника тока.

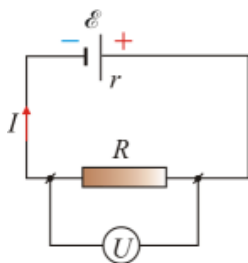


Рис. 13.

На этом основана возможность приблизительного измерения ЭДС источника тока с помощью вольтметра, сопротивление которого много больше внутреннего сопротивления источника тока ($R \gg r$). Для этого вольтметр подключают к клеммам источника тока (рис. 13). То есть, в этом случае всегда $U < \varepsilon$.

б) Если к клеммам источника тока подключить проводник, сопротивление которого $R \ll r$, то $R + r \approx r$, тогда $U = \varepsilon \left(1 - \frac{r}{r}\right) = 0$, а сила тока $I = \varepsilon/r$ – достигает максимального значения.

Подключение к полюсам источника тока проводника с ничтожно малым сопротивлением ($R = 0$) называется коротким замыканием, а максимальную для данного источника силу тока называют током короткого замыкания:

$$I_{\text{кз.}} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Сила тока короткого замыкания – максимальная сила тока, которую можно получить от данного источника с электродвижущей силой ε и внутренним сопротивлением r . У источников с малым внутренним сопротивлением ток короткого замыкания может быть очень велик и вызывать разрушение электрической цепи или источника. Например, у свинцовых аккумуляторов $r = 0,1 - 0,01$ Ом, используемых в автомобилях, сила тока короткого замыкания может составлять несколько сотен ампер. Особенно опасны короткие замыкания в осветительных сетях, питаемых от подстанций (тысячи ампер). Чтобы избежать разрушительного действия таких больших токов, в цепь включаются предохранители или специальные автоматы защиты сетей. В ряде случаев для предотвращения опасных значений силы тока короткого замыкания к источнику подсоединяется некоторое внешнее балластное сопротивление.

На рис.14 дано схематическое изображение источника постоянного тока с ЭДС равной ε и внутренним сопротивлением r в трех режимах: «холостой ход», работа на нагрузку и режим короткого замыкания (к.з.). Указаны напряженность \vec{E} электрического поля внутри батареи и силы, действующие на положительные заряды: $\vec{F}_{\text{эл}}$ – электрическая сила и $\vec{F}_{\text{ст}}$ – сторонняя сила. В режиме короткого замыкания электрическое поле внутри батареи исчезает.

Работа и мощность постоянного электрического тока на однородном участке цепи

Рассмотрим однородный участок цепи (рис. 11 а).

При протекании тока по однородному участку цепи электрическое поле совершает работу, называемую работой тока.

Работа тока – это работа электрического поля по переносу электрических зарядов вдоль проводника.

За время Δt по цепи протекает заряд $\Delta q = I \cdot \Delta t$. Электрическое поле на выделенном участке совершает работу:

$$A = \Delta q U = I U \Delta t = I^2 R \Delta t,$$

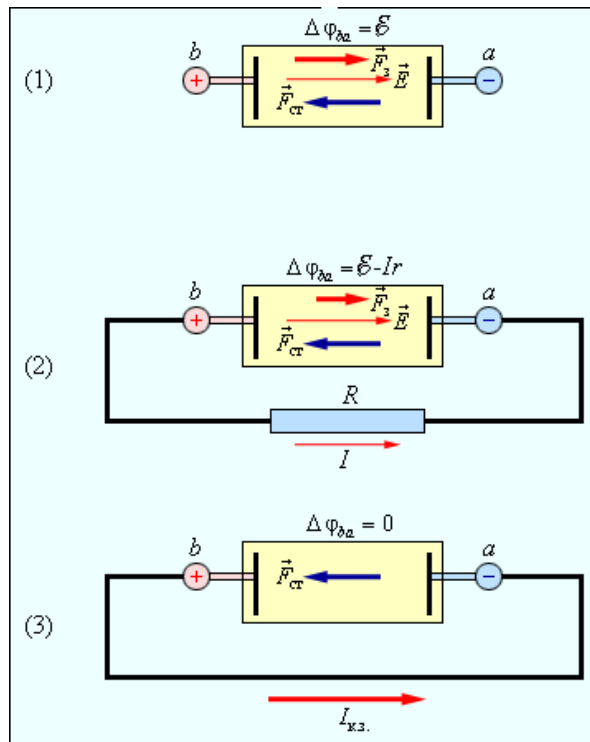


Рис. 14. Схематическое изображение источника постоянного тока:

- 1 – батарея разомкнута;
- 2 – батарея замкнута на внешнее сопротивление R ;
- 3 – режим короткого замыкания.

где $U = \Delta\varphi_{12}$ – напряжение.

Это соотношение выражает закон сохранения энергии для однородного участка цепи: работа равна изменению энергии участка цепи, поэтому выделяемая проводником энергия равна работе тока.

Мощность электрического тока равна отношению работы тока A ко времени Δt , за которое эта работа совершена:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Работа электрического тока в СИ выражается в *джоулях* (Дж), мощность – в *ваттах* (Вт). Существует внесистемная единица работы тока: $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

1.10. Закон Джоуля – Ленца

Если на участке цепи под действием электрического поля не совершается механическая работа и не происходят химические превращения веществ, то работа электрического поля приводит только к нагреванию проводника. При

этом работа электрического тока равна количеству теплоты, выделяемому проводником с током:

$$Q = I^2 R \Delta t. \quad (8)$$

Работа ΔA электрического тока I , протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением R , преобразуется в тепло Q , выделяющееся на проводнике.

Закон (8) был экспериментально установлен английским ученым Джеймсом Джоулем (1818 – 1889) и русским ученым Эмилием Христиановичем Ленцем (1804 – 1865), поэтому носит название *закона Джоуля – Ленца*.

1.11. Работа и мощность постоянного тока в замкнутой цепи

Рассмотрим теперь полную (замкнутую) цепь постоянного тока, состоящую из источника с электродвижущей силой ε и внутренним сопротивлением r и внешнего однородного участка с сопротивлением R , т.е. неоднородный участок цепи (рис. 12). Закон Ома для замкнутой цепи записывается в виде:

$$I(R + r) = \varepsilon.$$

Умножив обе части этой формулы на $\Delta q = I \Delta t$, мы получим соотношение, выражающее закон сохранения энергии для полной цепи постоянного тока:

$$RI^2 \Delta t + rI^2 \Delta t = \varepsilon I \Delta t = \Delta A_{\text{ст.}}$$

Первый член в левой части $\Delta Q = RI^2 \Delta t$ – тепло, выделяющееся на внешнем участке цепи за время Δt , второй член $\Delta Q_{\text{ист}} = rI^2 \Delta t$ – тепло, выделяющееся внутри источника за то же время.

Выражение $\varepsilon I \Delta t$ равно работе сторонних сил $\Delta A_{\text{ст.}}$, действующих внутри источника.

При протекании электрического тока по замкнутой цепи работа сторонних сил $\Delta A_{\text{ст.}}$ преобразуется в тепло, выделяющееся во внешней цепи (ΔQ) и внутри источника ($\Delta Q_{\text{ист}}$).

$$\Delta Q + \Delta Q_{\text{ист}} = \Delta A_{\text{ст}} = \varepsilon I \Delta t.$$

Следует обратить внимание, что в это соотношение не входит работа электрического поля. При протекании тока по замкнутой цепи электрическое поле работы не совершает; поэтому *тепло производится одними только сторонними силами*, действующими внутри источника. Роль электрического поля сводится к перераспределению тепла между различными участками цепи.

Внешняя цепь может представлять собой не только проводник с сопротивлением R , но и какое-либо устройство, потребляющее мощность, например, электродвигатель постоянного тока. В этом случае под R нужно понимать *эквивалентное сопротивление нагрузки*. Энергия, выделяемая во внешней цепи, может частично или полностью преобразовываться не только в тепло, но и в другие виды энергии, например, в механическую работу,

совершаемую электродвигателем. Поэтому вопрос об использовании энергии источника тока имеет большое практическое значение.

Рассмотрим также замкнутую электрическую цепь, с точки зрения развиваемой источником мощности. Как известно, мощность, выделяемая в виде тепла при прохождении электрического тока через сопротивление, определяется законом Джоуля–Ленца:

$$P_{\text{полезн}} = I^2 \cdot R = U \cdot I. \quad (9)$$

Соотношение (9) определяет *полезную мощность, развиваемую источником на внешнем сопротивлении R*.

Полезной по отношению к источнику мощностью $P_{\text{пол.}}$ считается мощность, расходуемая источником во внешней цепи, т.е. на внешней нагрузке.

Аналогичное соотношение, но с сопротивлением r ; ($P = I^2 r$) – определяет мощность, выделяющуюся в виде тепла на внутреннее сопротивление источника.

С учетом закона Ома для участка цепи $I = UR$ полезную мощность можно найти, если известны любые две величины из трех: I, U, R .

$$P_n = U \cdot I, \quad P_n = I^2 \cdot R, \quad P_n = U^2 / R.$$

Полная мощность (т.е. работа, совершаемая сторонними силами за единицу времени) является суммой полезной мощности и мощности, выделяющейся на внутреннее сопротивление:

$$P_{\text{полн}} = I^2 \cdot R + I^2 \cdot r = I^2 \cdot (R + r) = \varepsilon \cdot I = \frac{\varepsilon^2}{R+r}. \quad (10)$$

Полная мощность $P_{\text{полн}}$ - мощность расходуется источником во внешней и внутренней по отношению к источнику частях цепи.

Мощность $P_{\text{пот.}} = I^2 \cdot r$ - мощность, бесполезно расходуемая внутри источника – мощность потерь.

Тогда полезная мощность может быть так же представлена в виде:

$$P = RI^2 = \varepsilon I - rI^2 = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}$$

Если ток внутри ЭДС противоположен направлению градиента потенциала (течёт внутри ЭДС от плюса к минусу), то мощность поглощается источником ЭДС из сети (например, при работе электродвигателя или заряде аккумулятора), если сонаправлен (течёт внутри ЭДС от минуса к плюсу), то отдаётся источником в сеть (скажем, при работе гальванической батареи или генератора). При учёте внутреннего сопротивления источника ЭДС выделяемая на нём мощность $P = I^2 \cdot r$ прибавляется к поглощаемой или вычитается из отдаваемой.

Для измерения электрической мощности применяются *ваттметры и варметры*, можно также использовать косвенный метод, с помощью вольтметра и амперметра.

Для измерения коэффициента реактивной мощности применяют фазометры.

Государственный эталон – ГЭТ 153-2012 Государственный первичный эталон единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц. Институт-хранитель: ВНИИМ.

1.12. КПД источника тока

Коэффициент полезного действия (КПД) источника постоянного тока равен:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{U \cdot I}{\varepsilon \cdot I} = \frac{U}{\varepsilon}. \quad (11)$$

Используя соотношения (10), (11) можно показать, что

$$P_{\text{полн}} = \varepsilon^2 \frac{1}{(R+r)}; \quad P_{\text{полезн}} = \varepsilon^2 \frac{R}{(R+r)^2}; \quad \eta = \frac{R}{(R+r)^2}. \quad (12)$$

Полная мощность, развиваемая источником тока, достигает максимума в режиме короткого замыкания, т.е. при $R = 0$. В этом случае вся тепловая мощность выделяется внутри источника тока на его внутренне сопротивление. С ростом внешнего сопротивления полная мощность уменьшается, асимптотически приближаясь к нулевому значению.

Полезная мощность изменяется в зависимости от внешнего сопротивления более сложным образом. Действительно, из формулы (12) следует, что $P_{\text{полезн}} = 0$ при крайних значениях внешнего сопротивления: при $R = 0$ и $R \rightarrow \infty$. Таким образом, максимум полезной мощности должен приходиться на промежуточные значения внешнего сопротивления.

Величину внешнего сопротивления, соответствующую максимуму полезной мощности, можно найти, используя метод дифференциального исчисления. Можно показать, что максимум полезной мощности соответствует $R = r$, т.е. равенству внешнего и внутреннего сопротивлений.

Чтобы убедиться в этом возьмем производную от $P_{\text{полезн}}$ по внешнему сопротивлению R :

$$\frac{dP_{\text{полезн}}}{dR} = \frac{\varepsilon^2}{(R+r)^2} = [(R+r)^2 - 2(R+r)R] = [\varepsilon^2 / (R+r)^2] \cdot (r^2 - R^2).$$

По условию максимума требуется $\frac{dP_{\text{полезн}}}{dR} = 0$, откуда $R = r$.

Определив знак второй производной, легко убедиться, что это действительно условие максимума.

В электротехнике режим максимальной полезной мощности называется режимом согласования источника тока с его нагрузкой.

На рис. 15 графически представлены зависимости мощности источника $P_{\text{ист}}$ (полной мощности), полезной мощности P , выделяемой во внешней цепи, и коэффициента полезного действия η от тока в цепи I для источника с ЭДС, равной ε , и внутренним сопротивлением r . Ток в цепи может изменяться в пределах от $I = 0$ (при $R = \infty$) до $I = I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}$ (при $R = 0$).

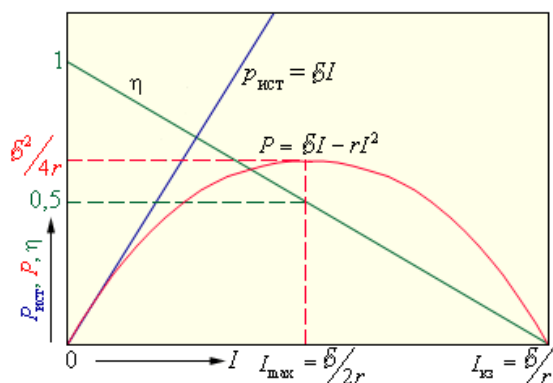


Рис. 15.

Зависимость мощности источника $P_{\text{ист}}$,
мощности во внешней цепи P
и КПД источника η от силы тока.

Из приведенных графиков видно, что максимальная мощность во внешней цепи P_{max} , равная: $P_{\text{max}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$, достигается при $R = r$. При этом ток в цепи: $I_{\text{max}} = \frac{1}{2} I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{2r}$, а КПД источника равен $\eta = 50\%$.

Максимальное значение КПД источника η_{max} достигается при $I \rightarrow 0$, т.е. при $R \rightarrow \infty$.

В случае короткого замыкания полезная мощность $P = 0$ и вся мощность выделяется внутри источника, что может привести к его перегреву и разрушению. КПД источника при этом обращается в нуль: $\eta = 0$.

1.13. Дифференциальные выражения для электрической мощности

Мощность, выделяемая в единице объёма, равна:

$$\omega = \frac{dP}{dV} = \vec{E} \cdot \vec{j} \quad (13),$$

где ω – объемная плотность тепловой мощности тока, \vec{E} – вектор напряжённости электрического поля, \vec{j} – вектор плотности тока. Отрицательное значение скалярного произведения означает, что в данной точке электрическая мощность не рассеивается, а генерируется за счёт работы сторонних сил. Выражение (13) называется *законом Джоуля - Ленца в дифференциальной форме*.

В линейном изотропном приближении:

$$\omega = \sigma E^2 = \frac{E^2}{\rho} = \rho j^2 = \frac{j^2}{\sigma},$$

где $\sigma = 1/\rho$ – удельная проводимость, величина, обратная удельному сопротивлению.

Пример: Мощность некоторых электрических приборов

В таблице указаны значения мощности некоторых потребителей электрического тока:

Электрический прибор	Мощность, Вт
Лампочка фонарика	1
Лампа люминесцентная бытовая	5...30

Лампа накаливания бытовая	25...150
Холодильник бытовой	15...700
Электропылесос	100...2 000
Электрический утюг	300...2 000
Стиральная машина	350...2 000
Электрическая плитка	1 000...2 000
Сварочный аппарат бытовой	1 000...5 500
Двигатель трамвая	45 000...50 000
Двигатель электровоза	650 000

Большинство бытовых приборов рассчитаны на напряжение 220 В, но на разную силу тока. Поэтому мощность потребителей электроэнергии разная.

1.14. Требования к линиям электропередач

Одним из важнейших требований к линиям электропередач (ЛЭП) является уменьшение потерь при доставке энергии потребителю. Эти потери в настоящее время заключаются в нагреве проводов, то есть переходе энергии тока в тепловую энергию, за что ответственно омическое сопротивление проводов. Иными словами задача состоит в том, чтобы довести до потребителя как можно более значительную часть мощности источника тока $P = \varepsilon I$ при минимальных потерях мощности в линии передачи $P(r) = UI$, где $U = Ir$, причём r на этот раз есть суммарное сопротивление проводов и внутреннего сопротивления генератора, (последнее всё же меньше сопротивления линии передач).

В таком случае потери мощности будут определяться выражением:

$$P(r) = \frac{P^2 r}{\varepsilon^2}.$$

Отсюда следует, что при постоянной передаваемой мощности её потери растут прямо пропорционально длине ЛЭП и обратно пропорционально квадрату ЭДС. Таким образом, желательно всемерное её увеличение, что ограничивается электрической прочностью обмотки генератора. И повышать напряжение на входе линии следует уже после выхода тока из генератора, что для постоянного тока является проблемой. Однако, для переменного тока эта задача много проще решается с помощью использования трансформаторов, что и предопределило повсеместное распространение ЛЭП на переменном токе. Однако при повышении напряжения в ней возникают потери на коронирование и возникают трудности с обеспечением надёжности изоляции от земной поверхности. Поэтому, наибольшее, практически используемое, напряжение в дальних ЛЭП не превышает миллиона вольт.

Кроме того, любой проводник, как показал Максвелл, при изменении силы тока в нём, излучает энергию в окружающее пространство, и потому ЛЭП ведёт себя как антенна, что заставляет в ряде случаев наряду с омическими потерями брать в расчёт и потери на излучение.

2. Теория лабораторной работы

На рис. 16 представлена цепь постоянного тока, где r – внутреннее сопротивление источника тока, ε – электродвижущая сила, а R – сопротивление нагрузки.

Полная электрическая мощность, выделяемая в цепи, складывается из мощностей, выделяемых во внешней и во внутренней частях цепи:

$$P_{\text{полн}} = I^2 R + I^2 r = I^2 (R + r).$$

Так как $I(R + r) = \varepsilon$, то:

$$P_{\text{полн}} = \varepsilon^2 / (R + r). \quad (14)$$

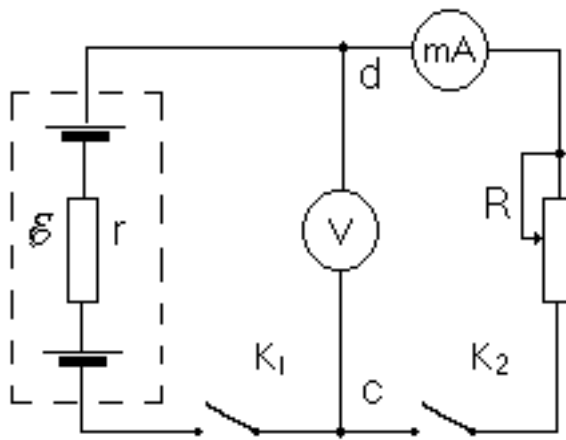


Рис. 16.

Эта мощность выделяется за счет работы сторонних сил источника тока.

По закону Ома сила тока в цепи: $I = \varepsilon / (R + r)$ и достигает максимального значения при $R = 0$ (ток короткого замыкания):

$$I_{\text{к.з.}} = \varepsilon / r.$$

С ростом R , сила тока I стремится к нулю. Наибольшего значения мощность достигает при токе короткого замыкания.

Мощность во внешней цепи (полезная мощность) $P_{\text{полезн.}}$ равна:

$$P_{\text{полезн.}} = I^2 R = \left[\frac{\varepsilon^2}{(R+r)^2} \right] R. \quad (15).$$

Наибольшего значения $P_{\text{полезн.}}$ достигает при $R = r$.

В этом случае:

$$P_{\text{полезн.макс}} = (\varepsilon^2 / 4) \cdot r = (1/4) P_{\text{к.з.}}$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P_{\text{полезн.}} / P_{\text{полн}} = R / (R + r). \quad (16)$$

При неограниченном возрастании R , коэффициент полезного действия стремится к 1.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Ознакомиться с работой схемы (рис.16).
2. Замкнуть ключ K_1 (K_2 – разомкнут).

Строго говоря, вольтметр покажет разность потенциалов между точками с и d:

$$U_B = \varepsilon - I_B R_B = [\varepsilon / (R + r)] \cdot r,$$

где U_B – показания вольтметра, I_B, R_B соответственно ток через вольтметр и его сопротивление. Однако, при большом R_B , показания вольтметра будут мало отличаться от ε , т.е. U_B приблизительно равно ε : $U_B \cong \varepsilon$.

3. Установить на магазине сопротивлений $R = 0$ и замкнуть K_2 . Амперметр покажет ток короткого замыкания $I_{к.з.}$. Зная ε , вычислить внутреннее сопротивление источника тока: $r = \varepsilon/I_{к.з.}$
4. Изменяя сопротивление нагрузки R (см. п. 5), значения тока и напряжения занести в таблицу 1 (не менее 20 - 24 измерений).

Таблица 1.

$\varepsilon =$ _____, В; $I =$ _____, А; $r =$ _____, Ом.

№ измерения	$R, \text{ Ом}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$P_{\text{полн.}}, \text{ Вт}$	$P_{\text{полезн.}}, \text{ Вт}$	η
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						

24						
----	--	--	--	--	--	--

5. С целью получения точных результатов рекомендуется изменять значение R на магазин со следующим шагом ΔR :

В диапазоне от 0 до $2r$ сопротивление R на магазине следует изменять с шагом $R = 4 \text{ Ом}$. В интервале R близком к r изменение $R = 1 \div 1,5 \text{ (Ом)}$. В интервале $R > 2r$ изменение $R = r \text{ (Ом)}$.

6. Обесточить установку.

7. По результатам измерения R, U, I вычислить по формулам (14), (15), (16) значения $P_{\text{полн.}}$, $P_{\text{полезн.}}$ и η .

8. Построить зависимости $P_{\text{полн.}} = f(R)$, $P_{\text{полезн.}} = \varphi(R)$ и $\eta = F(R)$, откладывая значения R по оси абсцисс (рис.17).

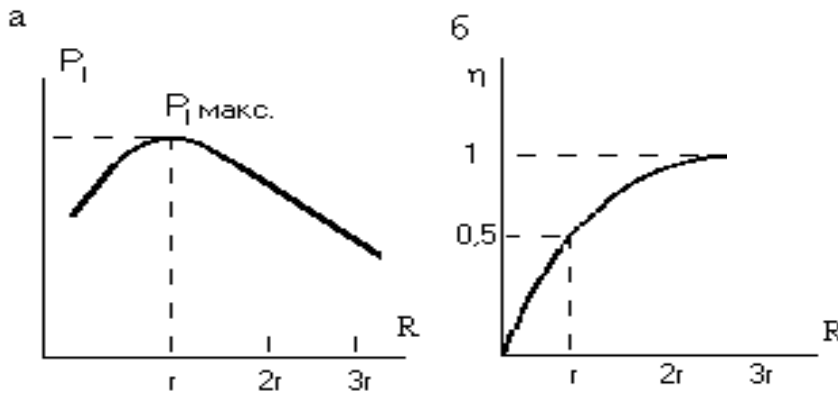


Рис.17.

9. Произвести соответствующие расчёты по формулам и экспериментальное определение искомых величин по графику (табл. 2).

Таблица 2

Расчёт по формулам	Эксперимент (по графику)
$r =$, Ом	$r =$, Ом
$I_{\text{max.}} = \varepsilon / 2r =$, А	-
$U_{\text{max}} = \varepsilon / 2 =$, В	-
$P_{\text{max.}} = \varepsilon \cdot I_{\text{max}} =$, Вт	$P_{\text{max.}} =$, Вт
$P_{\text{полн.}} = \varepsilon^2 / 4r =$, Вт	-
$\eta_{\text{max.}} = 50$, %	$\eta_{\text{max.}} =$, %

10. Проанализировать результаты, сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Согласно обозначениям
2. Согласно обозначениям на шкалах электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, указать назначение прибора, тип тока, безопасность, класс точности, систему измерительного механизма, рабочее положение при эксплуатации.
3. По классу точности электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, вычислить их абсолютную (инструментальную) погрешность и указать к какой группе приборов (прецизионным, техническим или внеклассовым) они относятся.
4. Какие силы называются сторонними? Привести примеры таких сил.
5. Какой участок цепи называется неоднородным?
6. Что называется ЭДС? Единица её измерения.
7. Напряжение на неоднородном участке цепи?
8. Закон Ома для неоднородного участка цепи.
9. Какую физическую величину (эдс или напряжение) измерит вольтметр, подключённый к зажимам источника тока,
– при разомкнутой внешней цепи?
– при замкнутой внешней цепи?
10. Что называется полезной, полной мощностью и мощностью потерь электрической цепи?
11. Выведите выражение для полной и полезной мощности в цепи постоянного тока.
12. При каком значении сопротивления нагрузки полезная мощность максимальна? Чему равны при этом максимальная мощность P_{max} , максимальный ток I_{max} и КПД источника тока?
13. При каком условии КПД источника тока максимально ($\eta = \eta_{max}$)?

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПРИ ПОМОЩИ МОСТА УИТСТОНА

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: изучить работу мостовой схемы измерения сопротивлений, измерить электрическое сопротивление проводников по отдельности, затем при их параллельном и последовательном соединении.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Источник напряжения	–	–	–	–
2	Реохорд	–			
3	Измеряемые сопротивления	–	–	–	–
4	Магазин сопротивлений	-			
5	Гальванометр	-	-	-	-

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. *Электрический ток*

Если изолированный проводник поместить в электрическое поле напряжённостью (\vec{E}), то на свободные заряды q в проводнике будет действовать кулоновская сила $\vec{F} = q\vec{E}$. В результате в проводнике возникает кратковременное перемещение свободных зарядов. Этот процесс закончится тогда, когда собственное электрическое поле зарядов, возникших на поверхности проводника, не скомпенсирует полностью внешнее поле.

Результирующее электростатическое поле внутри проводника равно нулю. Однако в проводниках может при определенных условиях, возникнуть *непрерывное упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда*. Такое движение называется *электрическим током*.

Электрическое поле может быть создано, например, двумя разноименно заряженными телами. Соединя проводником разноименно заряженные тела, можно получить электрический ток, протекающий в течение короткого интервала времени. Постоянный электрический ток может быть создан только в замкнутой цепи, в которой свободные носители заряда циркулируют по замкнутым траекториям. Электрическое поле в разных точках такой цепи неизменно во времени. Следовательно, электрическое поле в цепи постоянного тока имеет характер «замороженного» электростатического поля. Но при перемещении электрического заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории, работа электрических сил равна нулю. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в электрической цепи устройства, способного создавать и поддерживать разности потенциалов на участках цепи за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются *источниками постоянного тока*. Силы неэлектростатического происхождения, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются *сторонними силами*. Природа сторонних сил может быть различной. В гальванических элементах или аккумуляторах они возникают в результате электрохимических процессов, в генераторах постоянного тока сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле. Источник тока в электрической цепи играет ту же роль, что и насос, который необходим для перекачки жидкости в замкнутой гидравлической системе.

Скорость направленного движения частиц в проводниках зависит от материала проводника, массы и заряда частиц, окружающей температуры, приложенной разности потенциалов и составляет величину, намного меньшую скорости света. За 1с электроны в проводнике перемещаются за счет упорядоченного движения меньше чем на 0,1мм. Несмотря на это, скорость распространения собственно электрического тока равна скорости света, то есть скорости распространения фронта электромагнитной волны.

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.

За направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов.

При этом, если единственными носителями тока являются отрицательно заряженные частицы (например, электроны в металле), то направление тока противоположно направлению движения электронов.

Электрический ток в проводниках представляет собой:

- в *металлах* – направленное движение электронов (проводники первого рода);
- в *электролитах* – направленное движение положительных и отрицательных ионов (проводники второго рода);
- в *плазме* – направленное движение электронов и ионов обоих знаков (проводники третьего рода),
- в *полупроводниках* – направленное движение электронов и дырок.

Движение заряженных частиц внутри проводника нельзя наблюдать, но судить о наличии электрического тока можно по его действиям:

- *теловому* – проводник с током нагревается;
- *магнитному* – вокруг проводника с током возникает магнитное поле;
- *световому* – проводник с током может светиться;
- *химическому* – в проводнике с током изменяется химический состав (такие проводники называются проводниками второго класса).

Для продолжительного существования электрического тока в замкнутой цепи необходимо выполнение следующих условий:

- наличие свободных заряженных частиц (носителей тока);
- наличие электрического поля, силы которого, действуя на заряженные частицы, заставляют их двигаться упорядоченно;
- наличие источника тока, внутри которого сторонние силы перемещают свободные заряды против электростатических (кулоновских) сил.

Количественными характеристиками электрического тока являются *сила тока I* и *плотность тока \vec{j}* .

Сила тока I – скалярная физическая величина, равная отношению заряда Δq , переносимого через поперечное сечение проводника (рис.1) за интервал времени Δt , к этому интервалу времени (первая производная от заряда по времени):

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}, \text{ (A)}$$

Международной системе единиц (СИ) сила тока измеряется в **амперах (А)**. Единица измерения тока 1А устанавливается по магнитному взаимодействию двух параллельных проводников с током.

Плотностью тока называется вектор \vec{j} , модуль которого равен отношению силы тока, протекающего через некоторую площадку, перпендикулярную направлению тока, к величине этой площадки, а направление вектора совпадает с направлением движения положительного заряда в токе:

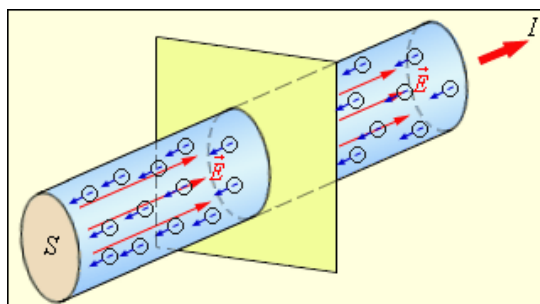


Рис. 1. Упорядоченное движение электронов в металлическом проводнике. I и S – ток и площадь поперечного сечения проводника, \vec{E} – напряжённость электрического поля.

$$j = \frac{I}{S}, (\text{А/м}^2).$$

Различают *переменный* (англ. *alternating current, AC*) и *постоянный* (англ. *direct current, DC*) токи.

Код поля изменен

Код поля изменен

Постоянный ток – ток, направление и величина которого не меняется во времени.

Переменный ток – это ток, направление и величина которого меняется во времени.

Раздел физики, изучающий течение электрического тока в различных средах, называется *электродинамикой сплошных сред*.

В этой работе рассматривается постоянный ток.

1.2. Электрическая цепь постоянного тока

Рассмотрим простейшую электрическую цепь постоянного тока, составленную из одного гальванического элемента и проводника (рис.2).

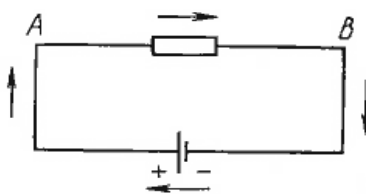


Рис. 2.

На внешнем участке цепи электрические заряды движутся под действием сил электрического поля. Перемещение зарядов внутри проводника не приводит к выравниванию потенциалов всех точек проводника, так как в каждый момент времени источник тока доставляет к одному концу электрической цепи точно такое же число заряженных частиц, какое из него перешло к

другому концу внешней электрической цепи. Поэтому сохраняется неизменным напряжение между началом и концом внешнего участка электрической цепи; напряжённость электрического поля внутри проводников в этой цепи отлична от нуля и постоянна во времени.

Цепь постоянного тока можно разбить на определенные участки. Те участки, на которых не действуют сторонние силы (то есть участки, не содержащие источников тока), называются *однородными*. Участки, включающие источники тока, называются *неоднородными*. При перемещении единичного положительного заряда по некоторому участку цепи работу совершают как электростатические (кулоновские), так и сторонние силы.

В общем случае электрическая цепь представляет собой совокупность источников тока, проводников и потребителей электроэнергии и включает:

- *узлы* – точки соединения трёх и более проводников;
- *контур* – замкнутые пути из проводников. При этом каждый проводник может входить в несколько контуров;
- *ветви* – последовательное соединение элементов между двумя ближайшими узлами.

Подобная цепь называется разветвлённой.

1.3. Электрическое сопротивление

Электрическое сопротивление R (э.с.) – физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать прохождению электрического тока, измеряется в Омах (Ом).

Э. с. обусловлено передачей или преобразованием электрической энергии в другие виды: при необратимом преобразовании электрической энергии (преимущественно в тепловую энергию) э. с. называется *активным сопротивлением*; э. с., обусловленное передачей энергии электрическому или магнитному полю (и обратно), называется *реактивным сопротивлением*.

Высокая электропроводность металлов связана с тем, что в них имеется большое количество носителей тока – *электронов проводимости*, образующихся из валентных электронов атомов металла, которые не принадлежат определённому атому. Электрический ток в металле возникает под действием внешнего электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Движущиеся под действием поля электроны рассеиваются на неоднородностях ионной решётки (на примесях, дефектах решётки, а также нарушениях периодической структуры, связанной с тепловыми колебаниями ионов). При этом электроны теряют импульс, а энергия их движения преобразуется во внутреннюю энергию кристаллической решётки, что и приводит к нагреванию проводника при прохождении по нему электрического тока.

В других средах (полупроводниках, диэлектриках, электролитах, неполярных жидкостях, газах и т. д.) в зависимости от природы носителей заряда физическая причина сопротивления может быть иной. Линейная зависимость, выраженная законом Ома, соблюдается не во всех случаях.

Сопротивление проводника при прочих равных условиях зависит от его геометрии и от *удельного электрического сопротивления* ρ материала, из которого он состоит.

Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где ρ – *удельное сопротивление* вещества проводника, l – длина проводника, а S – площадь сечения.

Удельное сопротивление ρ – скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения.

Сопротивление R зависит как от материала, по которому течёт ток, так и от геометрических размеров проводника и от температуры. Сопротивление металлов снижается при понижении температуры; при температурах порядка нескольких Кельвинов сопротивление большинства металлов и сплавов стремится или становится равным нулю (эффект сверхпроводимости). Напротив, сопротивление полупроводников и изоляторов при снижении температуры растёт. Сопротивление также меняется по мере увеличения тока/напряжения, протекающего через проводник/полупроводник.

Проводник, обладающий электрическим сопротивлением, называется *резистором*.

1.4. Закон Ома для однородного участка цепи

Экспериментально установлен в 1826 году, и назван в честь его первооткрывателя Георга Ома.

Однородный участок цепи не содержит источника тока (источника ЭДС).

Сила тока в однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению данного участка цепи (рис. 3).

$$I = \frac{U}{R}.$$

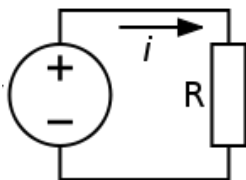


Рис. 3.

Проводники, подчиняющиеся закону Ома, называются *линейными*.

Графическая зависимость силы тока I от напряжения U (такие графики называются *вольт-амперными* характеристиками, сокращенно ВАХ) изображается прямой линией, проходящей через начало координат. Следует отметить, что существует много материалов и устройств, не

подчиняющихся закону Ома, например, полупроводниковый диод или газоразрядная лампа. Даже у металлических проводников при достаточно

больших токах наблюдается отклонение от линейного закона Ома, так как электрическое сопротивление металлических проводников растет с ростом температуры.

1.5. Последовательное и параллельное соединение проводников

Проводники в электрических цепях постоянного тока могут соединяться последовательно и параллельно.

При последовательном соединении проводников конец первого проводника соединяется с началом второго и т. д. При этом сила тока одинакова во всех проводниках ($I = const$), а напряжение U на концах всей цепи равно сумме напряжений на всех последовательно включенных проводниках. Например, для трех последовательно включенных проводников 1, 2, 3 (рис. 4) с электрическими сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 получим:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

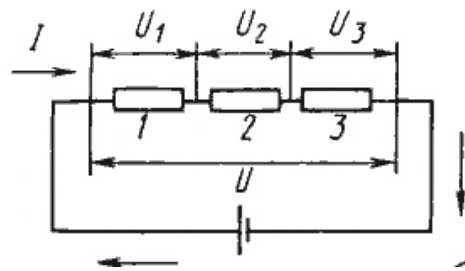


Рис. 4.

По закону Ома для участка цепи:

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2, \quad U_3 = IR_3 \quad \text{и} \quad U = IR, \quad (1)$$

где R – полное сопротивление участка цепи из последовательно включенных проводников. Из выражения и (1) будем иметь $IR = I(R_1 + R_2 + R_3)$. Таким образом:

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (2)$$

При последовательном соединении проводников их общее электрическое сопротивление равно сумме электрических сопротивлений всех проводников.

Из соотношений (1) следует, что напряжения на последовательно включенных проводниках прямо пропорциональны их сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

При параллельном соединении проводников 1, 2, 3 (рис. 5) их начала и концы имеют общие точки подключения к источнику тока.

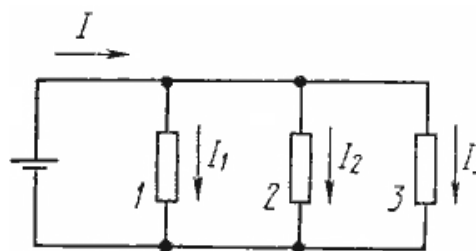


Рис. 5.

При этом напряжение на всех проводниках одинаково ($U = const$), а сила тока в неразветвленной цепи равна сумме сил токов во всех параллельно включенных проводниках ($I = I_1 + I_2 + I_3$). Для трех параллельно включенных проводников сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 на основании закона Ома для участка цепи запишем

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3}. \quad (3)$$

Обозначив общее сопротивление участка электрической цепи из трех параллельно включенных проводников через R , для силы тока в неразветвленной цепи получим:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (4)$$

Так как,

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \quad (5)$$

то из выражений (3), (4) и (5) следует, что:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (6)$$

При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям всех параллельно включенных проводников.

Параллельный способ включения широко применяется для подключения ламп электрического освещения и бытовых электроприборов к электрической сети.

1.6. Измерение сопротивления

В чем заключаются особенности измерения сопротивлений?

При измерении малых сопротивлений на результат измерения влияют сопротивления соединительных проводов, контактов и контактные термо – эдс. При измерении больших сопротивлений необходимо считаться с объемным и поверхностным сопротивлениями и учитывать или устранять влияние температуры, влажности и других причин. Измерение сопротивлений жидких проводников или проводников, обладающих высокой влажностью (сопротивлений заземления), производится на переменном токе, так как применение постоянного тока связано с погрешностями, вызванными явлением электролиза.

Измерение сопротивлений твердых проводников производится на постоянном токе. Так как при этом, с одной стороны, исключаются погрешности, связанные с влиянием емкости и

индуктивности объекта измерения и измерительной цепи, с другой стороны, появляется возможность применять приборы магнитоэлектрической системы, имеющие высокую чувствительность и точность. Поэтому мегомметры выпускаются на постоянном токе.

1.7. Правила Кирхгофа

Правила Кирхгофа – соотношения, которые выполняются между токами и напряжениями на участках любой электрической цепи.

Правила Кирхгофа не выражают никаких новых свойств стационарного электрического поля в проводниках с током по сравнению с законом Ома. Первое из них является следствием закона сохранения электрических зарядов, второе – следствием закона Ома для неоднородного участка цепи. Однако их использование значительно упрощает расчет токов в разветвленных цепях.

Первое правило Кирхгофа

В разветвленных цепях можно выделить *узловые точки (узлы)*, в которых сходятся не менее трех проводников (рис. 6). Токи, втекающие в узел, принято считать *положительными*; вытекающие из узла – *отрицательными*.

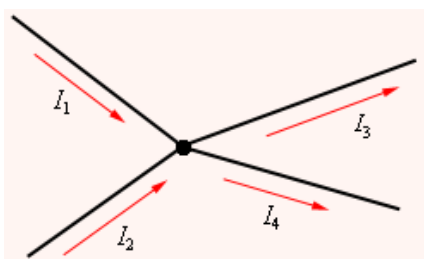


Рис. 6. Узел электрической цепи.

$$I_1, I_2 > 0; I_3, I_4 < 0$$

В узлах цепи постоянного тока не может происходить накопление зарядов. Отсюда следует **первое правило Кирхгофа:**

алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0.$$

Или в общем виде:

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0.$$

Иными словами, сколько тока втекает в узел, столько из него и вытекает. Это правило следует из фундаментального закона сохранения заряда.

Второе правило Кирхгофа

В разветвленной цепи всегда можно выделить некоторое количество замкнутых путей, состоящих из однородных и неоднородных участков. Такие замкнутые пути называются *контурами*. На разных участках выделенного контура могут протекать различные токи. На рис. 7 представлен простой пример разветвленной цепи. Цепь содержит два узла *a* и *d*, в которых сходятся одинаковые токи; поэтому только один из узлов является независимым (*a* или *d*).

Цепь содержит один независимый узел (*a* или *d*) и два независимых контура (например, *abcd* и *adef*).

В цепи можно выделить три контура *abcd*, *adef* и *abcdef*. Из них только два являются независимыми (например, *abcd* и *adef*), так как третий не содержит никаких новых участков.

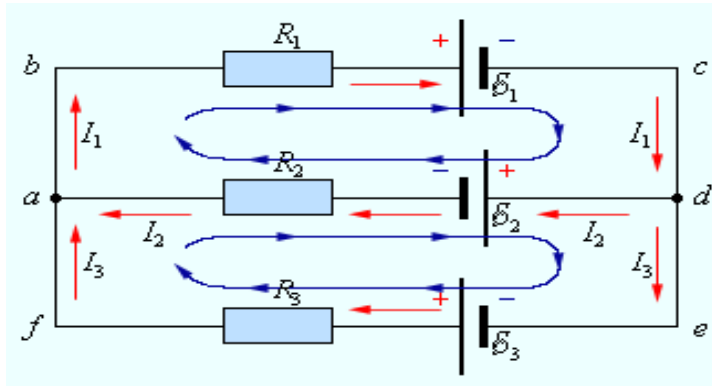


Рис. 7.

Пример разветвленной электрической цепи

Второе правило Кирхгофа является следствием обобщенного закона Ома.

Запишем обобщенный закон Ома для участков, составляющих один из контуров цепи, изображенной на рис. 8, например, $abcd$. Для этого на каждом

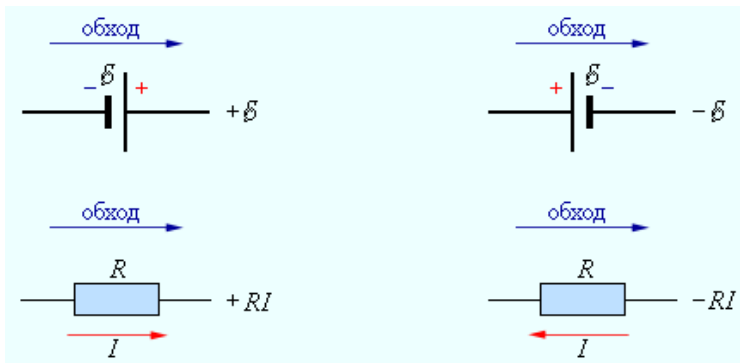


Рис. 8. «Правила знаков»

участке нужно задать *положительное направление тока* и *положительное направление обхода контура*. При записи обобщенного закона Ома для каждого из участков необходимо соблюдать определенные «правила знаков», которые поясняются на рис. 8.

Для участков контура $abcd$ обобщенный закон Ома записывается в виде:

$$\text{для участка } bc: \quad I_1 R_1 = \Delta\varphi_{bc} - \varepsilon_1,$$

$$\text{для участка } da: \quad I_2 R_2 = \Delta\varphi_{da} - \varepsilon_2.$$

Складывая левые и правые части этих равенств и принимая во внимание, что $\Delta\varphi_{bc} = -\Delta\varphi_{da}$, получим:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = \Delta\varphi_{bc} + \Delta\varphi_{da} - \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

Аналогично, для контура $adef$ можно записать:

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3.$$

Согласно второму правилу Кирхгофа:

в любом простом замкнутом контуре, произвольно выбираемом в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков равна алгебраической сумме ЭДС, имеющихся в контуре:

$$\sum I_n R_n = \sum \varepsilon_m,$$

где m – число источников в контуре, n – число сопротивлений в нем.

При составлении уравнения напряжений для контура нужно выбрать положительное направление обхода контура.

Если направления токов совпадают с выбранным направлением обхода контура, то силы токов I_n считаются положительными. ЭДС ε_m считаются положительными, если они создают токи, сонаправленные с направлением обхода контура.

Частным случаем второго правила для цепи, состоящей из одного контура, является закон Ома для этой цепи.

Порядок расчёта разветвлённых цепей постоянного тока

Расчет разветвленной электрической цепи постоянного тока выполняется в следующем порядке:

- произвольно выбирают направление токов во всех участках цепи;
- записывают $n - 1$ независимых уравнений, согласно первому правилу Кирхгофа, где n – количество узлов в цепи;
- выбирают произвольно замкнутые контуры так, чтобы каждый новый контур содержал хотя бы один участок цепи, не входящий в ранее выбранные контуры. Записывают для них второе правило Кирхгофа.

В разветвленной цепи, содержащей n узлов и m участков цепи между соседними узлами, число независимых уравнений, соответствующих правилу контуров, составляет $m - n + 1$.

На основе правил Кирхгофа составляют систему уравнений, решение которой позволяет найти силы токов в ветвях цепи.

Пример 1:

Первое и второе правила Кирхгофа, записанные для *всех* независимых узлов и контуров разветвленной цепи, дают в совокупности необходимое и достаточное число алгебраических уравнений для расчета значений напряжений и сил токов в электрической цепи. Для цепи, изображенной на рис.7, система уравнений для определения трех неизвестных токов I_1 , I_2 и I_3 имеет вид:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I_2 R_2 &= -\varepsilon_1 - \varepsilon_2, \\ -I_2 R_2 + I_3 R_3 &= \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \\ -I_1 + I_2 + I_3 &= 0. \end{aligned}$$

Таким образом, правила Кирхгофа сводят расчет разветвленной электрической цепи к решению системы линейных алгебраических уравнений. Это решение не вызывает принципиальных затруднений, однако, бывает весьма громоздким даже в случае достаточно простых цепей. Если в результате решения сила тока на каком-то участке оказывается отрицательной, то это означает, что ток на этом участке идет в направлении, противоположном выбранному положительному направлению.

1.8. Мост Уитстона

Измерительный мост (мост Уитстона) – устройство для измерения электрического сопротивления, предложенное в 1833 Самуэлем Хантером Кристи, и в 1843 году усовершенствованное Чарльзом Уитстоном, относится к одинарным мостам. (Электрический аналог рычажных аптекарских весов). Принцип измерения основан на взаимной компенсации сопротивлений двух звеньев, одно из которых включает измеряемое сопротивление. В качестве индикатора обычно используется чувствительный гальванометр, показания которого должны быть равны нулю в момент равновесия моста (рис. 9).

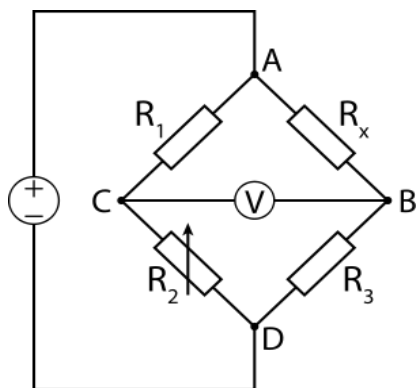


Рис. 9.

Неуравновешенный измерительный мост с вольтметром.

нужно регулировать R_2 .

С помощью гальванометра момент равновесия можно установить с большой точностью, и если сопротивления R_1 , R_2 и R_3 имеют малую погрешность, то R_x может быть измерено очень точно, ведь даже небольшие изменения R_x вызывают заметное нарушение баланса всего моста.

Таким образом, если мост сбалансирован (ток через гальванометр, сопротивление которого можно обозначить как R_g , равен нулю), эквивалентное сопротивление цепи будет: $R_1 + R_2$ в параллели с $R_3 + R_x$, то есть:

$$R_E = \frac{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_x)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_x}.$$

Условие баланса моста

Если сопротивление нуль – индикатора очень велико, то его сопротивлением можно пренебречь. Значение напряжения или тока через гальванометр также можно использовать для расчёта R_x , используя законы Кирхгофа. Такой метод применяется в тензометрических измерителях для расчёта величины механических деформаций, а также в электронных термометрах.

На схеме (рис.9) R_1, R_2, R_3, R_x – плечи моста, AD – диагональ питания, CB – измерительная диагональ. R_x представляет собой неизвестное сопротивление; R_1, R_2 и R_3 – известные сопротивления, причём значение R_2 может регулироваться. Если отношение сопротивлений R_1/R_2 равно отношению сопротивлений R_x/R_3 , то разность потенциалов между двумя средними точками будет равна нулю, и ток между ними не будет протекать. Сопротивление R_2 регулируется до получения равновесия, а направление протекания тока показывает, в какую сторону

Запишем первое правило Кирхгофа для точек **B** и **C** (I_g – ток, протекающий через гальванометр):

$$\mathbf{B:} \quad I_3 - I_x - I_g = 0$$

$$\mathbf{C:} \quad I_1 - I_g - I_2 = 0.$$

Теперь рассчитаем потенциал в цепях **ABC** и **BCD**, используя второе правило Кирхгофа:

$$\mathbf{ABC:} \quad R_x I_x - R_g I_g - R_1 I_1 = 0$$

$$\mathbf{BCD:} \quad R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_g I_g = 0.$$

Учитывая, что мост сбалансирован и I_g , запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_x = I_3 \\ I_1 = I_2 \\ R_x I_x = R_1 I_1 \\ R_2 I_2 = R_3 I_3 \end{cases}$$

Решая систему уравнений, получим:

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}.$$

Разновидности мостов

В промышленности широко применяются уравновешенные и неуравновешенные измерительные мосты. Уравновешенные мосты (наиболее точные) – работа их основана на нулевом методе. Неуравновешенные мосты (менее точные) – измеряемую величину определяют по показаниям измерительного прибора. Измерительные мосты подразделяются на неавтоматические и автоматические. В неавтоматических мостах балансирование производится вручную оператором. В автоматических балансировка моста происходит с помощью сервопривода по величине и знаку напряжения разбалансирования.

2. Теория лабораторной работы

На рис.10 изображена схема простейшего моста Уитстона, который применяется для измерений сопротивлений методом сравнения.

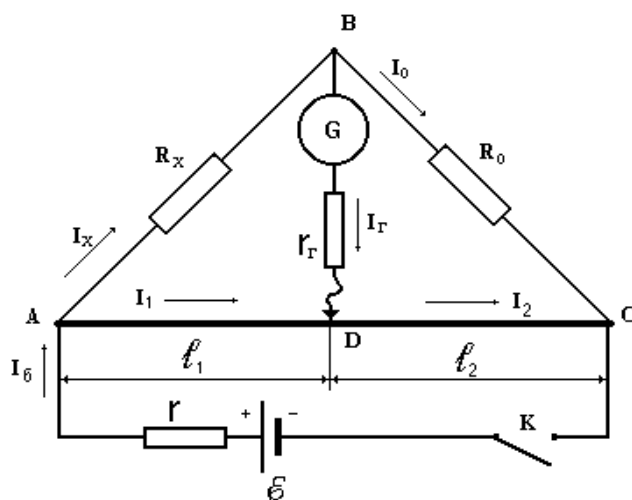


Рис. 10.

Он составлен из четырех последовательно соединенных сопротивлений, образующих "четырёхугольник" ABCDA. В одну из диагоналей этой схемы включается источник электродвижущей силы, в другую диагональ (DB) – чувствительный гальванометр.

Цепь, идущая от источника электродвижущей силы ε , начиная от узла А, разветвляется на ABC, где измеряемое сопротивление R_x образует ветвь AB; в ветвь BC включают магазин сопротивлений R_0 (эталон). Ветвь ADC (сопротивления R_1, R_2) образуется *реохордом* (туго натянутым однородным проводом). По реохорду перемещается скользящий контакт D.

Перемещением контакта D добиваются нулевого значения тока через гальванометр. Такое состояние моста называют равновесием, а сам мост уравновешенным. Неизвестное сопротивление R_x определяется сопротивлениями R_0, R_1, R_2 .

Токи, подходящие к узлу, считаются положительными, а токи, отходящие от него, – отрицательными.

Рассмотрим узел В. Так как, $I_{\Gamma} = 0$, то $I_x - I_0 = 0$ и $I_k = I_0$.

Аналогично для узла D: $I_1 - I_2 = 0$, т.е. $I_1 = I_2$

Применим второе правило Кирхгофа.

Для составления уравнения необходимо условиться о направлении обхода контура. Выбор этого направления произволен. Все токи, совпадающие по направлению с направлением обхода контура, считаются положительными. ЭДС источников токов, включенных на различных участках контура, считаются положительными, если они повышают потенциал в направлении обхода.

Рассмотрим замкнутые контуры ADB и DCB. Будем обходить контуры против часовой стрелки.

Для контура ADB: $I_1 R_1 - I_x R_x = 0$.

Для контура DCB: $I_2 R_2 - I_0 R_0 = 0$.

Отсюда получаем: $I_x R_x = I_1 R_1$, $I_0 R_0 = I_2 R_2$.

Разделив первое равенство на второе, получим:

$$\frac{I_x \cdot R_x}{I_0 \cdot R_0} = \frac{I_1 \cdot R_1}{I_2 \cdot R_2}.$$

Так как $I_x = I_0$, и $I_1 = I_2$, то $\frac{I_x}{I_0} = \frac{I_1}{I_2}$

Поэтому $\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2}$ и $R_x = R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2}$.

Вследствие того, что проволока реохорда однородна, отношение сопротивлений участков цепи AD и DB (плеч реохорда) можно заменить отношением соответствующих длин l_1 и l_2 , т. е. $\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$. Получим

окончательную формулу для определения сопротивления в виде: $R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2}$,

где l_1 и l_2 – длины плеч реохорда при нулевом положении стрелки гальванометра.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Собрать схему (рис.10). Контакты проводов у зажимов должны быть надежными.
2. После проверки цепи преподавателем поставить контакт D на середину реохорда. Магазином сопротивлений подобрать такое сопротивление R_0 , чтобы при замыкании ключа K ток через гальванометр был минимальным. Во избежание перегрева пробу на ток в гальванометре производить кратковременным нажимом ключа K .
3. Перемещением контакта D добиваться окончательного исчезновения тока в гальванометре.
4. Измерение каждого сопротивления произвести не менее трех раз.
5. Сравнить расчетные значения сопротивлений при их последовательном и параллельном соединениях с их экспериментально определенными значениями, вычислив относительную погрешность измерений.
6. Результаты представить в виде таблицы:

Сопротивление R , Ом	№ изме- рения	Результаты измерения			R_{x_i} , Ом	\bar{R}_x , Ом (экс.)	Расчетное значение R , Ом
		R_i , Ом	l_1 , м	l_2 , м			
R_{x_1}						-	
R_{x_2}							
Последовательное соединение сопротивлений R_{x_1} и R_{x_2}						$R' = \bar{R}_{x_1} + \bar{R}_{x_2}$	
Параллельное соединение сопротивлений R_{x_1} и R_{x_2}						$R'' = \frac{\bar{R}_{x_1} \cdot \bar{R}_{x_2}}{\bar{R}_{x_1} + \bar{R}_{x_2}}$	

Таблица

Относительная погрешность δ %	Последовательное соединение сопротивлений	$\delta = \frac{R' - \bar{R}_{\text{экс}}}{R'}$
	Параллельное соединение сопротивлений	$\delta = \frac{R'' - \bar{R}_{\text{экс}}}{R''}$

7. Проанализировать результаты, сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте правила Кирхгофа для цепи постоянного тока.
2. Правило определения знака токов и ЭДС при обходе замкнутого контура электрической цепи.
3. Нарисуйте схему и объясните принцип действия моста Уитстона.
4. В чем заключается условие равновесия моста. Вывести соотношения между сопротивлениями плеч моста при равновесии.
5. Сформулируйте порядок расчёта напряжения, силы тока и общего сопротивления в участке цепи постоянного тока при последовательном и параллельном соединении нескольких различных сопротивлений.
6. Рассчитайте относительную погрешность измерения сопротивлений в данной работе.

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ГРАДУИРОВАНИЕ ТЕРМОПАРЫ²

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: ознакомиться с термоэлектрическими явлениями и работой термопары. Определить постоянную термопары.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Термостат	–	–	–	–
2	Термопара	–	–	–	–
3	Микроамперметр	–			
4	Термометр	–			

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. Электронная эмиссия. Работа выхода электрона из металла

Рассмотрим процесс с точки зрения классической электронной теории.

В узлах кристаллической решетки находятся положительные ионы, а между ними свободно движутся электроны. Они как бы плавают по всему объему проводника, так как силы притяжения к положительным ионам решетки, действующие на свободные электроны, находящиеся внутри металла, в среднем взаимно уравниваются. Действие сил притяжения со стороны

² Градуирование термопары - установление зависимости величины термоэлектродвижущей силы от разницы температур спаев термопары.

положительных ионов на электроны мешает последним выйти за пределы поверхности металла. Лишь наиболее быстрые электроны могут преодолеть это притяжение и вылететь из металла. Однако совсем покинуть металл электрон не может, так как притягивается положительным поверхностным ионом и тем зарядом, который возник в металле в связи с потерей электрона. Равнодействующая этих сил притяжения не равна нулю, а направлена внутрь металла перпендикулярно его поверхности (рис. 1).

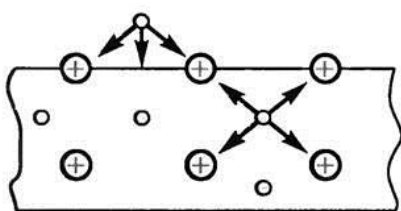


Рис. 1.

устанавливается динамическое равновесие между покидающими и возвращающимися электронами. Таким образом, на границе металла с вакуумом возникает двойной слой электрических зарядов, поле которого подобно полю плоского конденсатора. Электрическое поле этого слоя можно считать однородным (рис. 2). Разность потенциалов $\Delta\varphi_{\text{кон}}$ в этом слое называется контактной разностью потенциалов между металлом и вакуумом.

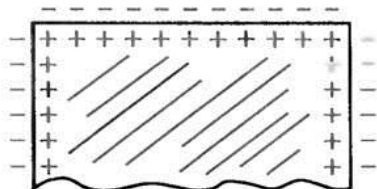


Рис. 2.

Через некоторое время электрон под действием этих сил может возвратиться в металл. Среди электронов, находящихся вблизи поверхности металла, найдется большое число таких, которые временно будут покидать металл, а затем возвращаться обратно. Этот процесс напоминает испарение жидкости. В итоге

Этот двойной электрический слой не создает поля во внешнем пространстве, но препятствует выходу электронов из металла.

Как показывают расчеты и специально поставленные опыты, толщина этого слоя мала и равна примерно 10^{-10} м.

Таким образом, чтобы покинуть металл и уйти в окружающую среду, электрон должен совершить работу A_B против сил притяжения со стороны положительного заряда металла и против сил отталкивания от отрицательно заряженного электронного облака. Она приблизительно равна:

$$A_B = e\Delta\varphi_{\text{кон}},$$

где e – заряд электрона. Для этого электрон должен обладать достаточной кинетической энергией.

Минимальную работу A_B , которую должен совершить электрон за счет своей кинетической энергии для того, чтобы выйти из металла в вакуум и не вернуться в него, называют **работой выхода**.

Единицами измерения работы выхода являются: в СИ – Джоуль (Дж) или внесистемная единица – электронвольт (эВ)³. Для чистых металлов A_B составляет несколько электронвольт. Так, например, для цезия ее значение равно 1,81 эВ, для платины 6,27 эВ.

Таким образом, можно назвать две вероятные причины появления работы выхода:

1. Если электрон по какой-то причине удаляется из металла, то в том месте, которое электрон покинул, возникает избыточный положительный заряд и электрон притягивается к индуцированному им самим положительному заряду.

2. Отдельные электроны, покидая металл, удаляются от него на расстояния порядка атомных и создают, тем самым, над поверхностью металла «электронное облако», плотность которого быстро убывает с расстоянием. Это облако вместе с наружным слоем положительных ионов решетки образует *двойной электрический слой*, поле которого подобно полю плоского конденсатора. Толщина этого слоя равна нескольким межатомным расстояниям (10^{-10} — 10^{-9} м). Он не создает электрического поля во внешнем пространстве, но препятствует выходу свободных электронов из металла.

Работа выхода производится электронами – за счет уменьшения их кинетической энергии. Поэтому понятно, что медленно движущиеся электроны вырваться из металла не могут. Электрон проводимости может вылететь из какого либо металла в том случае, если его энергия W_V превышает работу выхода A_B электрона из металла.

Выход свободных электронов из металла называется *эмиссией электронов*. При нормальных внешних условиях электронная эмиссия выражена слабо, так как средняя кинетическая энергия хаотического теплового движения большинства свободных электронов в металлах гораздо меньше работы выхода. Для повышения интенсивности эмиссии следует увеличить кинетическую энергию свободных электронов до значений, равных или больших значения работы выхода. Этого можно достигнуть различными способами. Во-первых, созданием электрического поля очень большой напряженности ($E \sim 10^6$ В/см), способного вырвать электроны из металла, – *холодная эмиссия*. Такая эмиссия

³ 1 эВ равен работе, совершаемой силами поля при перемещении элементарного электрического заряда (заряда, равного заряду электрона) при прохождении им разности потенциалов в 1 В. Так как заряд электрона равен $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, то $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

используется в электронных микропроекторах. Во-вторых, бомбардировкой металла электронами, предварительно разогнанными электрическим полем до очень большой скорости, – *вторичная электронная эмиссия*. В-третьих, интенсивным освещением поверхности металла – *фотоэмиссия*. На явлении фотоэмиссии основан внешний фотоэффект и устройство вакуумного фотоэлемента. В-четвертых, нагревание металла – *термоэлектронная эмиссия*. Электроны, испускаемые нагретым телом, называются *термоэлектронами*, а само это тело – *эмиттером*.

1.2. Понятие о «потенциальной яме»

Потенциальная яма – ограниченная область пространства, определяемая физической природой взаимодействия частиц, в которой потенциальная энергия частицы меньше, чем вне её.

Термин «потенциальная яма» (П.я.) происходит от вида графика, изображающего зависимость потенциальной энергии U частицы в силовом поле от её положения в пространстве (в случае одномерного движения – от координаты x ; рис. 3). Такая форма зависимости $U(x)$

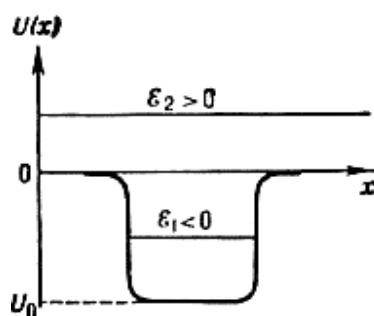


Рис. 3. Схематическое изображение потенциальной ямы $U(x)$
(ϵ – полная энергия частицы).

возникает в поле сил притяжения, т.е. потенциальная яма обычно отвечает силам притяжения.

Характеристиками потенциальной ямы являются её ширина a (расстояние, на котором проявляется действие сил притяжения) и глубина U_0 , равная разности между значением потенциальной энергии на бесконечно большом расстоянии (обычно принимаемым за нуль) и её минимальным значением внутри ямы (рис. 3).

Примером потенциальной ямы может служить потенциал притяжения между протоном и нейтроном, экспоненциально убывающий с увеличением расстояния между ними.

В классической механике частица с энергией $\epsilon < 0$ не сможет вылететь из потенциальной ямы. И будет всё время двигаться в ограниченной области пространства внутри ямы (между двумя классическими точками остановки $U_0 = \epsilon$).

Положение частицы на «дне» ямы отвечает устойчивому равновесию и соответствует нулевой кинетической энергии частицы. Если $\epsilon > 0$, то частица преодолевает действие сил притяжения и свободно покидает яму.

Если в потенциальную яму попала частица, энергия которой ниже, чем необходимая для преодоления краёв ямы, то возникнут колебания частицы в яме. Амплитуда колебаний будет обусловлена собственной энергией частицы. Частица, находящаяся на дне потенциальной ямы, пребывает в состоянии устойчивого равновесия, то есть при отклонении частицы от точки минимума потенциальной энергии возникает сила, направленная в противоположную сторону отклонению. Если частица подчиняется квантовым законам, то, несмотря на

недостаток энергии, она с определённой вероятностью может покинуть потенциальную яму (*явление туннельного эффекта*).

Электрон в металле можно рассматривать как частицу, находящуюся в потенциальной яме. При этом с классической точки зрения глубина потенциальной ямы $-U_0$ численно равна работе выхода $-A_B$ электрона из металла. В квантовом случае работа выхода A_B электрона отсчитывается не от «дна» потенциальной ямы, а от так называемого «уровня Ферми» – наивысшего энергетического уровня, занятого электронами в потенциальной яме, в соответствии с принципом Паули⁴ (например, от энергетического уровня ϵ_1).

1.3. Контактные явления

Если привести два разных металла в соприкосновение, между ними возникает разность потенциалов, которая называется контактной разностью потенциалов (*к.р.п.*). В результате в окружающем металлы пространстве появляется электрическое поле.

Так как проводники находятся при одинаковой температуре, то в отсутствие приложенного напряжения поле может существовать только в пограничных слоях (правило Вольта).

Контактная разность потенциалов – это разность потенциалов между проводниками, возникающая при соприкосновении двух различных проводников, имеющих одинаковую температуру.

Наиболее важно понятие *к. р. п.* для твёрдых проводников (металлов и полупроводников). Различают *внутреннюю* разность потенциалов (при соприкосновении металлов) и *внешнюю* (в зазоре).

Электрическое поле *к. р. п.* сосредоточено в проводниках вблизи границы раздела и в зазоре между проводниками. Линейные размеры этой области в металлах имеет атомные размеры ($10^{-8} - 10^{-7}$ см), а в полупроводниках колеблется в широких пределах и может достигать величины ($10^{-4} - 10^{-5}$ см). Отсюда следуют два вывода: 1) из двух соприкасающихся тел *к. р. п.* приходится в основном на проводники с большим сопротивлением; 2) для полупроводников в области сосредоточения *к. р. п.* заметно изменяется концентрация носителей заряда.

1.4. Контактная разность потенциалов с точки зрения классической электронной теории

Появление *к.р.п.* обусловлено двумя причинами:

1). Различие в работах выхода (A) электронов из металлов, приведённых в соприкосновение. В этом случае силы, действующие на электроны в пограничной области со стороны ионных каркасов металлов, не уравновешены и поэтому вызывают переход электронов из одного металла в другой. Разность

⁴ Согласно квантово - механическому принципу Паули один энергетический уровень могут занимать не более двух электронов.

потенциалов, обусловленная различием работ выхода контактирующих металлов, называется внешней контактной разностью потенциалов.

2). Различием в плотностях (n) электронного газа в металлах, вследствие чего возникает диффузионный переход электронов из металла, где плотность этого газа больше, в металл, где эта плотность меньше. Разность потенциалов, обусловленная различием в плотностях электронного газа в контактирующих металлах, называется внутренней контактной разностью потенциалов.

Рассмотрим действие каждой из этих причин в отдельности.

а) *Различие в работах выхода контактирующих металлов*

$$(A_1 \neq A_2; n_1 = n_2).$$

Если два твёрдых проводника привести в соприкосновение (например, $A_1 < A_2$), то между ними происходит обмен электронами, причём вначале преимущественно электроны переходят из проводника с меньшей работой выхода в проводник с большей работой выхода. В результате этого процесса проводники приобретают электрические заряды противоположных знаков, что приводит к появлению электрического поля, препятствующего дальнейшему перетеканию электронов. В конечном итоге достигается динамическое равновесие, при котором потоки электронов в обоих направлениях становятся одинаковыми, и между проводниками устанавливается *к. р. н.*

Действительно, в этом состоянии на электроны в пограничном слое не должны действовать односторонне направленные силы, т.е. должно выполняться соотношение: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, или в скалярной форме:

$$E = E_1 - E_2, \quad (1)$$

где \vec{E}_1 и \vec{E}_2 – вектора напряжённостей электрических полей, действующих на электрон в пограничной области, \vec{E} – вектор напряжённости результирующего электрического поля.

Умножим формулу (1) на элементарное перемещение dx и проинтегрируем вдоль какого-либо пути перехода от одного металла к другому:

$$\int_1^2 E dx = (\varphi_1 - \varphi_2)_A \quad (2)$$

– контактная разность потенциалов, обусловленная разностью работ выхода.

$$\text{Так как,} \quad \int_1^2 E_1 dx = \frac{A_1}{e} \quad \text{и} \quad \int_1^2 E_2 dx = \frac{A_2}{e}, \quad (3)$$

где e – заряд электрона, то из формул (2) и (3) следует:

$$(\varphi_1 - \varphi_2)_A = -\frac{(A_1 - A_2)}{e} \quad (4)$$

где знак «–» учитывает направление вектора напряжённости \vec{E} .

Таким образом, из формулы (4) следует: значение внешней контактной разности потенциалов равно разности работ выхода отнесенной к заряду электрона.

б) *Различия в плотностях электронного газа в металлах*

$$(n_1 \neq n_2; A_1 = A_2)$$

В этом случае $\vec{E}_1 = -\vec{E}_2$, т.е. электрические поля, созданные поверхностными слоями металлов в пограничной области взаимно уравниваются, поэтому электроны могут свободно переходить из одного металла в другой. При $n_1 \neq n_2$ каждый из металлов будет ежесекундно посылать в пограничную область различные количества электронов: N_1 и N_2 . Из $(N_1 + N_2)$ электронов, ежесекундно поступающих в эту область, половина будет втянута в один металл, а другая половина - во второй металл. Таким образом, из первого металла ежесекундно выходят N_1 электронов, а поступают $\frac{1}{2}(N_1 + N_2)$ электронов. Разница между этими числами вызовет избыток или недостаток электронов в металле, т.е. положительную или отрицательную зарядку его.

Второй металл приобретёт противоположный заряд. Вследствие этого появится электрическое поле $\Delta\vec{E}$, направленное от положительно заряженного металла к отрицательному, которое приостановит диффузию электронов из одного металла в другой.

Таким образом, при $n_1 \neq n_2$ возникает контактное электрическое поле $\Delta\vec{E}$, препятствующее выравниванию электронного газа в металлах.

Внутри этой области плотность электронного газа должна изменяться от n_1 в одном металле до n_2 - в другом металле. По аналогии с изменением плотности газа в поле тяготения Земли (барометрическая формула), запишем:

$$n_2 = n_1 e^{-\Delta A/kT},$$

где k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура; $\Delta A = (\varphi_1 - \varphi_2)e$ - работа переноса электрона через пограничную область; φ_1 и φ_2 - потенциалы металлов после наступления равновесного состояния.

Тогда:

$$\Delta A = e(\varphi_1 - \varphi_2)_n = kT \cdot \ln \frac{n_1}{n_2} \text{ или } (\varphi_1 - \varphi_2)_n = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (5)$$

Формулы (5) определяет значение *внутренней* контактной разности потенциалов.

в) *Существуют обе причины, вызывающие возникновение контактной разности потенциалов*

$$(A_1 \neq A_2; n_1 \neq n_2)$$

В этом случае с учётом формул (4) и (5) к.р.п. выражается соотношением:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = -\frac{(A_1 - A_2)}{e} + \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) следует: контактная разность потенциалов зависит только от температуры и химической природы контактирующих металлов.

Электрическое поле \vec{E} , которое создаётся между металлами вследствие скопления в них избыточных зарядов, будет складываться с внутренними электрическими полями \vec{E}_1 и \vec{E}_2 , которые существуют в поверхностном слое каждого металла. Однако в равновесном состоянии должно выполняться условие:

$$\vec{E} + \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \neq 0,$$

т.к. если было бы наоборот, то был бы возможен переход электронов из металла, где плотность электронного газа велика, в металл, где эта плотность мала.

Равновесие может наступить при условии:

$$\vec{E} + \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \Delta\vec{E},$$

где $\Delta\vec{E}$ должно быть достаточным для приостановки диффузии электронов.

Таким образом, в пограничном слое между металлами при равновесии существует только контактное электрическое поле $\Delta\vec{E}$ (обусловленное вторым членом формулы (6)).

г) Контактная разность потенциалов на границе с полупроводником

Мы рассмотрели контакт двух металлов. Однако контактная разность потенциалов возникает и на границе между металлом и полупроводником, а также на границе между двумя полупроводниками.

В случае контакта металла с полупроводником *к. р. п.* сосредоточена практически в полупроводнике и при достаточно большой величине заметно изменяет концентрацию носителей тока в приконтактной области полупроводника, а, следовательно, и сопротивление этого слоя. Если образуется слой с высоким сопротивлением (обеднённый носителями тока), то при наложении внешней разности потенциалов концентрация носителей заряда будет в нём заметно меняться, причём несимметричным образом в зависимости от знака внешнего напряжения. Т.о., *к.р.п.* обуславливает нелинейность вольтамперных характеристик контактов металл – полупроводник, которые благодаря этому обладают выпрямительными свойствами.

В случае контакта двух полупроводников из одного вещества, но с различными типами проводимости *к. р. п.* приводит к образованию переходного слоя объёмного заряда с нелинейной зависимостью сопротивления от внешнего напряжения.

К. р. п. играет важную роль в физике твёрдого тела и её приложениях. Она оказывает заметное влияние на работу электровакуумных приборов. В электронных лампах *к. р. п.* между электродами складывается с приложенными внешними напряжениями и влияет на вид вольтамперных характеристик. В термоэлектронном преобразователе энергии *к. р. п.* используется для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Электроны "испаряются" из горячего катода с большой работой выхода и "конденсируются" на аноде с малой работой выхода. Разность в потенциальной энергии электронов превращается в работу, производимую во внешней электрической цепи.

1.5. Контактная разность потенциалов с точки зрения зонной (квантовой) теории твёрдого тела

Для объяснения внутренней контактной разности потенциалов прибегают к модели свободных электронов в металлах. Допустим, что температура металла равна 0 К. Тогда все энергетические уровни вплоть до уровня Ферми будут заполнены электронами. Так как энергии Ферми разные для разных металлов, то разными будут и концентрации электронов проводимости. Таким образом, для приведенных в соприкосновение металлов начнётся диффузия электронов. То есть, металл с большим уровнем Ферми будет заряжаться положительно, а второй металл приобретёт отрицательный заряд. На границе возникнет скачок

потенциала, или, что, то же самое – электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии электронов. При определенной разности потенциалов диффузия прекратится, это произойдет, когда уровни Ферми обоих металлов сравняются (рис. 4). Это явление наблюдается

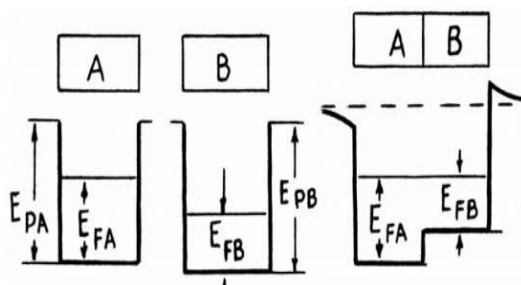


Рис. 4.

и при ненулевой температуре. Внутренняя разность потенциалов равна разности уровней Ферми, отнесенных к заряду электрона (7). Что касается внешней разности потенциалов то ход рассуждений остается прежний. В зазоре между металлами возникает электрическое поле, а сами поверхности заряжены.

Различная зависимость от температуры контактной разности потенциалов

Контактная разность потенциалов вызвана отличием энергий Ферми у контактирующих различных проводников. При создании контакта химические потенциалы электронов становятся одинаковыми, и возникает контактная разность потенциалов, равная:

$$U = \frac{F_2 - F_1}{e}, \quad (7)$$

где F – энергия Ферми, e – заряд электрона.

На контакте тем самым существует электрическое поле, локализованное в тонком приконтактном слое. Если составить замкнутую цепь из двух металлов, то U возникает на обоих контактах. Электрическое поле будет направлено одинаковым образом в обоих контактах – от большего вектора напряженности электрического поля \vec{E} к меньшему. Это значит, что если совершить обход по замкнутому контуру, то в одном контакте обход будет происходить по полю, а в другом – против поля. Циркуляция вектора \vec{E} тем самым будет равна нулю.

Если температура одного из контактов изменится на dT , то, поскольку энергия Ферми зависит от температуры, U также изменится. Но если изменилась внутренняя контактная разность потенциалов, то изменилось электрическое поле в одном из контактов, и поэтому циркуляция вектора \vec{E} будет отлична от нуля, то есть появляется ЭДС в замкнутой цепи.

Данная ЭДС называется *контактная ЭДС*.

Если оба контакта термоэлемента находятся при одной и той же температуре, то и контактная, и объёмная термо-ЭДС исчезают.

Фононное увлечение

Если в твёрдом теле существует градиент температуры, то число фононов, движущихся от горячего конца к холодному, будет больше, чем в обратном направлении. В результате столкновений с электронами фононы могут увлекать за собой последние и на холодном конце образца будет накапливаться отрицательный заряд (на горячем – положительный) до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не уравнивает эффект увлечения.

Эта разность потенциалов и представляет собой 3-ю составляющую термоэдс, которая при низких температурах может быть в десятки и сотни раз больше рассмотренных выше. В магнетиках наблюдается дополнительная составляющая термоэдс, обусловленная эффектом увлечения электронов магнонами. Применяется для создания термодатчиков (например, в компьютерах). Такие датчики миниатюрны и очень точны.

Для чистых металлов *к.р.п.* может достигать величины от десятков долей до нескольких вольт. Она зависит от строения проводника и от состояния его поверхности. Поэтому величина *к. р. п.* может быть изменена обработкой поверхностей (покрытиями, адсорбцией и т. п.), введением примесей (в случае полупроводников) и сплавлением с другими веществами (в случае металлов).

1.6. Законы Вольты

Возникновение контактной разности потенциалов между соприкасающимися металлами было открыто в конце 18 в. итальянским физиком А.Вольтой. Он экспериментально установил два закона.

Первый закон Вольты:

При соединении двух проводников, изготовленных из различных металлов, между ними возникает контактная разность потенциалов, которая только зависит от их химического состава и температуры (см. формулу (6)).

Второй закон Вольты:

Разность потенциалов между концами цепи, состоящей из последовательно соединённых металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от химического состава промежуточных проводников; она равна контактной разности потенциалов, возникающей при непосредственном соединении крайних проводников (рис. 5)



Рис. 5.

Второй закон Вольты является следствием закона сохранения энергии: если бы в замкнутой цепи абсолютно неизменяющихся проводников возникал электрический ток, то можно было бы от такой системы получить неограниченное количество электрической энергии без затрат других видов энергии.

Закон Вольты можно получить из формулы (6), сложив контактные разности потенциалов, возникающей между каждой парой соприкасающихся металлов. В результате получим:

$$(\varphi_1 - \varphi_k) = -\frac{(A_1 - A_k)}{e} + \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_k}. \quad (8)$$

Из (8) следует, в частности, если крайние проводники одинаковы, то $A_1 = A_k$; $n_1 = n_k$ и $\varphi_1 = \varphi_k$, т.е. электрического тока не будет.

Для замкнутой цепи, составленной из произвольного числа разнородных металлов и полупроводников, с одинаковой температурой всех спаев, сумма скачков потенциалов будет равна нулю. Поэтому ЭДС в цепи возникнуть не может.

Вольта доказал существование разности потенциалов следующим опытом. На стержень электроскопа насажены два диска из разных материалов (цинк и медь) покрытых тонким слоем диэлектрика и приведены в соприкосновение. На короткое время диски замыкаются медной проволокой. При этом между ними возникает контактная разность потенциалов, причем цинк заряжается положительно, а медь – отрицательно. При этом наблюдается небольшое расхождение листочков электроскопа. Для увеличения показаний электроскопа снимается медная проволока и диски раздвигаются. Так как заряд, образованного из двух дисков конденсатора не изменяется, а емкость уменьшается, то напряжение на конденсаторе возрастает. При этом листочки электроскопа расходятся.

1.7. Эффект Зеебека. Термоэлектрические явления

Термоэлектрическими называют такие явления, в которых проявляется специфическая связь между тепловыми и электрическими процессами в металлах и полупроводниках.

Эффект Зеебека – явление возникновения ЭДС в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах.

Эффект Зеебека иногда называют просто *термоэлектрическим эффектом*.

Данный эффект был открыт в 1821г. Т. И. Зеебеком. В 1822 г. он опубликовал результаты своих опытов в статье «К вопросу о магнитной поляризации некоторых металлов и руд, возникающей в условиях разности температур», опубликованной в докладах Прусской академии наук. Наиболее правильное определение этого эффекта следующее: a difference of potential will occur if a homogeneous material having mobile charges has a different temperature at each measurement contact. (Если однородный материал, обладающий свободными зарядами, имеет разную температуру на измерительных контактах, то между контактами возникает разность потенциалов).

Термоэдс ε , электродвижущая сила, возникающая в электрической цепи, состоящей из нескольких разнородных проводников, имеющих в местах контактов различную температуру.

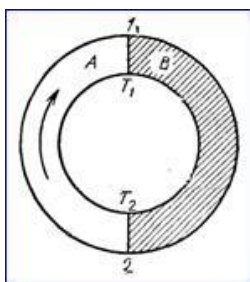


Рис. 6.

Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, возникает термо-ЭДС, если места контактов поддерживают при разных температурах. Цепь, которая состоит только из двух различных проводников, называется термоэлементом или *термопарой*.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух металлических проводников 1 и 2 (рис. 6).

а) Температуры спаев одинаковы ($T_1 = T_2$)

По закону Ома ЭДС в цепи равна сумме падений напряжений на участках цепи:

$$\varepsilon = U_1 + U_2,$$

где $U_1 = \varphi_{1A} - \varphi_{1B}$ – падение напряжения на участке $1A2$, $U_2 = \varphi_{2B} - \varphi_{2A}$ – падение напряжения на участке $2B1$; $(\varphi_{1A} - \varphi_{1B})$ и $(\varphi_{2B} - \varphi_{2A})$ – контактные разности потенциалов.

Так как температуры спаев одинаковы ($T_1 = T_2$), то:

$$\varepsilon = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_2}{n_1}.$$

Таким образом, в замкнутой цепи, образованной из нескольких металлических проводников, все спаи которой находятся при одинаковой температурах, невозможно возникновение ЭДС за счёт одних только контактных скачков потенциалов.

б) Температуры спаев различны ($T_1 \neq T_2$)

В этом случае:

$$\varepsilon = \left(-\frac{(A_1 - A_2)}{e} + \frac{kT_1}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2} \right) + \left(-\frac{(A_2 - A_1)}{e} + \frac{kT_2}{e} \cdot \ln \frac{n_2}{n_1} \right) = (T_1 - T_2) \frac{k}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

Обозначим: $\alpha = \frac{k}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2}$ – удельная термоэдс, характеризует свойства контакта данных двух металлов.

В простейшем случае удельная термоэдс определяется только материалами проводников, однако, строго говоря, он зависит и от температуры, и в некоторых случаях с изменением температуры α меняет знак.

$$\text{Тогда:} \quad \varepsilon = \alpha(T_1 - T_2). \quad (9)$$

Т.е. термоэдс зависит от рода соприкасающихся металлов и разности температур спаев.

Более корректное выражение для термо-ЭДС:

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}(T) dT$$

1.8. Объяснение эффекта Зеебека с точки зрения классической теории

Если вдоль проводника существует градиент температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; в полупроводниках в дополнение к этому концентрация электронов проводимости растет с температурой. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся нескомпенсированный положительный заряд. Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие.

ЭДС, возникновение которой описывается данным механизмом, называется *объёмной ЭДС*.

1.9. Объяснение эффекта Зеебека с точки зрения зонной теории твёрдого тела

Так как положение уровня Ферми зависит от температуры, то при разных температурах контактов разными будут и внутренние контактные разности потенциалов. Поэтому сумма скачков потенциала на контактах будет отлична от нуля, что и приводит к возникновению термоэлектрического тока. При градиенте температуры происходит также диффузия электронов, которая тоже обуславливает термо-ЭДС.

Благодаря термоэдс в замкнутой цепи возникает электрический ток. Для поддержания постоянного тока необходимо обеспечивать постоянство разности температур спаев. В этом случае происходит преобразование внутренней энергии системы в электрическую. КПД подобной системы $\sim 0,1\%$. Величина термо-ЭДС составляет милливольты при разности

температур в 100 К и температуре холодного спая в 0°C (например, пара медь–константан даёт 4,25 мВ, платина–платинородий – 0,643 мВ, нихром–никель – 4,1 мВ).

Явление Зеебека используется:

- 1) для измерения температуры с помощью термопар – датчиков температур, состоящих из двух соединённых между собой разнородных металлических проводников. Таких спаев в термопаре может быть несколько;
- 2) для создания генераторов тока с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую. Их используют, в частности, на космических кораблях, спутниках в качестве бортовых источников электроэнергии;
- 3) для измерения мощности инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучений.

1.10. Термопара

Термоэлектрические явления широко используются для измерения температуры. Для этого используются термопары.

Термопара (термоэлектрический преобразователь температуры) – термоэлемент, применяемый в измерительных и преобразовательных устройствах, а также в системах автоматизации (рис. 7).

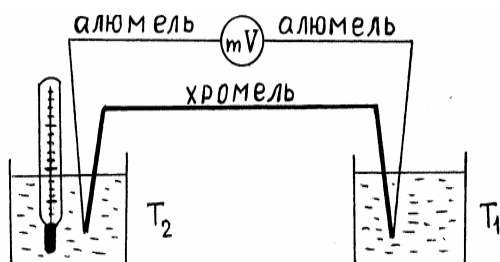


Рис. 7.

Международный стандарт на термопары МЭК 60584 даёт следующее определение термопары: *термопара – пара проводников из различных материалов, соединённых на одном конце и формирующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерения температуры.*

Принцип действия термопары

Принцип действия термопары основан на эффекте Зеебека. Между соединёнными проводниками имеется контактная разность потенциалов; если стыки связанных в кольцо проводников находятся при одинаковой температуре, сумма таких разностей потенциалов равна нулю. Когда же стыки находятся при разных температурах, разность потенциалов между ними зависит от разности температур (9). Коэффициент пропорциональности в этой зависимости α – удельная термоэдс (коэффициент термоэдс). У разных металлов коэффициент термоэдс α разный и, соответственно, разность потенциалов, возникающая между концами разных проводников, будет различная. Помещая спай из металлов с отличными коэффициентами термоэдс в среду с температурой T_1 , мы получим напряжение между противоположными контактами, находящимися при

другой температуре T_2 , которое будет пропорционально разности температур T_1 и T_2 (рис. 7).

Термопары представляют собой замкнутые цепи, содержащие спаи разнородных металлов. При измерении температуры один из спаев помещается в среду, температуру которой следует измерять, второй – в среду с известной температурой. По величине возникшего в цепи термотока можно судить о температуре среды.

С помощью термопар можно измерять температуру с точностью порядка сотых долей градуса в широком интервале температур – от десятков до тысяч градусов абсолютной шкалы.

Таким образом, зная значение коэффициента термоэдс α , значение термоэдс ε и температуру холодного спая T_2 из формулы (9) можно определить искомую температуру T_1 :

$$T_1 = \frac{\varepsilon}{\alpha} + T_2. \quad (10)$$

Явление Зеебека наблюдается также у полупроводников. Термопары изготовленные из полупроводников имеют сравнительно высокий коэффициент полезного действия (до 15%, КПД металлических термопар 0,5%), поэтому их используют в качестве элементов блока питания радиоаппаратуры.

Необходимо иметь в виду, что термоэдс возникает не в месте спая, а по всей длине термоэлектрода, что очень важно для понимания ограничений по точности, накладываемых самой природой термоэлектричества. Поскольку генерирование ТЭДС происходит по длине термоэлектрода, то показания термопары зависят от состояния термоэлектродов в зоне максимального температурного градиента. Поэтому поверку термопар следует проводить при той же глубине погружения в среду, что и на рабочем объекте. Учет термоэлектрической неоднородности особенно важен для рабочих термопар из благородных металлов.

На рис. 8 приведены схемы включения термопар в измерительную цепь.

Общие сведения и особенности работы термопар

Стандартные таблицы для термоэлектрических термометров и классы допуска и диапазоны измерений приведены в ГОСТ Р. 8.585-2001 «Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования».

Наиболее точные *термопары* – с термоэлектродами из благородных металлов: платинородий-платиновые ПП (тип S (Pt-10%Rh / Pt) (тип R (Pt-13%Rh / Pt), платинородий-платинородиевые ПР (тип В (Pt-30%Rh / Pt-6%Rh)). Преимуществом является значительно меньшая термоэлектрическая неоднородность, чем у термопар из неблагородных металлов, устойчивость к окислению, вследствие чего высокая стабильность. Преимуществом термопары типа ПР также является практически нулевой выходной сигнал при температурах вплоть до 50°C, таким образом устраняется необходимость термостатирования холодных спаев. Недостатком является высокая стоимость и малая чувствительность (около 10 мкВ/К при 1000°C). Хотя платинородиевые термопары превосходят по точности и стабильности термопары из неблагородных металлов и сплавов, минимальная расширенная неопределенность результата измерения температуры в диапазоне до 1100°C составляет 0,2 – 0,3°C. Причины нестабильности термопар связаны с загрязнением, окислением и испарением материалов термоэлектродов. При температурах 500–900°C формируется стабильный окисел родия. Недостаток родия изменяет состав платино-родиевого термоэлектрода, что приводит к изменению зависимости ЭДС от температуры и к возникновению термоэлектрических неоднородностей.

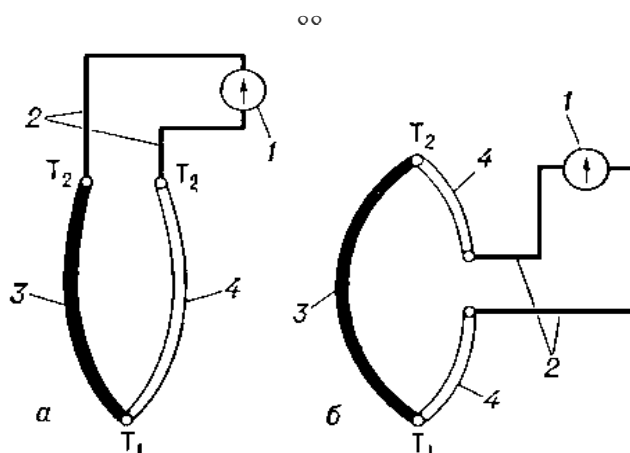


Рис. 8. Схемы включения термопары в измерительную цепь:
 а – измерительный прибор 1 подключен соединительными проводами 2 к концам термоэлектродов 3 и 4;
 б – в разрыв термоэлектрода 4;
 T_1 , T_2 — температура «горячего» и «холодного» контактов (спаев) термопары.

В последние годы за рубежом были разработаны и исследованы *термопары из чистых металлов*: золото-платиновые и платина-палладиевые. По результатам опубликованных исследований можно сделать вывод об их лучшей стабильности и точности по сравнению с платинородий-платиновыми термопарами.

Термопары из благородных металлов очень широко используются во всех отраслях промышленности. Они дешевы и просты в обращении, устойчивы к вибрациям, могут выпускаться во взрывозащищенном исполнении. Особенно удобны в обращении кабельные термопары, электроды которых заключены в специальный герметичный гибкий кабель с минеральной изоляцией. Такая конструкция позволяет расположить термопару в самых сложных конструктивных узлах объекта. Преимуществом термопар также является высокая чувствительность. Существенным недостатком является образование термоэлектрической неоднородности в зоне максимального градиента температур, что может привести к ошибке в градуировке более 5°C . Этот недостаток делает очень сомнительной саму возможность периодической поверки термопар в лабораторных условиях и диктует необходимость поверять термопары из благородных металлов на месте их рабочего монтажа. Наименьшая термоэлектрическая неоднородность характерна для термопары нихросил/нисил (тип N). Одной из существенных составляющих неопределенности измерений термопарами является учет температуры холодных спаев или точность компенсации спаев в цифровых преобразователях.

Для измерения высоких температур до 2500°C используют *вольфрам-рениевые термопары*. Особенностью их использования является необходимость устранения окислительной атмосферы, разрушающей проволоку. Для вольфрам-рениевых термопар используют специальные герметичные конструкции чехлов, заполненные инертным газом, а также танталовые и молибденовые чехлы с неорганической изоляцией из оксида бериллия и оксида магния. Одно из важных применений вольфрам-рениевых термопар состоит в измерении температур в ядерной энергетике в присутствии потока нейтронов.

Особенностью работы с термопарами является применение стандартных удлинительных и компенсационных проводов. Провода позволяют передавать сигнал с термопары на сотни метров к измерительному прибору, внося минимальную потерю точности. Удлинительные провода изготавливаются из того же материала, что и термоэлектроды термопары, но с более низкими требованиями по качеству материалов. Компенсационные провода изготавливаются из

совершенно других материалов, чем термоэлектроды и применяются для термопар из благородных металлов. Так, для термопары ПР в качестве компенсационной может использоваться медная проволока. Применение компенсационных проводов может стать доминирующим источником неопределенности измерения температуры в промышленности, если разность температур двух концов провода существенна. Так, например, если для термопары типа S используется компенсационный провод, температура которого изменяется от 23°C (головка термопары) до 0°C (лед), то возникает дополнительная ЭДС около 15 мкВ, что приведет к ошибке в измерении 1,4°C для температуры 900°C. *Применение термопар*

Для измерения температуры различных типов объектов и сред, а также в автоматизированных системах управления и контроля. Термопары из вольфрам-рениевого сплава являются самыми высокотемпературными контактными датчиками температуры. Такие термопары незаменимы в металлургии для контроля температуры расплавленных металлов.

В 1920—30-х годах термопары использовались для питания детекторных приемников и других слаботочных приборов. Вполне возможно использование термогенераторов для подзарядки АКБ современных слаботочных приборов (телефоны, камеры и т. п.) с использованием открытого огня.

Преимущества термопар

- Высокая точность измерения значений температуры (вплоть до $\pm 0,01^\circ\text{C}$)
- Большой температурный диапазон измерения: от -200°C до 2500°C
- Простота
- Дешевизна
- Надежность.

Недостатки термопар

- Для получения высокой точности измерения температуры (до $\pm 0,01^\circ\text{C}$) требуется индивидуальная градуировка термопары.
- На показания влияет температура свободных концов, на которую необходимо вносить поправку. В современных конструкциях измерителей на основе термопар используется измерение температуры блока холодных спаев с помощью встроенного термистора или полупроводникового сенсора и автоматическое введение поправки к измеренной термоэдс (ТЭДС).
- Эффект Пельтье (в момент снятия показаний, необходимо исключить протекание тока через термопару, так как ток, протекающий через неё, охлаждает горячий спай и разогревает холодный).
- Зависимость ТЭДС от температуры существенно нелинейна. Это создает трудности при разработке вторичных преобразователей сигнала.
- Возникновение термоэлектрической неоднородности в результате резких перепадов температур, механических напряжений, коррозии и химических процессов в проводниках приводит к изменению градуировочной характеристики и погрешностям до 5 К.
- На большой длине термопарных и удлинительных проводов может возникать эффект «антенны» для существующих электромагнитных полей.

Для увеличения чувствительности термопар применяют их последовательное соединение – термостолбики.

1.9. Эффект Пельтье

В 1834 г. Ж. Пельтье было открыто явление, обратное явлению Зеебека.

Эффект Пельтье заключается в том, что при протекании тока по цепи, состоящей из двух разнородных металлов в спаих выделяется или поглощается

кроме лент-джоулева тепла добавочное тепло (тепло Пельтье), пропорциональное количеству электричества, протекающего через спай.

Величина выделяемого тепла и его знак зависят от вида контактирующих веществ, направления и силы протекающего электрического тока (рис. 9):

$$Q = P_{AB}It = (P_B - P_A)It,$$

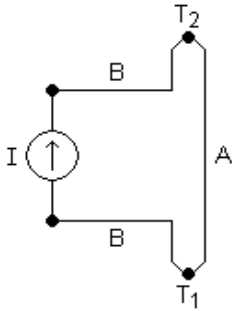


Рис. 9.

где Q – количество выделенного или поглощённого тепла; I – сила тока; t – время протекания тока; P – коэффициент Пельтье, который связан с коэффициентом термоэдс α вторым соотношением Томсона:

$$P = \alpha T,$$

где T – абсолютная температура в К.

Причина возникновения явления Пельтье заключается в следующем. На контакте двух веществ имеется контактная разность потенциалов, которая создаёт внутреннее контактное поле. Если через контакт протекает электрический ток, то это поле будет либо способствовать прохождению тока, либо препятствовать. Если ток идёт против контактного поля, то внешний источник должен затратить дополнительную энергию, которая выделяется в контакте, что приведёт к его нагреву (т.е. при прохождении электрического тока через спай электроны проводимости будут ускоряться контактной разностью потенциалов и в спае выделяется тепло). Если же ток идёт по направлению контактного поля, то он может поддерживаться этим полем, которое и совершает работу по перемещению зарядов. Необходимая для этого энергия отбирается у вещества, что приводит к охлаждению его в месте контакта (при этом электроны проводимости замедляются контактной разностью потенциалов и в спае поглощается тепло).

Элемент Пельтье

Явление Пельтье наблюдается также и у полупроводников. А. Ф. Иоффе предложил использовать явление Пельтье, наблюдающееся при контакте двух полупроводников с различными типами проводимости, для создания холодильных установок. В таких холодильниках рабочим элементом является батарея из спаев различных полупроводников. Одна половина спаев вводится в охлаждаемый объем, другая выводится наружу. При определенном направлении тока первая группа спаев поглощает тепло из внутреннего объема холодильника. Изменив направление тока можно использовать такую систему для внутреннего нагрева. Это свойство используется в элементах Пельтье.

Элемент Пельтье — это термоэлектрический преобразователь, принцип действия которого базируется на эффекте Пельтье — возникновении разности температур при протекании электрического тока.

В англоязычной литературе элементы Пельтье обозначаются **TEC** (от англ. Thermoelectric Cooler — термоэлектрический охладитель).

В основе работы элементов Пельтье (рис.10) лежит контакт двух токопроводящих материалов с разными уровнями энергии электронов в зоне проводимости. При протекании тока через контакт таких материалов, электрон должен приобрести энергию, чтобы перейти в



Рис. 10.

более высокоэнергетическую зону проводимости другого полупроводника. При поглощении этой энергии происходит охлаждение места контакта полупроводников. При протекании тока в обратном направлении происходит нагревание места контакта полупроводников, дополнительно к обычному тепловому эффекту.

При контакте металлов эффект Пельтье настолько мал, что незаметен на фоне омического нагрева и явлений теплопроводности. Поэтому при практическом применении используются контакт двух

полупроводников.

При пропускании тока тепло переносится с одной стороны на другую.

Элемент Пельтье состоит из одной или более пар небольших полупроводниковых параллелепипедов – одного *n*-типа и одного *p*-типа в паре (обычно, теллурида висмута, Bi_2Te_3 и германида кремния), которые попарно соединены при помощи металлических перемычек. Металлические перемычки одновременно служат термическими контактами и изолированы непроводящей плёнкой или керамической пластижкой. Пары параллелепипедов соединяются таким образом, что образуется последовательное соединение многих пар полупроводников с разным типом проводимости, так чтобы сверху были одни последовательности соединений ($n \rightarrow p$), а снизу противоположные ($p \rightarrow n$). Электрический ток протекает последовательно через все параллелепипеды. В зависимости от направления тока верхние контакты охлаждаются, а нижние нагреваются – или наоборот. Таким образом, электрический ток переносит тепло с одной стороны элемента Пельтье на противоположную и создаёт разность температур.

Если охлаждать нагревающуюся сторону элемента Пельтье, например, при помощи радиатора и вентилятора, то температура холодной стороны становится ещё ниже. В одноступенчатых элементах, в зависимости от типа элемента и величины тока, разность температур может достигать приблизительно 70 К.

Достоинством элемента Пельтье является небольшие размеры, отсутствие каких-либо движущихся частей, а также газов и жидкостей. При обращении направления тока возможно как охлаждение, так и нагревание – это даёт возможность термостатирования при температуре окружающей среды как выше, так и ниже температуры термостатирования. Также достоинством являются отсутствие механических частей и отсутствие шума.

Недостатком элемента Пельтье является очень низкий коэффициент полезного действия, что ведёт к большой потребляемой мощности для достижения заметной разности температур. Несмотря на это, элементы Пельтье нашли широкое применение, так как без каких-либо дополнительных устройств можно реализовать температуры ниже 0°C.

В батареях элементов Пельтье возможно достижение теоретически очень большой разницы температур, в связи с этим лучше использовать импульсный метод регулирования температуры, благодаря которому можно снизить также потребление энергии. При этом желательно сглаживать пульсации тока для продления срока службы элемента Пельтье.

Элементы Пельтье применяются в ситуациях, когда необходимо охлаждение с небольшой разницей температур, или энергетическая эффективность охладителя не важна. Например, элементы Пельтье применяются в ПЦР – амплификаторах, маленьких автомобильных холодильниках, так как применение компрессора в этом случае невозможно из-за ограниченных размеров, и, кроме того, необходимая мощность охлаждения невелика.

Кроме того, элементы Пельтье применяются для охлаждения устройств с зарядовой связью в цифровых фотокамерах. За счёт этого достигается заметное уменьшение теплового шума при длительных экспозициях (например, в астрофотографии). Многоступенчатые элементы Пельтье применяются для охлаждения приёмников излучения в инфракрасных сенсорах.

Также элементы Пельтье часто применяются для охлаждения и термостатирования диодных лазеров с тем, чтобы стабилизировать длину волны излучения.

В приборах, при низкой мощности охлаждения, элементы Пельтье часто используются как вторая или третья ступень охлаждения. Это позволяет достичь температур на 30 – 40 К ниже, чем с помощью обычных компрессионных охладителей (до – 80 для одностадийных холодильников и до – 120 для двухстадийных).

2. Теория лабораторной работы

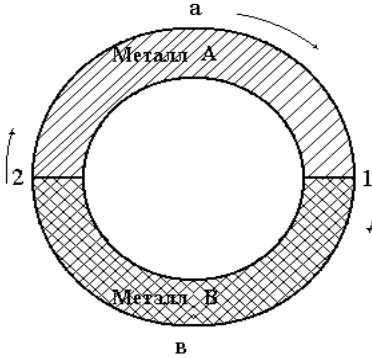


Рис. 12.

Рассмотрим замкнутую цепь (рис. 12) из металлов А и В, температуры спаев 1 и 2 равны соответственно T_1 и T_2 (пусть $T_2 > T_1$).

Контактная разность потенциалов в спае 1 равна:

$$U_{ab} = (A_b/e) - (A_a/e) + (kT_1/e) \cdot \ln(n_{oa}/n_{ob}),$$

в спае 2:

$$U_{ba} = (A_a/e) - (A_b/e) + (kT_2/e) \cdot \ln(n_{ob}/n_{oa}),$$

где n_o – концентрация электронов в металлах, A_a и A_b – работы выхода электрона из металла, e – заряд электрона.

ЭДС есть сумма скачков потенциала при обходе замкнутой цепи

$$E = U_{ab} + U_{ba} = \frac{A_b}{e} - \frac{A_a}{e} + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{oa}}{n_{ob}} + \frac{A_a}{e} - \frac{A_b}{e} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{ob}}{n_{oa}} = \frac{k}{e} (T_2 - T_1) \ln \frac{n_{ob}}{n_{oa}} = \alpha (T_2 - T_1), \quad (11)$$

где $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{ob}}{n_{oa}}$.

Термоэлектродвижущая сила \mathcal{E} прямо пропорциональна разности температур спаев $T_2 - T_1$. Следует заметить, что формула (11) не учитывает зависимость n_o и A от температуры.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Ознакомиться с работой схемы (рис. 13): R_Γ – сопротивление гальванометра, $R_{\text{доп.}}$ – дополнительное сопротивление, К – переключатель, 1 и 2 спаи различных металлов, находящиеся при температурах T_1 и T_2 . Спаи 1 поддерживается при постоянной температуре T_1 , температура T_2 спаи 2 изменяется.

2. Применим к замкнутому контуру закон Ома: $\mathcal{E} = I_1(R_T + R_\Gamma)$, где R_T – сопротивление термопары, \mathcal{E} – термо – ЭДС. Учтя, что $R_T \ll R_\Gamma$, имеем:

$$\mathcal{E} = I_1 R_\Gamma$$

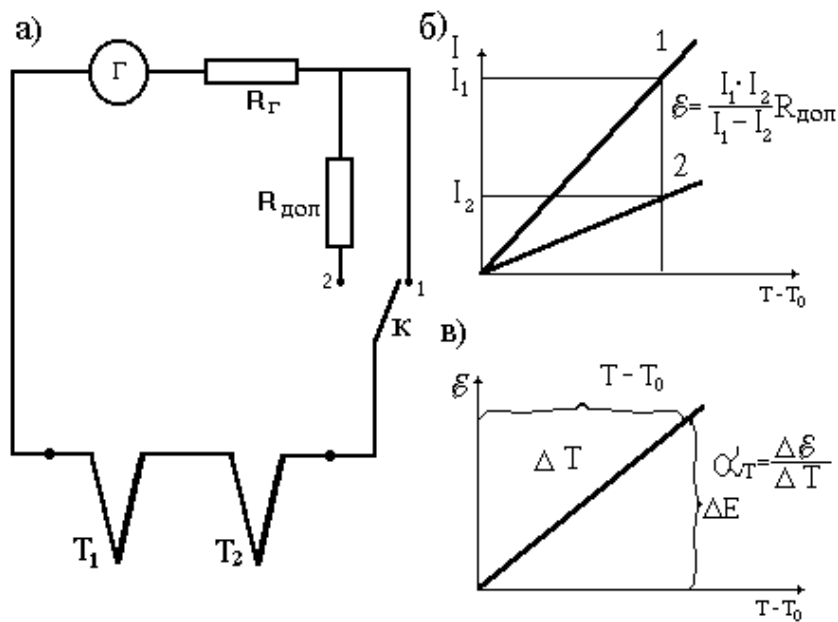


Рис.13.

Сопротивление гальванометра неизвестно, поэтому его нужно исключить. Это можно сделать, написав два уравнения:

$$\varepsilon = I_2(R_{\Gamma} + R_{\text{доп}}); \quad \varepsilon = I_1 R_{\Gamma} \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{I_1 \cdot I_2}{I_1 - I_2} R_{\text{доп}} = \frac{I_2}{1 - \frac{I_2}{I_1}} R_{\text{доп}}, \quad (13)$$

где I_1 – ток в цепи без добавочного сопротивления, I_2 – ток в цепи с добавочным сопротивлением.

3. Зафиксировать значение температуры холодного спая T_1 . Включить нагреватель и заносить показания микроамперметра в таблицу через интервал температур $(3 \div 5)^\circ\text{C}$ с дополнительным сопротивлением и без него до температуры $(80 \div 90)^\circ\text{C}$.
4. Построить зависимости $I_1 = f(T_2 - T_1)$ и $I_2 = \varphi(T_2 - T_1)$ на одном графике, откладывая разность температур по оси абсцисс.
5. Рассчитать значения ε по формуле (13) и построить зависимость $\varepsilon = \alpha(T_2 - T_1)$, откладывая значения ε по оси ординат.
6. Определить значение постоянной термопары α из графика как отношение приращения термоэдс $\Delta\varepsilon$ соответствующее приращению температуры ΔT .
7. Зная табличное значение (для материала термопары хромель-капель: $\alpha_{\text{табл.}} = 67 \text{ мкВ/град}$), и принимая её за истинное значение, вычислить абсолютную и относительную погрешности измерений.

Отформатировано: Шрифт: (по умолчанию) Times New Roman, 13 пт, Цвет шрифта: Авто

Таблица

№ измерения	T_1 , К	T_2 , К	$T_2 - T_1$, К	I_1 , мкА	I_2 , мкА	ε , мкВ	$\langle \alpha \rangle$, мкВ/град	Относительная погрешность δ %.
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

8. Проанализировать результаты, сделать вывод.

Окончательный результат: $\alpha =$ _____

Справочные данные: Термопара: хромель – капель; $R_{\text{доп}} = 74,3$ Ом.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется работой выхода электрона из металла и от чего она зависит?
2. Что называется термоэлектронной эмиссией?
3. Что называется контактной разностью потенциалов? Объяснить причины её возникновения.
4. Сформулируйте законы Вольта.
5. Опишите природу возникновения термо–эдс. От чего зависит термо–эдс?
6. Термопара, её устройство?
7. Постоянная термопары, от чего она зависит?

8. Как возникает тепло Пельтье?

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: исследовать зависимость сопротивления проводника от температуры, определить температурный коэффициент сопротивления металлов.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Проводники металлические	–	–	–	–
2	Универсальный мост постоянного тока	–	–	–	–
3	Нагреватель	–	–	–	–
4	Термометр	–			

1. Теоретические сведения

Основные понятия и закон

1.1. Проводники

Проводники – это вещества, хорошо проводящие электрический ток.

Их удельное сопротивление $\rho \sim 10^{-8} - 10^{-6}$ Ом·м. К проводникам относятся металлы, электролиты, плазма.

1.2. Основы электронной теории проводимости металлов

В начале XX века была создана классическая электронная теория проводимости металлов (П. Друде, 1900 г., Х.Лоренц, 1904 г.), которая дала простое и наглядное объяснение большинства электрических и тепловых свойств металлов. Рассмотрим некоторые положения этой теории.

Металлический проводник состоит из:

1) *положительно заряженных ионов*, колеблющихся около положения равновесия, и

2) *свободных электронов*, способных перемещаться по всему объему проводника.

Таким образом, электрические свойства металлов обусловлены наличием в них свободных электронов с концентрацией порядка 10^{28} м^{-3} , что примерно соответствует концентрации атомов. Эти электроны называются *электронами проводимости*. Они образуются путем отрыва от атомов металлов их валентных электронов. Такие электроны не принадлежат какому-то определенному атому и способны перемещаться по всему объему тела.

В металле в отсутствие электрического поля электроны проводимости хаотически движутся и сталкиваются, чаще всего с ионами кристаллической

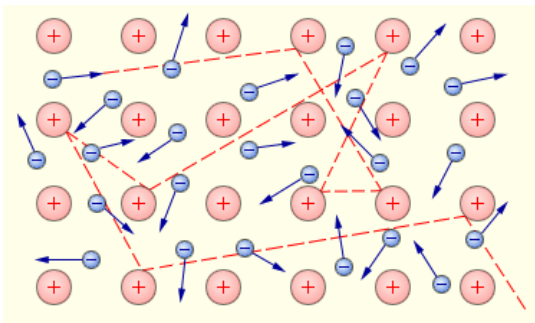


Рис. 1.

решетки (рис. 1). Совокупность этих электронов можно приблизительно рассматривать как некий *электронный газ*, подчиняющийся законам идеального газа. Средняя скорость теплового движения электронов при комнатной температуре составляет примерно 10^5 м/с .

1.3. Электрическое сопротивление металлов

Сопротивление металлов объясняется столкновениями электронов проводимости с ионами кристаллической решетки. При этом, очевидно, чем чаще происходят такие столкновения, т. е. чем меньше среднее время свободного пробега электрона между столкновениями τ , тем больше удельное сопротивление металла.

В свою очередь, время τ зависит от расстояния между ионами решетки, амплитуды их колебаний, характера взаимодействия электронов с ионами и скорости теплового движения электронов. С ростом температуры металла амплитуда колебаний ионов и скорость теплового движения электронов увеличиваются. Возрастает и число дефектов кристаллической решетки. Все это приводит к тому, что при увеличении температуры металла столкновения электронов с ионами будут происходить чаще, т.е. время τ уменьшается, а удельное сопротивление металла увеличивается.

Электрический ток в металле возникает под действием внешнего электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Движущиеся под действием поля электроны рассеиваются на неоднородностях ионной решетки (на примесях, дефектах решетки, а также нарушениях периодической структуры, связанной с тепловыми колебаниями ионов). При этом электроны теряют импульс, а энергия их движения преобразуется во внутреннюю

энергию кристаллической решётки, что и приводит к нагреванию проводника при прохождении по нему электрического тока.

Электрическое сопротивление R (э.с.) – физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать прохождению электрического тока, измеряется в Омах (Ом).

Э. с. обусловлено передачей или преобразованием электрической энергии в другие виды: при необратимом преобразовании электрической энергии (преимущественно в тепловую энергию) э. с. называется *активным сопротивлением*; э. с., обусловленное передачей энергии электрическому или магнитному полю (и обратно), называется *реактивным сопротивлением*.

Эталоном сопротивления 1 Ом служит столбик ртути длиной 106,3 см и площадью поперечного сечения 1 мм² при температуре 0°C.

На практике часто сопротивления измеряют тысячами Ом – килоомами (кОм) или миллионами (МОм) – мегаомами (МОм).

Сопротивление (часто обозначается буквой R или r) считается, в определённых пределах, постоянной величиной для данного проводника; её можно рассчитать как:

$$R = \frac{U}{I},$$

где R – сопротивление; U – разность электрических потенциалов (напряжение) на концах проводника; I – сила тока, протекающего между концами проводника под действием разности потенциалов.

В других средах (полупроводниках, диэлектриках, электролитах, неполярных жидкостях, газах и т. д.) в зависимости от природы носителей заряда физическая причина сопротивления может быть иной. Линейная зависимость, выраженная законом Ома, соблюдается не во всех случаях.

Сопротивление проводника при прочих равных условиях зависит от его геометрии и от *удельного электрического сопротивления* материала, из которого он состоит.

Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где ρ – *удельное сопротивление* вещества проводника (измеряется в СИ: Ом · м), l – длина проводника, S – площадь сечения проводника (активное сопротивление для однородного по составу элемента в виде бруска, пластины, трубки или проволоки при постоянном его сечении).

Удельное сопротивление – скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения.

(За величину, характеризующую удельное сопротивление, обычно принимают сопротивление куба с ребром 1 м).

По удельному сопротивлению все вещества делятся на проводники, полупроводники, диэлектрики (изоляторы).

Сопротивление R зависит как от материала, по которому течёт ток, так и от геометрических размеров проводника и от температуры.

Сопротивление металлов снижается при понижении температуры; при температурах порядка нескольких Кельвинов сопротивление большинства металлов и сплавов стремится или становится равным нулю (эффект сверхпроводимости).

Напротив, сопротивление полупроводников и изоляторов при снижении температуры растёт. Сопротивление также меняется по мере увеличения тока/напряжения, протекающего через проводник/полупроводник.

Проводник, обладающий электрическим сопротивлением, называется *резистором*.

1.4. Электропроводимость

Всякий проводник можно характеризовать не только его сопротивлением, но и так называемой *проводимостью* – способностью проводить электрический ток.

Проводимость есть величина, обратная сопротивлению.

Единица проводимости называется сименсом (См): $1 \text{ См} = 1/\text{Ом}$.

Проводимость обозначают буквой G :

$$G = 1 / R, (\text{См})$$

Для суждения об электропроводности материалов пользуются также понятием удельная электрическая проводимость $\gamma = 1/\rho$. *Удельная электрическая проводимость измеряется в сименсах на метр (См/м) (проводимость куба с ребром 1 м).*

Проводниковые материалы применяют, главным образом, в виде проволок, шин или лент, площадь поперечного сечения которых принято выражать в квадратных миллиметрах, а длину – в метрах. Поэтому для удельного электрического сопротивления подобных материалов и удельной электрической проводимости введены и другие единицы измерения: ρ измеряют в Ом · мм²/м (сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм²), а γ – в См · м/мм² (проводимость проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм²).

Из металлов наиболее высокой электропроводностью обладают серебро и медь, так как структура их атомов позволяет легко передвигаться свободным электронам, затем следует золото, хром, алюминий, марганец, вольфрам и т. д. Хуже проводят ток железо и сталь.

Чистые металлы всегда проводят электрический ток лучше, чем их сплавы. Поэтому в электротехнике используют преимущественно очень чистую медь, содержащую только 0,05 % примесей. И, наоборот, в тех случаях, когда необходим материал с высоким сопротивлением (для различных нагревательных приборов, реостатов и пр.), применяют специальные сплавы: константан, манганин, нихром, фехраль.

Следует отметить, что в технике, кроме металлических проводников, используют и неметаллические. К таким проводникам относится, например, уголь, из которого изготавливают щетки электрических машин, электроды для прожекторов и пр. Проводниками электрического тока являются толща земли, живые ткани растений, животных и человека. Проводят электрический ток сырое дерево и многие другие изоляционные материалы во влажном состоянии.

1.5. Зависимость сопротивления проводников от температуры

Электрическое сопротивление проводников зависит от температуры. У металлов оно возрастает при нагревании, у электролитов – при охлаждении.

В металлических проводниках при нагревании размах и скорость колебаний атомов в кристаллической решетке металла увеличиваются, вследствие чего возрастает и сопротивление, которое они оказывают потоку электронов. При охлаждении происходит обратное явление: беспорядочное колебательное движение атомов в узлах кристаллической решетки уменьшается, сопротивление их потоку электронов понижается и электропроводность проводника возрастает.

Опыт показывает, что при не слишком высоких и не слишком низких температурах зависимости удельного сопротивления от температуры выражается линейной функцией:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t),$$

где $\Delta t = t - t_0$, $t_0 = 0^\circ\text{C}$, ρ_0 , ρ – удельные сопротивления вещества проводника соответственно при 0°C и $t^\circ\text{C}$, α – температурный коэффициент сопротивления, измеряемый в СИ в Кельвинах в минус первой степени (K^{-1}) (или $^\circ\text{C}^{-1}$), *зависит от материала проводника*.

Зависимость сопротивления от температуры может быть представлена эмпирической формулой в виде бесконечного ряда:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots) \quad (1)$$

где R_t – сопротивление при температуре t ; R_0 – сопротивление при $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Коэффициенты α , β , γ должны определяться из опыта. Опыт показывает, что коэффициенты при высоких значениях t малы, например: $\beta = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-2}$; $\gamma = 0,06 \cdot 10^{-9} \text{град}^{-3}$.

По этой причине при малых температурах можно ограничиться одним членом в разложении (1): $R_t = R_0(1 + \alpha t)$. (2)

Температурный коэффициент сопротивления вещества α – это величина, численно равная относительному изменению удельного сопротивления проводника при его нагревании на 1 К:

$$\alpha = \Delta\rho / (\rho_0 \cdot \Delta T),$$

где $\Delta\rho = \rho - \rho_0$.

Для всех металлических проводников $\alpha > 0$ и слабо изменяется с изменением температуры. Для большинства металлов в интервале температур от 0° до 100°C коэффициент α изменяется от $3,3 \cdot 10^{-3}$ до $6,2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. У химически чистых металлов $\alpha = 1/273 \text{K}^{-1}$.

Существуют специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании, например, *манганин* и *константан*. Их температурные коэффициенты сопротивления очень малы и равны соответственно $1 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$ и $5 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$.

Если пренебречь изменением размеров металлического проводника при нагревании, то такую же линейную зависимость от температуры будет иметь и его сопротивление:

$$R_t^o = R_0^o \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t),$$

где R_0, R_t — сопротивления проводника при 0°C и $t^\circ \text{C}$.

Зависимость удельного сопротивления металлических проводников ρ от температуры t изображена на рисунке 2.

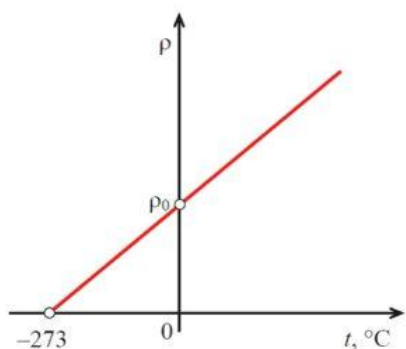


Рис. 2.

Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры имеет для экспериментальной физики и техники большое значение. Точные измерения температуры производятся при помощи термометров сопротивления. Последние представляют собой проволочные (обычно платиновые) сопротивления, проградуированные в специальных термостатах. После такой градуировки изменение сопротивления такого термометра позволяет определить температуру среды, в которой находится термометр. Диапазон применения термометра сопротивления шире диапазона применения ртутных термометров. Так, платиновый термометр сопротивления можно применять в интервале температур от 2630 до $+10000^\circ \text{C}$.

1.6. *Сверхпроводимость*

В 1911 г. голландский физик Г. Камерлинг–Оннес, изучая изменение электрического сопротивления ртути при низких температурах, обнаружил, что при температуре около 4 К (т.е. при -269°C) удельное сопротивление скачком уменьшается (рис. 3) до нуля. Это явление Г. Камерлинг–Оннес назвал *сверхпроводимостью*.

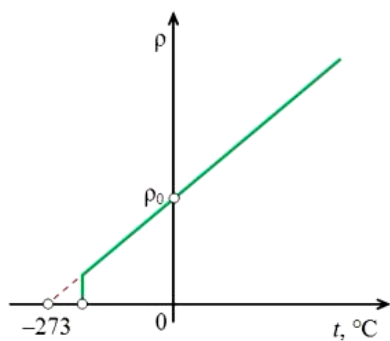


Рис. 3.

Г. Камерлинг–Оннес был удостоен *Нобелевской премии* по физике 1913 г. «за исследования свойств вещества при низких температурах».

Сверхпроводимость — свойство многих проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже определённой критической температуры T_k , характерной для данного материала.

Измерения показали, что падение сопротивления до нуля происходит на протяжении очень узкого, но конечного интервала температур. Ширина этого интервала для чистых образцов составляет $10^{-3} - 10^{-4} \text{K}$ и возрастает при наличии примесей и других дефектов структуры.

Переход вещества в сверхпроводящее состояние — пример фазового перехода II рода.

Сверхпроводимость обнаружена у более чем 25 металлических элементов, у большого числа сплавов и интерметаллических соединений, а также у некоторых полупроводников. При этом сами элементы, входящие в состав сверхпроводящего соединения, могут и не являться сверхпроводниками. Самое низкое значение T_k из чистых металлов у вольфрама — $0,012 \text{K}$,

самое высокое у ниобия – 9 К. Рекордно высоким значением T_c (около 23 К) обладает соединение Nb_3Ge .

Открытие в 1986 – 1993 гг. ряда высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) далеко отодвинуло температурную границу сверхпроводимости и позволило практически использовать сверхпроводящие материалы не только при температуре жидкого гелия (4.2 К), но и при температуре кипения жидкого азота (77 К), гораздо более дешевой криогенной жидкости.

Свойства сверхпроводников

- В сверхпроводниках однажды возбужденный электрический ток может длительное время существовать без источника тока.
- Внутри вещества в сверхпроводящем состоянии магнитная индукция всегда равна нулю ($\vec{B} = 0$), т.е. сверхпроводник является идеальным диамагнетиком.
- Магнитное поле разрушает состояние сверхпроводимости. Величина критического магнитного поля (\vec{B}_c), разрушающего сверхпроводимость, равна нулю при $T = T_c$ и растёт с понижением температуры.

Полное объяснение сверхпроводимости было дано в 1957 г. Д.Бардиным, Л.Купером, Д.Шриффером (*БКШ* – теория) на основе квантовой механики.

Широкому применению сверхпроводимости до недавнего времени препятствовали трудности, связанные с необходимостью охлаждения до сверхнизких температур, для чего использовался жидкий гелий. Тем не менее, несмотря на сложность оборудования, дефицитность и дороговизну гелия, с 60-х годов XX века создаются сверхпроводящие магниты без тепловых потерь в их обмотках, что сделало практически возможным получение сильных магнитных полей в сравнительно больших объемах. Именно такие магниты требуются для создания установок управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы, для мощных ускорителей заряженных частиц. Сверхпроводники используются в различных измерительных приборах, прежде всего в приборах для измерения очень слабых магнитных полей с высочайшей точностью.

На основе сверхпроводящих пленок создан ряд быстродействующих логических и запоминающих элементов для счетно – решающих устройств. При космических исследованиях перспективно использование сверхпроводящих соленоидов для радиационной защиты космонавтов, стыковки кораблей, их торможения и ориентации, для плазменных ракетных двигателей.

В настоящее время созданы керамические материалы, обладающие сверхпроводимостью при более высокой температуре – свыше 100 К, то есть при температуре выше температуры кипения азота. Возможность охлаждать сверхпроводники жидким азотом, который имеет на порядок более высокую теплоту парообразования, существенно упрощает и удешевляет все криогенное оборудование, обещает огромный экономический эффект.

1.7. Недостатки электронной теории проводимости

Несмотря на то, что электронной теории проводимости металлов объяснила ряд явлений, она имеет и свои недостатки:

- Из теории следовало, что удельное сопротивление должно быть пропорционально корню квадратному из температуры ($\rho \sim \sqrt{T}$), между тем, согласно опыту, $\rho \sim T$.
- Для того чтобы получить значения удельной электрической проводимости металла, полученных из опыта, приходится принимать среднюю длину свободного пробега электронов в сотни раз большей, чем период решетки металла. Иными словами,

электрон должен проходить без соударений с ионами решетки сотни атомов.

- Данная теория не смогла объяснить причину сверхпроводимости.

Приведенные выше недостатки указывают на то, что классическая электронная теория, представляя электрон как материальную точку, подчиняющуюся законам классической механики, не учитывала некоторых специфических свойств самого электрона, которые еще не были известны к началу XX века. Эти свойства были установлены позднее при изучении строения атома, и в 1924 г. была создана новая, так называемая *квантовая или зонная теория твёрдого тела*.

2. Теория лабораторной работы

В работе исследуются проводники из меди и вольфрама. Нагревание проводников производится одновременно в интервале температур от 20 до 100 °С. Измерение сопротивлений проводников осуществляется поочередным подключением их к мосту постоянного тока переключателем П (положения 1 и 2 на рис. 4).

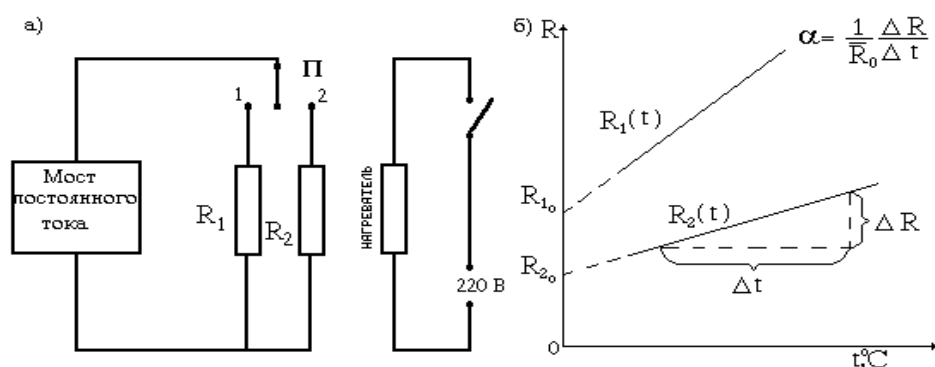


Рис. 4.

Измерение сопротивлений производится непрерывно в процессе нагрева проводников. *Рекомендуется фиксировать значения сопротивлений через 10°С.*

Измерения и обработка результатов

1. Изучить установку и ознакомиться с мостом постоянного тока (см. примечание).
2. С разрешения преподавателя включить прибор и измерить сопротивление металлов при комнатной температуре мостом постоянного тока, записать результаты в таблицу.
3. Включить тумблер "Нагрев". Измерения проводить в процессе нагрева, как указано выше, до 90 – 100 °С. Значения температур и полученные значения сопротивлений занести в таблицу.

4. Обесточить установку.
5. Построить зависимость $R = f(t)$ для различных металлов (на одном графике).
6. Экстраполируя значения R_1 и R_2 на графике $R_1(t)$ и $R_2(t)$ до $t = 0^\circ\text{C}$, графически определить R_{01} и R_{02} .
7. Рассчитать по графику значения α_1 и α_2 .
8. Сравнить полученные значения α с табличными данными, вычислить относительную погрешность измерения, приняв табличные значения за истинные.

Примечание. Подготовка моста постоянного тока к работе

1. Перед измерением убедиться, что стрелка гальванометра установлена на "0".
2. Установить тумблер "СЕТЬ" в положение "ВКЛ." – загорается сигнальная лампочка прибора.
3. Измерение сопротивлений производить по 2-зажимной схеме подключения в следующем порядке:
 - а) измеряемое сопротивление подключить согласно схеме (рис. 5);

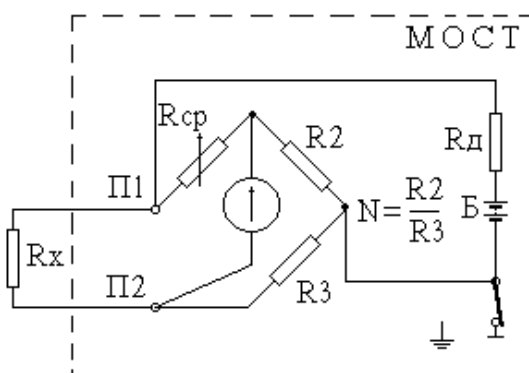


Рис. 5.

- б) переключатель схемы измерения "ПС" установить в положение "2з" (2-зажимная схема включения);
- в) на переключателе плеч установить множитель "1";
- г) при нажатой кнопке "ГРУБО" вращением рукояток переключателей "x 100", "x 10", "x 1", "x 0,1", "x 0,01" установить стрелку гальванометра на нуль, (кнопкой "ТОЧНО" можно пользоваться с разрешения преподавателя);
- д) результат измерения определить по формуле: $R_x = NR$, где N – множитель переключателя плеч ($N = 1$) $R = (X_1 \cdot 100 + X_2 \cdot 10 + X_3 \cdot 1 + X_4 \cdot 0,1 + X_5 \cdot 0,01)$ Ом; X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 – показания рукояток переключателей плеча сравнения соответственно "x 100", "x 10", "x 1", "x 0,1", "x 0,01".

Таблица

№ n/n	t, °C	Металл 1 (медь)				Относительная погрешность δ %
		R_t , Ом	R_{01} , Ом	α , К ⁻¹	$\alpha_{\text{табл}}$, К ⁻¹	
1					$4,2 \cdot 10^{-3}$	
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Металл 2 (вольфрам)					
1					$4,5 \cdot 10^{-3}$
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Окончательный результат:

Медь: $\alpha =$ _____

Вольфрам: $\alpha =$ _____

4. Проанализировать результаты, сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм проводимости в металлах с точки зрения классической электронной теории металлов.
2. Как с точки зрения классической электронной теории объясняется электрическое сопротивление металлов?
3. Как изменяется (увеличивается или уменьшается) с ростом температуры электрическое сопротивление:
 - металлов,
 - полупроводников,
 - электролитов.
4. Что называется температурным коэффициентом сопротивления? От чего он зависит? Единица измерения?
5. Объясните, как определяются в работе значения сопротивлений при $t = 0^{\circ}\text{C}$.
6. Объясните устройство и порядок измерения сопротивлений с помощью универсального моста МО-62.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
3. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: построить зависимость электропроводности полупроводника от температуры и определить ширину запрещённой зоны.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Источник питания	–	–	–	–
2	Полупроводник	–	–	–	–
3	Нагреватель	–	–	–	–
4	Вольтметр				
5	Амперметр				

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. Полупроводники

Полупроводники – широкий класс веществ, который по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения.

Основным свойством полупроводников, отличающих их от металлов, является увеличение электрической проводимости с ростом температуры. Проводимость полупроводников сильно зависит от температуры. Вблизи температуры абсолютного нуля полупроводники имеют свойства диэлектриков.

В связи с этим полупроводники от металлов отличают по целому ряду признаков:

- удельное сопротивление у полупроводников при обычных условиях гораздо больше, чем у металлов;
- удельное сопротивление чистых полупроводников уменьшается с ростом температуры (у металлов оно растёт);
- при освещении полупроводников их сопротивление значительно уменьшается (на сопротивление металлов свет почти не влияет);
- ничтожное количество примесей оказывает сильное влияние на сопротивление полупроводников.

К полупроводникам принадлежат 12 химических элементов в средней части таблицы Менделеева – В, С, Si, P, S, Ge, As, Se, Sn, Sb, Te, I, соединения элементов третьей группы с элементами пятой группы, многие оксиды и сульфиды металлов, ряд других химических соединений, некоторые органические вещества. Почти все неорганические вещества окружающего нас мира – полупроводники. Самым распространённым в природе полупроводником является кремний, составляющий почти 30 % земной коры. Наибольшее применение для науки и техники имеют германий Ge и кремний Si.

Носителями заряда в полупроводниках являются *электроны проводимости* и *дырки*. В идеальных кристаллах они появляются всегда парами, так что их концентрации равны. В реальных кристаллах, содержащих примеси и дефекты структуры, равенство концентраций электронов и дырок может нарушаться и проводимости осуществляется практически только одним типом носителей.

Поэтому полупроводники могут быть чистыми и с примесями. Соответственно различают *собственную* и *примесную* проводимость полупроводников. В зависимости от того, отдаёт ли примесной атом электрон или захватывает его, примесные атомы называют донорными или акцепторными. Таким образом, примеси в свою очередь делят на *донорные* и *акцепторные*. Характер примеси может меняться в зависимости от того, какой атом кристаллической решётки она замещает, в какую кристаллографическую плоскость встраивается.

1.2. Проводимость полупроводников

При приложении электрического поля к однородному полупроводнику в последнем протекает электрический ток.

При наличии двух типов свободных носителей – электронов и дырок – проводимость полупроводника будет определяться суммой электронной и дырочной компонент проводимости. Для легированных полупроводников концентрация основных носителей всегда существенно больше, чем концентрация неосновных носителей, поэтому проводимость таких полупроводников будет определяться только компонентой проводимости основных носителей.

По типу проводимости полупроводники бывают *собственными* и *примесными*.

Механизм электрической проводимости

В полупроводниковых кристаллах атомы устанавливают ковалентные связи (то есть, один электрон в кристалле кремния, как и алмаза, связан двумя атомами), электронам необходим уровень внутренней энергии для высвобождения из атома ($1,76 \cdot 10^{-19}$ Дж против $11,2 \cdot 10^{-19}$ Дж, чем и характеризуется отличие между полупроводниками и диэлектриками). Эта энергия появляется в них при повышении температуры (например, при комнатной температуре уровень энергии теплового движения атомов равняется $0,4 \cdot 10^{-19}$ Дж), и отдельные электроны получают энергию для отрыва от ядра. С ростом температуры число свободных электронов и дырок увеличивается, поэтому в полупроводнике, не содержащем примесей, удельное электрическое сопротивление уменьшается. Условно принято считать полупроводниками элементы с энергией связи электронов меньшей, чем 1,5–2 эВ. Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется у собственных (то есть без примесей) полупроводников. Он называется собственной электрической проводимостью полупроводников. Поэтому ток I в полупроводнике складывается из электронного I_n и дырочного I_p токов:

$$I = I_n + I_p.$$

Дырки

Во время разрыва связи между электроном и ядром появляется свободное место в электронной оболочке атома. Это обуславливает переход электрона с другого атома на атом со свободным местом. На атом, откуда перешёл электрон, входит другой электрон из другого атома и т.д. Этот процесс обуславливается ковалентными связями атомов. Таким образом, происходит перемещение положительного заряда без перемещения самого атома. Этот условный положительный заряд называют *дыркой*.

Обычно подвижность дырок в полупроводнике ниже подвижности электронов.

Собственная проводимость полупроводников

Собственные полупроводники – это полупроводники, в которых нет примесей (доноров и акцепторов). Концентрация электронов n и дырок p в таком полупроводнике равны.

Для понимания механизма электрической проводимости в полупроводниках рассмотрим строение полупроводниковых кристаллов и природу связей, удерживающих атомы кристалла друг возле друга. Кристаллы германия и других полупроводников имеют атомную кристаллическую решетку (рис. 1).

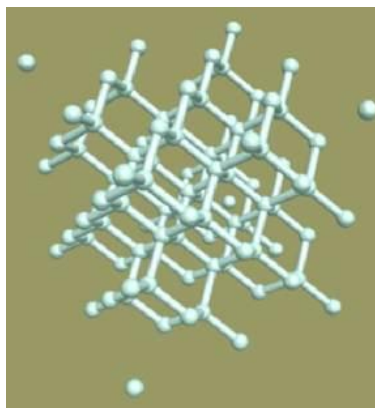


Рис. 1.

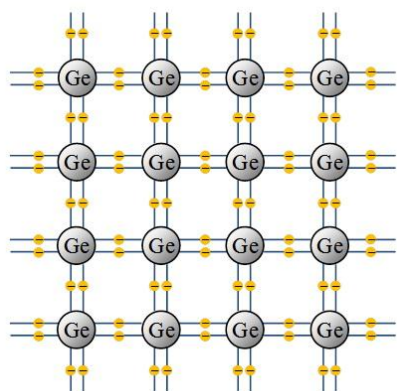


Рис. 2.

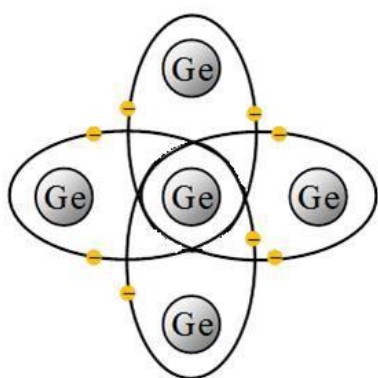


Рис. 3.

Плоская схема структуры германия показана на рисунке 2. Германий – четырехвалентный элемент, во внешней оболочке атома есть четыре электрона, слабее связанных с ядром, чем остальные. Число ближайших соседей каждого атома германия также равно 4. Четыре валентных электрона каждого атома германия связаны с такими же электронами соседних атомов химическими парноэлектронными (*ковалентными*) связями. В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону, которые отщепляются от атомов (коллективизируются кристаллом) и при своем движении большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы германия друг возле друга. Такого рода связь условно может быть изображена двумя линиями, соединяющими ядра (см. рис. 2).

Но коллективизированная пара электронов принадлежит не только двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними, а данный валентный электрон может двигаться по любой из них (рис. 3). Дойдя до соседнего атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла. Коллективизированные валентные электроны принадлежат всему кристаллу.

Ковалентные связи германия достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому германий при низкой температуре не проводит электрический ток. Участвующие в связи атомов валентные электроны прочно привязаны к кристаллической решетке, и внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение. Аналогичное строение имеет и кристалл кремния.

Электропроводимость химически чистого полупроводника возможна в том случае, когда ковалентные связи в кристаллах разрываются и появляются свободные электроны.

Дополнительная энергия, которая должна быть затрачена, чтобы разорвать ковалентную связь и сделать электрон свободным, называется *энергией активации*.

Получить эту энергию электроны могут при нагревании кристалла, при облучении его высокочастотными электромагнитными волнами и т.д.

Как только электрон, приобретя необходимую энергию, уходит с локализованной связи, на ней образуется вакансия. Эту вакансию может легко заполнить электрон с соседней связи, на которой, таким образом, также образуется вакансия. Таким образом, благодаря перемещению электронов связи происходит перемещение вакансий по всему кристаллу. Эта вакансия ведет себя точно так же, как и свободный электрон – она свободно перемещается по

объему полупроводника. Более того, учитывая, что и полупроводник в целом, и каждый его

атом при не нарушенных ковалентных связях электрически нейтрален, можно сказать, что уход электрона со связи и образование вакансии фактически эквивалентно появлению на этой связи избыточного положительного заряда. Поэтому образовавшуюся вакансию можно формально рассматривать как носитель положительного заряда, который называют *дыркой* (рис. 4).

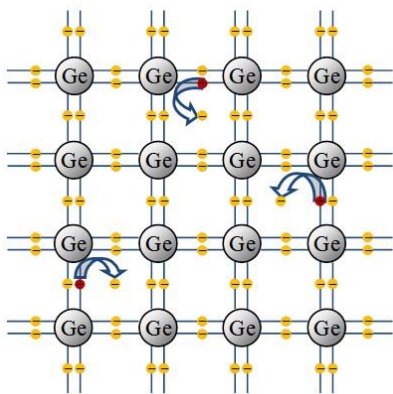


Рис. 4.

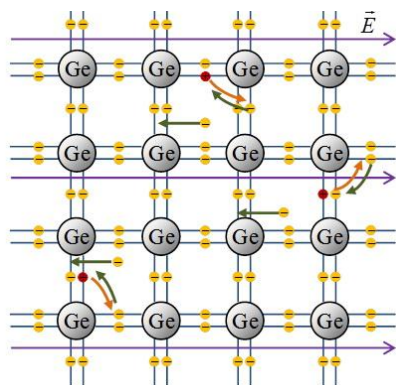


Рис. 5.

Примесная проводимость полупроводников

Легирование – введение примеси в полупроводник, в этом случае полупроводник называется *примесным*.

Один и тот же полупроводник обладает либо электронной, либо дырочной проводимостью – это зависит от химического состава введенных примесей. Если в полупроводник, состоящий из элементов 4 группы (например, кремний или германий), ввести в качестве примеси элемент 5 группы, то получим донорный полупроводник (у него будет электронный тип проводимости), или полупроводник *n*-типа. (Примеси создающие такую электропроводимость называют донорами).

Если же ввести в качестве примеси элемент 3 группы, то получится акцепторный полупроводник, обладающий дырочной проводимостью (*p*-тип). (Дырочная примесная электропроводимость создается атомами, имеющими меньшее количество валентных электронов, чем основные атомы. Подобные примеси называются акцепторными).

Таким образом, уход электрона с локализованной связи порождает пару свободных носителей заряда – электрон и дырку. Их концентрация в чистом полупроводнике одинакова. При комнатной температуре концентрация свободных носителей в чистых полупроводниках невелика, примерно в $10^9 \div 10^{10}$ раз меньше концентрации атомов, но при этом она быстро возрастает с увеличением температуры.

Сравните с металлами: там концентрация свободных электронов примерно равна концентрации атомов.

В отсутствие внешнего электрического поля эти свободные электроны и дырки движутся в кристалле полупроводника хаотически.

Во внешнем электрическом поле электроны перемещаются в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля. Положительные дырки перемещаются в направлении напряженности электрического поля (рис. 5). Процесс перемещения электронов и дырок во внешнем поле происходит по всему объему полупроводника.

Общая удельная электропроводность полупроводника складывается из дырочной и электронной проводимостей. При этом у чистых полупроводников число электронов проводимости всегда равно числу дырок. Поэтому говорят, что чистые полупроводники обладают *электронно-дырочной проводимостью*, или *собственной проводимостью*.

Примесной проводимостью полупроводников называется проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике.

Примесными центрами могут быть:

1. атомы или ионы химических элементов, внедренные в решетку полупроводника;
2. избыточные атомы или ионы, внедренные в междоузлия решетки;
3. различного рода другие дефекты и искажения в кристаллической решетке: пустые узлы, трещины, сдвиги, возникающие при деформациях кристаллов, и др.

Изменяя концентрацию примесей, можно значительно увеличивать число носителей зарядов того или иного знака и создавать полупроводники с преимущественной концентрацией либо отрицательно, либо положительно заряженных носителей.

Примеси можно разделить на донорные (отдающие) и акцепторные (принимающие).

Донорная примесь

Рассмотрим механизм электропроводности полупроводника с донорной пятивалентной примесью мышьяка As, которую вводят в кристалл, например, кремния. Пятивалентный атом мышьяка отдает четыре валентных электрона на образование ковалентных связей, а пятый электрон оказывается незанятым в этих связях (рис. 6).

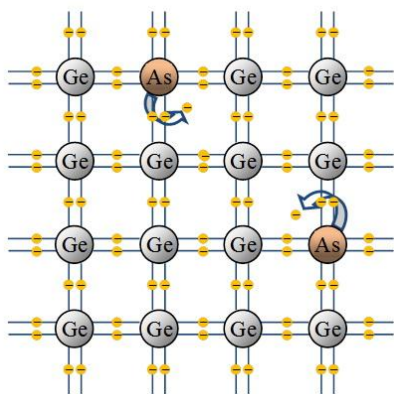


Рис. 6.

Энергия отрыва (энергия ионизации) пятого валентного электрона мышьяка в кремнии равна $0,05 \text{ эВ} = 0,08 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, что в 20 раз меньше энергии отрыва электрона от атома кремния. Поэтому уже при комнатной температуре почти все атомы мышьяка теряют один из своих электронов и становятся положительными ионами. Положительные ионы мышьяка не могут захватить электроны соседних атомов, так как все четыре связи у них уже укомплектованы электронами. В этом случае перемещения электронной вакансии — «дырки» не происходит и дырочная проводимость очень мала, т.е. практически отсутствует.

Донорные примеси — это примеси легко отдающие электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов.

При наличии электрического поля свободные электроны приходят в упорядоченное движение в кристалле полупроводника, и в нем возникает электронная примесная проводимость. В итоге мы получаем полупроводник с преимущественно электронной проводимостью, называемый полупроводником — типа. (От лат. *negativus* — отрицательный).

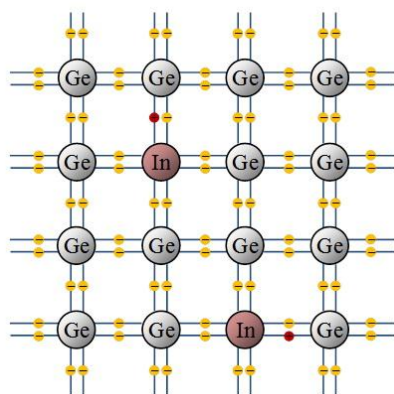


Рис. 7.

Поскольку в полупроводнике n-типа число электронов значительно больше числа дырок, то электроны являются основными носителями заряда, а дырки — неосновными.

Акцепторная примесь

В случае акцепторной примеси, например, трехвалентного индия In атом примеси может дать свои три электрона для осуществления ковалентной связи только с тремя соседними атомами кремния, а одного электрона «недостает» (рис. 7). Один из электронов соседних атомов кремния может заполнить эту

связь, тогда атом In станет неподвижным отрицательным ионом, а на месте ушедшего от одного из атомов кремния электрона образуется дырка. Акцепторные примеси, захватывая электроны и создавая тем самым подвижные дырки, не увеличивают при этом числа электронов проводимости. Основные носители заряда в полупроводнике с акцепторной примесью – дырки, а неосновные – электроны.

Акцепторные примеси – это примеси, обеспечивающие дырочную проводимость.

Полупроводники, у которых концентрация дырок превышает концентрацию электронов проводимости, называются полупроводниками р-типа (От лат. positivus – положительный.).

Необходимо отметить, что введение примесей в полупроводники, как и в любых металлах, нарушает строение кристаллической решетки и затрудняет движение электронов. Однако сопротивление не увеличивается из-за того, что увеличение концентрации носителей зарядов значительно уменьшает сопротивление. Так, введение примеси бора в количестве 1 атом на сто тысяч атомов кремния уменьшает удельное электрическое сопротивление кремния приблизительно в тысячу раз, а примесь одного атома индия на $10^8 - 10^9$ атомов германия уменьшает удельное электрическое сопротивление германия в миллионы раз.

Если в полупроводник одновременно вводятся и донорные, и акцепторные примеси, то характер проводимости полупроводника (*n* – или *p* – тип) определяется примесью с более высокой концентрацией носителей заряда.

Примеси оказывают сильное воздействие на электропроводимость полупроводников: так, например, тысячные доли процентов примесей могут в сотни тысяч раз уменьшить их сопротивление. Этот факт, с одной стороны, указывает на возможность изменения свойств полупроводников, с другой стороны, он свидетельствует о трудностях технологии при изготовлении полупроводниковых материалов с заданными характеристиками.

1.3. Зависимость сопротивления полупроводников от температуры

С повышением температуры возрастает число разрывов ковалентных связей и увеличивается количество свободных электронов и дырок в кристаллах чистых полупроводников, а, следовательно, возрастает удельная электропроводность и уменьшается удельное сопротивление чистых полупроводников. График зависимости удельного сопротивления чистого полупроводника от температуры приведен на рис. 8.

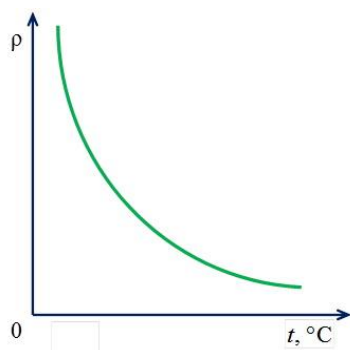


Рис. 8.

Кроме нагревания, разрыв ковалентных связей и, как следствие, возникновение собственной проводимости полупроводников и уменьшение удельного сопротивления могут быть вызваны освещением (фотопроводимость полупроводника), а также действием сильных электрических полей.

Зависимость электрического сопротивления полупроводниковых материалов от температуры используется в специальных полупроводниковых приборах – *терморезисторах*.

1.4. Основы зонной теории твёрдого тела

Зонная теория твёрдого тела – квантовомеханическая теория движения электронов в твёрдом теле.

В соответствии с квантовой механикой свободные электроны могут иметь любую энергию – их энергетический спектр непрерывен. Электроны, принадлежащие изолированным атомам, имеют определённые дискретные значения энергии. В твёрдом теле энергетический спектр электронов существенно иной, он состоит из отдельных разрешённых энергетических зон, разделённых зонами запрещённых энергий.

Образование энергетических зон в кристаллах

Согласно постулатам Бора, в изолированном атоме энергия электрона может принимать строго дискретные значения (также говорят, что электрон находится на одной из орбиталей).

В случае нескольких атомов, объединённых химической связью (например, в молекуле), электронные орбитали расщепляются в количестве, пропорциональном числу атомов, образуя так называемые молекулярные орбитали. При дальнейшем увеличении системы до макроскопического кристалла (число атомов более 10^{20}), количество орбиталей становится очень большим, а разница энергий электронов, находящихся на соседних орбиталях, соответственно очень маленькой, энергетические уровни расщепляются до практически непрерывных дискретных наборов – *энергетических зон*.

Энергетическая ширина расщепления атомного энергетического уровня растёт с уменьшением расстояния между соседними атомами d . Все подуровни одного атомного энергетического уровня образуют *разрешённую энергетическую зону*, где существуют стационарные состояния электрона. Соседние энергетические зоны отделены друг от друга *запрещёнными энергетическими зонами*⁵, где нет стационарных состояний электрона. Для кристалла с линейным размером ~ 1 см энергетическая ширина разрешённых и запрещённых зон ~ 10 эВ, расстояние между соседними подуровнями в разрешённой зоне $\sim 10^{-22}$ эВ. С увеличением энергии ширина зон обычно растёт.

Наивысшая из разрешённых энергетических зон в полупроводниках и диэлектриках, в которой при температуре 0 К все энергетические состояния заняты электронами, называется *валентной зоной*, следующая за ней – *зоной проводимости*. В металлах зоной проводимости называется наивысшая разрешённая зона, в которой находятся электроны при температуре 0 К.

Зонная структура полупроводников

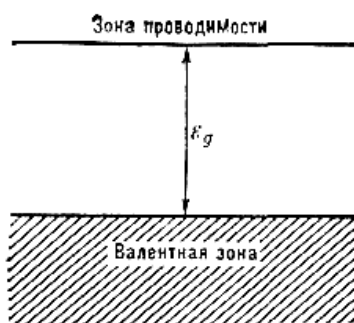


Рис. 9.

Полупроводниками являются вещества, ширина запрещённой зоны которых составляет порядка 3 – 4 электрон-вольт (эВ).

Электрические и оптические свойства полупроводников связаны с тем, что заполненные электронами состояния (уровни энергии) отделены от вакантных состояний запрещённой зоной, в которой электронные состояния отсутствуют (рис. 9). Примеси и дефекты структуры приводят к появлению состояний в запрещённой зоне, но этих состояний сравнительно мало, так что понятие запрещённой зоны сохраняет смысл. Высшая целиком заполненная зона наз. валентной, следующая разрешённая, но пустая зона – зоной проводимости.

⁵ *Запрещённая зона (энергетическая щель) – область значений энергий в энергетическом спектре кристалла, которыми не могут обладать электроны, фононы или др. квазичастицы. Запрещённая зона отделяет одну разрешённую зону от другой.*

2. Теория лабораторной работы

Количество носителей заряда в полупроводниках существенно зависит от вида полупроводника и его температуры. Зонные диаграммы полупроводников n - и p - типов приведены на рисунке 10, где E_F - уровень Ферми, а) собственный полупроводник (уровень Ферми посередине запрещённой зоны), б) примесный донорный полупроводник, в) примесный акцепторный полупроводник, $\Delta E_{\text{зап}}$ - ширина запрещённой энергетической зоны.

В собственных полупроводниках концентрация собственных носителей (электронов и дырок) увеличивается с температурой экспоненциально:

$$n_T = n_0 e^{-\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT}},$$

где n_0 - постоянная величина, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура.

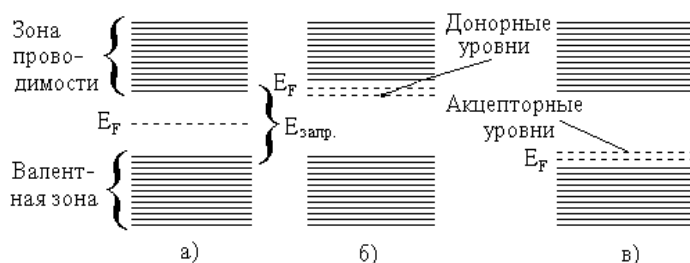


Рис. 10.

Прологарифмировав это выражение, получим:

$$\ln n_T = \ln n_0 \left(-\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT} \right) = C \cdot \left(-\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT} \right).$$

Отсюда видно, что зависимость концентрации носителей n_T от температуры описывается прямой в координатах $\ln n_T = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

В примесных полупроводниках образование носителей происходит генерацией их как собственно атомами, так и с примесных центров, и поэтому зависимость от температуры носит сложный характер. В общем случае зависимость проводимости от температуры определяется концентрацией и типом примесных центров (акцепторов и доноров), а также типом полупроводника, т.е. шириной запрещённой зоны.

Промышленное использование некоторых типов полупроводниковых приборов основано на зависимости их проводимости от температуры (термисторы).

В качестве рабочего элемента выбираются полупроводники на основе специальных окислов. Вследствие этого температурная зависимость проводимости $\gamma(T)$ подобных полупроводников аналогична зависимости $\gamma(T)$ для собственных полупроводников и имеет вид:

$$\gamma(T) = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT}}. \quad (1)$$

Определяя экспериментально зависимость γ от T можно определить ширину запрещённой зоны $\Delta E_{\text{зап}}$ и температурный коэффициент сопротивления термистора.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Схема измерительной установки приведена на рисунке 11.

С помощью обогревателя 1 повышается температура полупроводника 2, контроль температуры осуществляется термопарой 3.

А. Статическая вольт-амперная характеристика снимается путём измерения зависимости тока от напряжения $I = f(U_n)$ при постоянной температуре. Данные заносятся в таблицу 1.

Сопротивление полупроводника определяется по графику $I = f(U_n)$, построенному по данным таблицы 1.

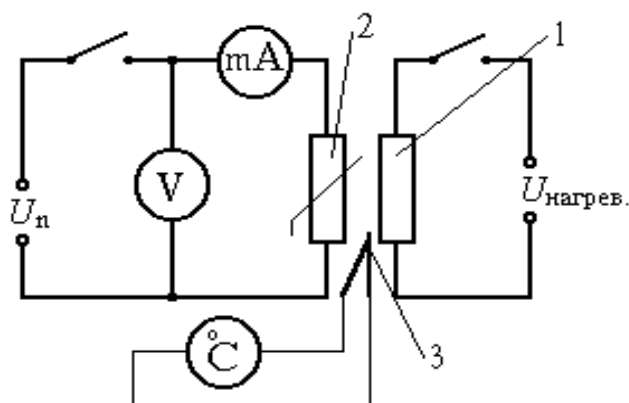


Рис. 11.

Удельное сопротивление и электропроводность определяются с учётом параметров полупроводника (приводятся на стенде).

Таблица 1

№ измерения	U_n, B	I, mA	$R, Ом$	$\rho = \frac{R \cdot S}{l}$	$\gamma = \frac{1}{\rho}$
1					
2					
3					

4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

В. Зависимость силы тока от температуры снимается в процессе медленного нагревания полупроводника. Данные заносятся в таблицу 2. Прологарифмировав выражение (1) получим:

$$\ln \gamma(T) = \ln \gamma_0 \left(-\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT} \right). \quad (2)$$

$$U = 10 \text{ В}$$

Таблица 2.

№ измерения	$t, ^\circ \text{C}$	T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	I, mA	$R, \text{Ом}$	$\gamma, \text{См}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	$\ln \gamma$
1	30						
2	40						
3	50						
4	60						
5	70						
6	80						
7	90						

Из (2) следует, что зависимость $\ln \gamma = f(1/T)$ представляет собой прямую с наклоном равным $\text{tg} \alpha = -\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT}$, где $\Delta E_{\text{зап}}$ – ширина запрещённой зоны в эВ, k – постоянная Больцмана $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

По данным таблицы 2 построить график зависимости $\ln \gamma$ от обратной температуры $1/T$.

С. По результатам измерений и графику рассчитать ширину запрещённой зоны $\Delta E_{\text{зап}}$, коэффициент температурочувствительности: $B = -\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2k}$, температурный коэффициент сопротивления (ТКР) равный:

$$\frac{TKR}{T} = \frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT^2} = -\frac{B}{T^2} \quad (3)$$

Так как TKR зависит от температуры, то необходимо указать температуру, при которой коэффициент определён. Сравнить результат, полученный из (3) с вычислением по формуле:

$$\frac{TKR}{T} = -\frac{\Delta R}{RT\Delta T}. \quad (4)$$

Результаты записать в таблицу 3.

Таблица 3

$\Delta E_{\text{зап}}, \text{эВ}$	В, К	$\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT^2}$	$-\frac{B}{T^2}$

Проанализировать результаты, сделать вывод.

Параметры терморезистора: $l = 10\text{м}; \quad d = 1\text{мм}.$

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм проводимости в полупроводниках.
2. Как объясняется электрическое сопротивление полупроводников?
3. Как изменяется (увеличивается или уменьшается) с ростом температуры электрическое сопротивление:
 - металлов,
 - полупроводников,
 - электролитов.
4. Что называется температурным коэффициентом сопротивления? От чего он зависит? Единица измерения?
5. Объясните, как определяются в работе значения сопротивлений при $t=0^\circ\text{C}$.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
3. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

Часть 2. «Электромагнетизм»**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7****ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ИНДУКТИВНОСТИ**

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: изучить распределение магнитного поля соленоида и определить его индуктивность; сравнить результаты измерений с теоретическими расчетами.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Соленоид с линейкой	–			
2	Катушка	–	–	–	–
3	Баллистический гальванометр	-	-	-	-
4	Амперметр				

1. Теоретические сведения**Основные понятия и законы****1.1. Магнитное поле и его характеристики**

Магнитное поле – одна из форм электромагнитного поля, релятивистский эффект электрического поля.

Магнитное поле создаётся (порождается) током заряженных частиц, или изменяющимся во времени электрическим полем (током смещения), или собственными магнитными моментами частиц.

С точки зрения квантовой теории поля магнитное взаимодействие – частный случай электромагнитного взаимодействия, переносится фундаментальным безмассовым бозоном – *фотонам* (частицей, которую можно представить как квантовое возбуждение электромагнитного поля).

Магнитное поле действует только на движущиеся заряды. Оно обладает энергией, которая проявляет себя в виде электромагнитных сил, действующих на

отдельные движущиеся электрические заряды (электроны и ионы) и на их потоки, т. е. электрический ток. Под влиянием электромагнитных сил движущиеся заряженные частицы отклоняются от своего первоначального пути.

Основными характеристиками магнитного поля являются *магнитная индукция* и *напряженность*, *магнитный момент* *магнитный поток*, *магнитная проницаемость*.

Вектор индукции магнитного поля

Магнитное поле может оказывать разнообразные воздействия на другие физические объекты, оказавшиеся в этом поле. Механическое действие, которое магнитное поле оказывает на другие тела, можно характеризовать вектором силы, а само поле – векторной физической величиной, называемой *магнитной индукцией*, которая позволяет определить эту силу. Магнитная индукция обозначается буквой \vec{B} , измеряется в теслах (Тл).

Индукция магнитного поля – векторная физическая величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям.

1Тл – *индукция однородного магнитного поля, в котором на проводник длиной 1м с током в 1А, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям, действует сила 1Н.*

Магнитная индукция \vec{B} является основной силовой характеристикой магнитного поля. Индукция магнитного поля может быть определена в любой точке пространства и в любой момент времени:

$$\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t).$$



Рис. 1.

Направление вектора магнитной индукции задается направлением магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Оно совпадает с направлением, которое указывает северный полюс стрелки (рис. 1).

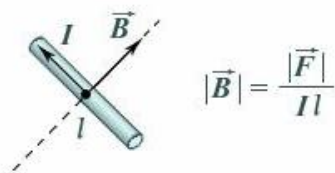


Рис. 2.

Модуль вектора $|\vec{B}|$ можно определить с помощью силы, действующей на движущийся свободный заряд или проводник с током, где заряды перемещаются вдоль проводника, а также с помощью момента сил, действующих на рамку, по которой течет ток (рис. 2).

Магнитную индукцию \vec{B} можно характеризовать плотностью силовых магнитных линий, т. е. числом силовых линий, проходящих через площадь 1 м^2 или 1 см^2 , расположенную перпендикулярно магнитному

полю.

Различают *однородные* и *неоднородные* магнитные поля.

Поле, в каждой точке которого вектор магнитной индукции \vec{B} постоянен по величине и направлению, называют *однородным*. В противном случае – поле неоднородное.

На рисунке 3 приведены способы изображения силовых линий однородного магнитного поля, направленного вправо (а), влево (б), в плоскость листа от нас (в) и из него к нам (г).



Рис. 3.

Опыт показывает, что для магнитного поля, как и для электрического, справедлив **принцип суперпозиции**: *индукция магнитного поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна векторной сумме индукций магнитных полей, создаваемых каждым током или зарядом:*

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i$$

Графическое изображение магнитного поля

Магнитное поле изображается графически с помощью *магнитных силовых линий* или *линий магнитной индукции*.

Непрерывная линия, касательная к которой в любой ее точке задает направление вектора магнитной индукции \vec{B} , называется силовой линией магнитного поля.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты, что говорит об отсутствии в природе магнитных зарядов и вихревом характере магнитного поля. Условно они выходят из северного полюса магнита и входят в южный. Густота линий выбирается так, чтобы число линий через единицу площади, перпендикулярную магнитному полю, было пропорционально величине магнитной индукции.

Направление магнитного поля в каждой точке может быть определено при помощи магнитной стрелки. Северный полюс стрелки всегда устанавливается в направлении действия сил поля. Конец постоянного магнита, из которого выходят силовые линии, принято считать северным полюсом, а противоположный конец, в который входят силовые линии, – южным полюсом.

На рисунке 4 показаны исследования магнитного поля вокруг полосового магнита с помощью магнитных стрелок и картина силовых линий магнитного поля вокруг такого магнита.

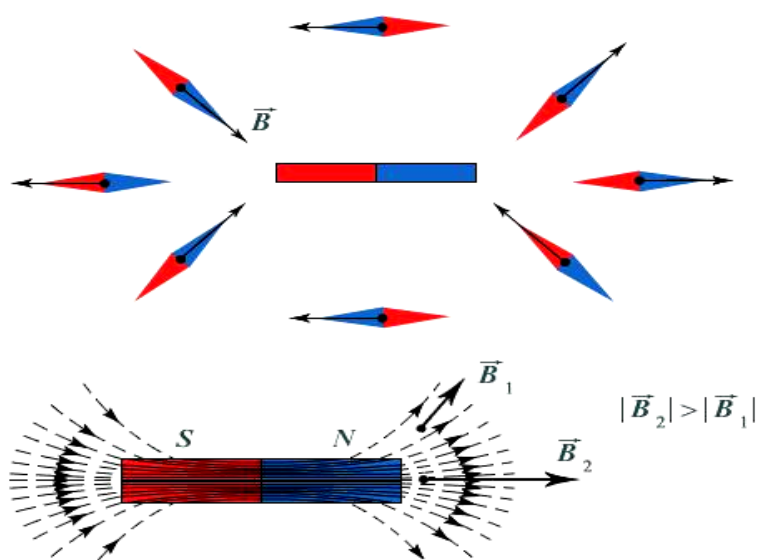


Рис.4.

Картина силовых линий магнитного поля, созданного постоянным подковообразным магнитом (а), прямым проводом с током (б) и проволочным кольцом (в), по которому течет ток, показана на рисунке 5.

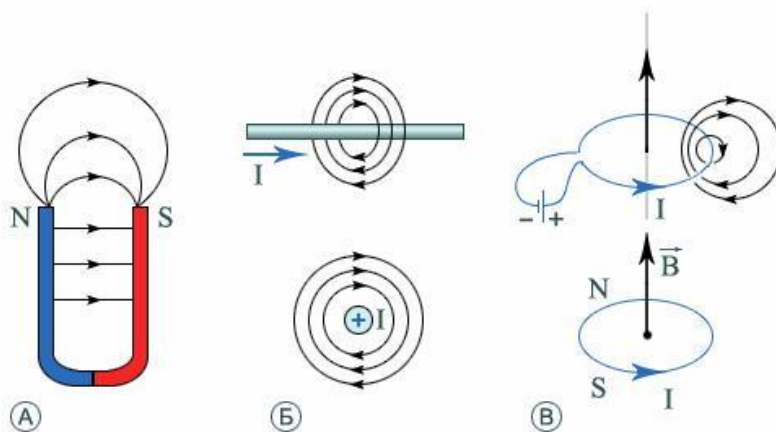


Рис.5.

Силовые линии магнитного поля – замкнутые линии. Во внешнем пространстве постоянных магнитов они идут от северного полюса к южному.

Направление силовых линий вокруг прямолинейного провода с током определяется по правилу буравчика (правовращающий винт, штопор): если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Вектор напряжённости магнитного поля

Магнитное поле в макроскопическом описании представлено двумя различными векторными полями, обозначаемыми, как \vec{H} и \vec{B} , где \vec{H} – напряженность, \vec{B} – индукция магнитного поля.

Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности следующим выражением:

$$\vec{H} = \vec{B} / (\mu_0 \cdot \mu), \text{ А/м,}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, μ – безразмерная величина – магнитная проницаемость среды, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в среде \vec{B} больше индукции \vec{B}_0 в вакууме (в вакууме $\mu = 1$):

$$\mu = \vec{B} / \vec{B}_0$$

Магнитная проницаемость зависит только от свойств среды, в которой создаётся магнитное поле.

Напряженность \vec{H} не зависит от магнитных свойств среды, но учитывает влияние силы тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля в данной точке пространства. Однако, вектор \vec{H} является важной, но вспомогательной характеристикой магнитного поля. Основной характеристикой магнитного поля всё же является вектор \vec{B} .

Магнитный момент контура с током

Подобно тому, как для исследования электрического поля мы использовали пробный заряд, применим для исследования магнитного поля пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре очень малых размеров. Будем называть такой контур пробным контуром (рис. 6).

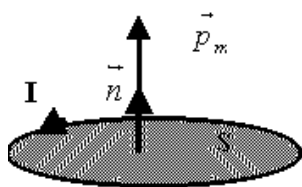


Рис. 6.

Ориентацию его в пространстве характеризует направление нормали \vec{n} к контуру, восстанавливаемой по правилу правого буравчика: вращаем рукоятку правого буравчика по направлению тока в контуре, тогда направление его поступательного движения даст направление нормали \vec{n} (рис. 6). Помещая пробный контур в магнитное поле, обнаружим, что поле стремится повернуть контур (нормаль) в определенном направлении.

Вращающий момент, действующий на контур, зависит как от свойств магнитного поля в данной точке, так и от свойств контура. Оказывается, что максимальная величина вращающего момента пропорциональна IS , т.е. $M_{max} \sim IS$, где I – ток контуре, S – площадь контура с током.

Векторную величину $\vec{p}_m = IS\vec{n}$ называют магнитным моментом контура, который в СИ измеряется в $A \cdot m^2$.

На пробные контуры с разными \vec{p}_m , помещаемыми в данную точку магнитного поля, будут действовать разные по величине максимальные вращающие моменты M_{max} , но отношение M_{max}/p_m будет для всех контуров одинаково, оно будет являться силовой характеристикой магнитного поля, которая называется магнитной индукцией:

$$\vec{B} = \vec{M}_{max}/\vec{p}_m.$$

Магнитная индукция есть вектор, направление которого совпадает с направлением нормали контура с током, свободно установившегося во внешнем магнитном поле.

Для произвольного замкнутого контура магнитный момент находится из:

$$\vec{p}_m = \frac{1}{2} \oint [\vec{r}, d\vec{l}],$$

где \vec{r} – радиуса – вектор, проведенный из начала координат до элемента длины контура $d\vec{l}$.

В общем случае произвольного распределения токов в среде:

$$\vec{p}_m = \frac{1}{2} \int_V [\vec{r}, \vec{j}] dV,$$

где \vec{j} – плотность тока в элементе объема dV .

Гипотеза Ампера

Согласно предположению французского физика А.Ампера, постоянные магниты (например, намагниченное железо, стрелки компаса) содержит непрерывно движущиеся заряды, т.е. электрические токи в атомном масштабе. Такие микроскопические токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах, существуют в любом теле. Эти микротоки создают свое магнитное поле и могут сами поворачиваться во внешних полях, создаваемых проводниками с током. Например, если вблизи какого-либо тела поместить проводник с током, то под действием его магнитного поля микротоки во всех атомах определенным образом ориентируются, создавая в теле дополнительное магнитное поле. О природе и характере этих микротоков Ампер в то время ничего не мог сказать, так как учение о строении вещества находилось еще в самой начальной стадии. Гипотеза Ампера была блестяще подтверждена лишь спустя 100 лет, после открытия электрона и выяснения строения атомов и молекул.

Магнитный момент – основная величина, характеризующая магнитные свойства вещества. Источником магнетизма, согласно классической теории электромагнитных явлений, являются электрические макро– и микротоки. Элементарным источником магнетизма считают замкнутый ток.

Магнитным моментом обладают элементарные частицы, атомные ядра, электронные оболочки атомов и молекул. Магнитные моменты элементарных частиц (электронов, протонов, нейтронов и других), как показала квантовая механика, обусловлен существованием у них собственного механического момента – *спина*.

Поток вектора магнитной индукции

Потоком вектора магнитной индукции через элементарную площадку dS называется физическая величина $d\Phi_m$, равная произведению величины этой площадки и проекции вектора \vec{B} на направление нормали к площадке dS (рис. 7):

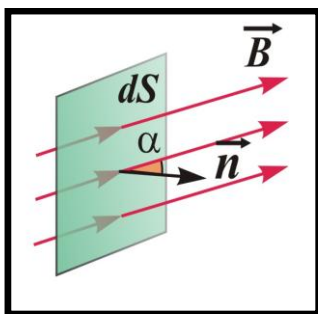


Рис.7.

Нормаль \vec{n} к плоскости контура составляет угол α с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} (см. рис. 8).

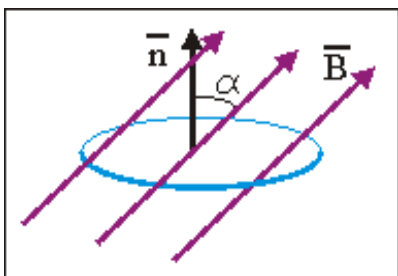


Рис. 8.

$$d\Phi_m = B_n dS = B dS \cos(\vec{B}, \vec{n})$$

Интегрируя это выражение по S , получим магнитный поток Φ_m сквозь произвольную замкнутую поверхность S :

$$\Phi_m = \int_S B_n dS$$

В однородном магнитном поле, модуль вектора индукции которого равен B , помещен плоский замкнутый контур площадью S .

Магнитным потоком через поверхность называется величина Φ , определяемая соотношением:

$$\Phi_m = B \cdot S \cdot \cos\alpha.$$

Магнитный поток – величина алгебраическая: $\Phi_m > 0$ при $\alpha < \frac{\pi}{2}$ и $\Phi_m < 0$ при $\alpha > \frac{\pi}{2}$.

Единица измерения магнитного потока в систем СИ – 1 Вебер (1 Вб).

1 Вб – магнитный поток, проходящий через плоскую поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 1 Тл.

Магнитный поток через поверхность S численно равен количеству магнитных силовых линий, пересекающих данную поверхность.

Поскольку линии магнитной индукции всегда замкнуты, для замкнутой поверхности число линий, входящих в поверхность ($\Phi < 0$) равно числу линий, выходящих из нее ($\Phi > 0$), следовательно, полный поток магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю.

– **теорема Остроградского – Гаусса:** *поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю:*

$$\oint \vec{B} d\vec{S} = \oint B_n dS = 0.$$

Эта теорема является математическим выражением того, что в природе отсутствуют магнитные заряды, на которых начинались бы или заканчивались линии магнитной индукции, т.е. чего *линии магнитной индукции* не имеют ни начала, ни конца и являются *замкнутыми*.

1.2. Явление электромагнитной индукции

Электромагнитная индукция – явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него.

Если поток вектора магнитной индукции через замкнутый контур меняется во времени, в этом контуре возникает ЭДС электромагнитной индукции, порождаемая (в случае неподвижного контура) вихревым электрическим полем, возникающим вследствие изменения магнитного поля со временем (в случае неизменного со временем магнитного поля и изменения потока из-за движения контура – проводника такая ЭДС возникает посредством действия силы Лоренца).

Явление электромагнитной индукции было открыто Майклом Фарадеем в 1831 года. Он обнаружил, что электродвижущая сила, возникающая в замкнутом проводящем контуре, пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Величина электродвижущей силы (ЭДС) не зависит от того, что является причиной изменения потока – изменение самого магнитного поля или движение контура (или его части) в магнитном поле. Электрический ток, вызванный этой ЭДС, называется *индукционным током*.

Закон Фарадея

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея (в СИ):

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt},$$

где ε – электродвижущая сила, действующая вдоль произвольно выбранного контура, а магнитный поток через поверхность, натянутую на этот контур:

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}.$$

Знак «минус» в формуле отражает **правило Ленца**, названное так по имени русского физика Э.Х. Ленца:

Индукционный ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре, имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует тому изменению магнитного потока, которым был вызван данный ток.

Для катушки, находящейся в переменном магнитном поле, закон Фарадея можно записать следующим образом:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d\Psi}{dt},$$

где ε – электродвижущая сила, N – число витков, Φ_B – магнитный поток через один виток, Ψ – потокосцепление катушки.

Векторная форма закона Фарадея

В дифференциальной форме закон Фарадея можно записать в следующем виде:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

В интегральной форме (эквивалентной):

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}.$$

Здесь \vec{E} – напряжённость электрического поля, \vec{B} – магнитная индукция, S – произвольная поверхность, ∂S – её граница. Контур интегрирования ∂S подразумевается фиксированным (неподвижным).

Следует отметить, что закон Фарадея в такой форме, очевидно, описывает лишь ту часть ЭДС, что возникает при изменении магнитного потока через контур за счёт изменения со временем самого поля без изменения (движения) границ контура (об учёте последнего см. ниже).

В этом виде закон Фарадея входит в систему уравнений Максвелла для электромагнитного поля (в дифференциальной или интегральной форме соответственно).

1.3. Явление самоиндукции

Самоиндукция – возникновение ЭДС индукции ε_c в проводящем контуре при изменении в нём силы тока; частный случай индукции электромагнитной.

При изменении тока в контуре меняется поток магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, в результате чего в нём возбуждается ЭДС – ЭДС самоиндукции. Направление ЭДС самоиндукции определяется правилом Ленца, т. е. при увеличении тока в цепи ЭДС самоиндукции препятствует возрастанию тока, а при уменьшении тока – его убыванию. Таким образом, самоиндукция подобна явлению инерции в механике.

ЭДС самоиндукции ε_c пропорциональна скорости изменения силы тока I и индуктивности L контура:

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}$$

Коэффициент пропорциональности L называется *коэффициентом самоиндукции* или *индуктивностью* контура (катушки).

В электрической цепи, содержащей постоянную ЭДС, при замыкании цепи сила тока за счёт ЭДС самоиндукции устанавливается не мгновенно, а через некоторый промежуток времени, а при размыкании цепи ток не прекращается мгновенно; возникающая при размыкании цепи ЭДС самоиндукции может во много раз превысить ЭДС источника. В цепи переменного тока вследствие самоиндукции сила тока в катушке, обладающей индуктивностью, отстаёт по фазе от напряжения на концах катушки на $\pi/2$.

Явление самоиндукции играет важную роль в электротехнике и радиотехнике. Благодаря самоиндукции происходит перезарядка конденсатора, соединённого последовательно с катушкой индуктивности, в результате в контуре возникают свободные электромагнитные колебания.

1.4. Индуктивность

Величина магнитной индукции B , создаваемой током в любом замкнутом контуре, пропорциональна силе тока I . Так как магнитный поток Φ пропорционален B , то можно утверждать, что:

$$\Phi = L \cdot I,$$

где L – коэффициент пропорциональности между током в проводящем контуре и созданным им магнитным потоком, пронизывающим этот контур. Величину L называют *индуктивностью контура* или его *коэффициентом самоиндукции*.

Индуктивность (или **коэффициент самоиндукции**) (от лат. *inductio* – наведение, побуждение) – коэффициент пропорциональности между электрическим током, текущим в каком-либо замкнутом контуре, и магнитным потоком, создаваемым этим током через поверхность, краем которой является этот контур.

Индуктивность подобно емкости, зависит от геометрических факторов: размеров проводника и его формы, но не зависит непосредственно от силы тока в проводнике. Кроме геометрии проводника, индуктивность зависит от магнитных свойств среды, в которой находится проводник.

Через индуктивность выражается ЭДС самоиндукции в контуре, возникающая при изменении в нём силы тока:

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}.$$

Из этой формулы следует, что *индуктивность численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с.*

Нередко говорят об индуктивности прямого длинного провода. В этом случае и других полезным для этого оказывается подход (упоминаемый ниже), связывающий индуктивность с энергией магнитного поля.

Единицу индуктивности в СИ называют генри (Гн).

Индуктивность проводника равна 1 Гн, если в нем при изменении силы тока на 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции 1 В:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} / (1 \text{ А/с}) = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с}.$$

1.5. Соленоид

Соленоид (от греч. *solen* – трубка и *eidos* – вид) – это однослойная катушка цилиндрической формы, витки которой намотаны вплотную, а длина значительно больше диаметра; система круговых токов, центры которых лежат на одной прямой (рис. 9).

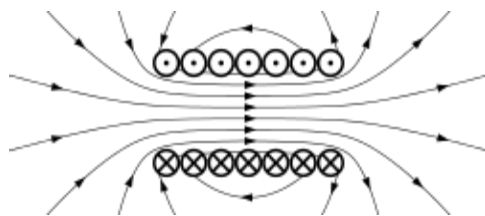


Рис. 9. Образование магнитного потока в соленоиде

Магнитное поле соленоида аналогично магнитному полю полосового магнита. Соленоид с током представляет собой электромагнит. Соленоид

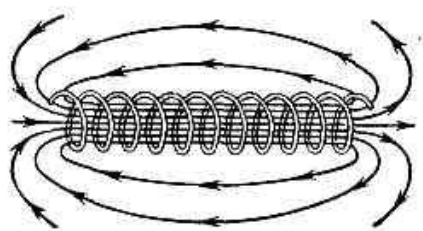


Рис.10.

обладает значительной индуктивностью и малым активным сопротивлением и ёмкостью. В средней части внутренней полости соленоида, длина которого значительно больше диаметра, магнитное поле соленоида направлено параллельно его оси и *однородно* (рис. 10), причём его напряжённость пропорциональна силе тока и (приблизённо) числу витков.

Соленоид на постоянном токе

Если длина соленоида намного больше его диаметра и не используется магнитный материал, то при протекании тока по обмотке внутри катушки создаётся магнитное поле, направленное вдоль оси, которое однородно и для постоянного тока по величине равно: $B = \mu_0 n I$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $n = N/l$ – число витков N на единицу длины l (линейная плотность витков), I – ток в обмотке.

При протекании тока соленоид запасает энергию, равную работе, которую необходимо совершить для установления текущего тока I . Величина этой энергии равна:

$$E_{\text{сохр}} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{L I^2}{2}.$$

При изменении тока в соленоиде возникает ЭДС самоиндукции.

Индуктивность соленоида

Индуктивность соленоида выражается следующим образом:

$$L = \mu_0 n^2 V = \frac{\mu_0 z^2}{4\pi l},$$

где V – объём соленоида, $z = \pi d N$ – длина проводника, намотанного на соленоид, l – длина соленоида, d – диаметр витка.

Без использования магнитного материала плотность магнитного потока B в пределах катушки является фактически постоянной и равна:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I,$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, N – число витков, I – сила тока и l – длина катушки. Пренебрегая краевыми эффектами на концах соленоида, получим, что потокосцепление через катушку равно плотности потока B , умноженному на площадь поперечного сечения и число витков N :

$$\Psi = \frac{\mu_0 N^2 I S}{l},$$

Отсюда следует формула для индуктивности соленоида:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l},$$

эквивалентная предыдущим двум формулам.

2. Теория лабораторной работы

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Соленоид характеризуется числом витков N , длиной l или числом витков на единицу длины $n = N/l$. Соленоид можно считать бесконечным, если его длина l много больше его диаметра. В этом случае магнитное поле практически все находится внутри соленоида и направлено вдоль его оси. Найдём выражение для индукции магнитного поля соленоида, используя выражение для циркуляции вектора \vec{B} (рис.11):

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \oint_L B_l dl = \mu_0 NI = \mu_0 n l I.$$

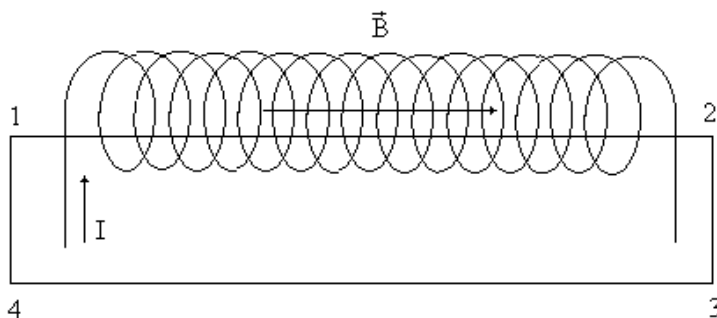


Рис. 11.

Интеграл по замкнутому контуру можно разбить на четыре интеграла по отдельным частям:

$$\oint_L B_l dl = \int_1^2 B_l dl + \int_2^3 B_l dl + \int_3^4 B_l dl + \int_4^1 B_l dl .$$

Так как, интегралы 2,3 и 4 равны нулю, то

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \oint_L B_l dl = B l = \mu_0 n l I.$$

Отсюда магнитная индукция внутри бесконечно длинного соленоида:

$$B = \mu_0 n I,$$

где nI – ампер – витки на единицу длины соленоида, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

При наличии магнитного сердечника:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I,$$

где μ – магнитная проницаемость магнетика.

На практике используются соленоиды конечной длины, для которых условие $l \gg 2R$ не выполняется. Расчеты показывают, что в этом случае индукция магнитного поля в соленоиде: $B = \frac{1}{2} n \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot I (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$, где α_1 и α_2 – углы, под которыми из точки наблюдения видны радиусы ближнего и дальнего концов соленоида (рис.12) и:

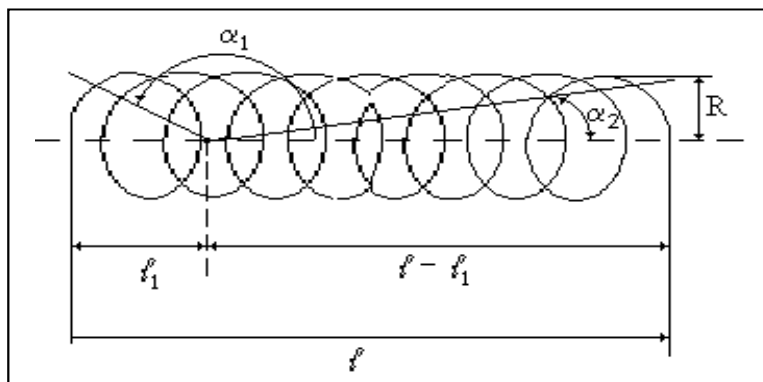


Рис.12.

$$\cos \alpha_1 = \frac{l_1}{\sqrt{R^2 + l_1^2}},$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{l - l_1}{\sqrt{R^2 + (l - l_1)^2}}.$$

Максимальное значение индукции наблюдается при $l_1 = \frac{l}{2}$;

$$B_{max} = \frac{\mu \mu_0 n I l}{\sqrt{4 R^2 + l^2}},$$

Из приведенных уравнений следует, что B монотонно убывает от центра соленоида к краям. Поток вектора \vec{B} через сечение соленоида равен:

$$\Phi_e = B \cdot N \cdot S = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2}{l} S \cdot I = L \cdot I$$

Коэффициент $L = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2 \cdot S}{l}$ называется индуктивностью бесконечного соленоида и измеряется в генри (Гн). Индуктивность соленоида конечной длины и радиуса R определяются с учетом коэффициентов размагничивания k .

$$L = k \cdot \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2 \cdot S}{l} \quad (1)$$

$\lambda = \frac{l}{2R}$	0,1	0,5	1	5	10
k	0,2	0,5	0,6	0,9	1

Соленоиды с железным сердечником имеют большую индуктивность и находят применение в цепях переменного тока.

Распределение магнитного поля в данной работе исследуется с помощью подвижной измерительной катушки, связанной с баллистическим гальванометром (рис. 13)

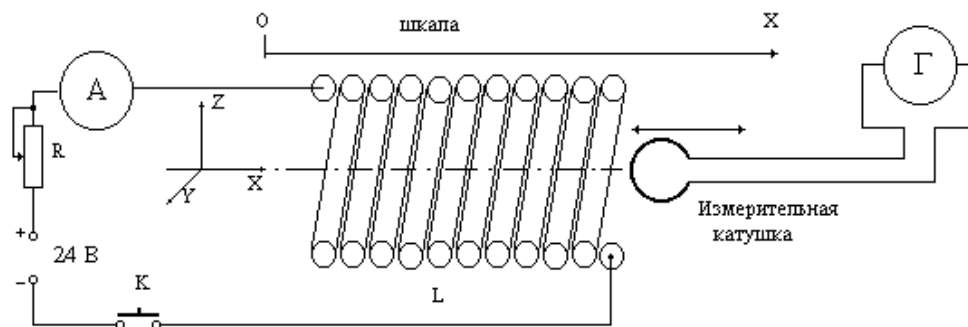


Рис. 13.

При замыкании кнопки K магнитный поток нарастает от 0 до Φ_B^{max} . Согласно закону электромагнитной индукции в цепи измерительной катушки возникает электродвижущая сила $\varepsilon(t)$ и обусловленный ею индукционный ток:

$$I(t) = \frac{\varepsilon(t)}{R} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

где R – суммарное сопротивление измерительной цепи.

За время нарастания магнитного потока от 0 до Φ_B^{max} по цепи измерительной катушки пройдет заряд:

$$Q = \int_0^t I(t) dt = -\frac{1}{R} \int_0^{\Phi_B^{max}} d\Phi_B = -\frac{\Phi_B^{max}}{R} = -\frac{BSN}{R},$$

где BS – магнитный поток через один виток, N – число витков в измерительной катушке.

Отсюда искомая величина магнитной индукции: $B = \frac{Q \cdot R}{S \cdot N}$.

Знак « \leftarrow », в данном случае, означает, что «зайчик» гальванометра отклонится в сторону, противоположную, принятой за положительное отклонение.

Можно считать: $Q = C_G \cdot \alpha_1$, где C_G – емкость баллистического гальванометра и

$$B = \frac{C_G \cdot \alpha_1 \cdot R}{S \cdot N} = C_\Gamma \cdot \alpha_1, \text{ где обозначим: } C_\Gamma = \frac{C_G \cdot R}{S \cdot N} \quad (2)$$

Размыкание ключа K приводит к изменению магнитного потока до нуля.

В этом случае гальванометр дает отброс по величине близкой к α , но противоположного знака. Таким образом, определяя значения отклонений даваемых баллистическим гальванометром при замыкании и размыкании цепи соленоида, можно определить значение магнитной индукции на оси соленоида.

6						4											
7																	
8						5											
9																	
10						6											
11																	
12						7											
13																	
14						8											
15																	
16						9											
17																	
18						10											
19																	
20																	

12. Проанализировать результаты, сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Согласно обозначениям на шкалах электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, указать назначение прибора, тип тока, безопасность, класс точности, систему измерительного механизма, рабочее положение при эксплуатации.
- По классу точности электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, вычислить их абсолютную (инструментальную) погрешность и указать к какой группе приборов (прецизионным, техническим или внеклассовым) они относятся.
- Что называется соленоидом? Чем он характеризуется?
- Какой соленоид можно считать бесконечным?
- Физический смысл вектора индукции магнитного поля (магнитной индукции) \vec{B} ? Единица измерения \vec{B} ?
- Какое магнитное поле называется однородным?
- Чему равна индукция \vec{B} магнитного поля бесконечного соленоида?
- Сформулируйте теорему о циркуляции вектора \vec{B} (закон полного тока).
- Потенциальным или вихревым является магнитное поле? Чем отличаются силовые линии индукции магнитного поля от силовых линий напряжённости электростатического поля?
- Нарисуйте ход силовых линий индукции \vec{B} магнитного поля в соленоиде.
- Что называется индуктивностью контура? От чего она зависит? Единица измерения индуктивности?
- Индуктивность бесконечного соленоида?

13. Что называется явлением электромагнитной индукции? Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
14. В каких частях длинного соленоида магнитное поле можно считать однородным? В каких частях соленоида оно будет неоднородным?

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: определить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Источник постоянного тока	–	–	–	–
2	Реостат	–	–	–	–
3	Тангенс-буссоль	–			
4	Миллиамперметр				

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. Магнитное поле и его характеристики

Магнитное поле – одна из форм электромагнитного поля, релятивистский эффект электрического поля.

Магнитное поле создаётся (порождается) током заряженных частиц, или изменяющимся во времени электрическим полем (током смещения), или собственными магнитными моментами частиц.

Магнитное поле действует только на движущиеся заряды. Оно обладает энергией, которая проявляется в виде электромагнитных сил, действующих на отдельные движущиеся электрические заряды (электроны и ионы) и на их потоки, т. е. электрический ток. Под влиянием электромагнитных сил движущиеся заряженные частицы отклоняются от своего первоначального пути.

Основными характеристиками магнитного поля являются *магнитная индукция* и *напряженность*.

Механическое действие, которое магнитное поле оказывает на другие тела, можно характеризовать вектором силы, а само поле – векторной физической

величиной, называемой *магнитной индукцией*, которая позволяет определить эту силу. Магнитная индукция обозначается буквой \vec{B} , измеряется в теслах (Тл).

Индукция магнитного поля – векторная физическая величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям.

1Тл – индукция однородного магнитного поля, в котором на проводник длиной 1м с током в 1А, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям, действует сила 1Н.

Магнитная индукция \vec{B} является основной силовой характеристикой магнитного поля. Индукция магнитного поля может быть определена в любой точке пространства и в любой момент времени:

$$\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t).$$

Направление вектора магнитной индукции задается направлением магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Оно совпадает с направлением, которое указывает северный полюс стрелки (рис. 1).



Рис. 1.

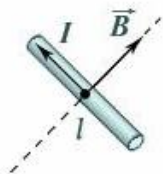


Рис. 2.

Модуль вектора $|\vec{B}|$ можно определить с помощью силы, действующей на движущийся свободный заряд или проводник с током, где заряды перемещаются вдоль проводника, а также с помощью момента сил, действующих на рамку, по которой течет ток (рис. 2).

Магнитное поле в макроскопическом описании представлено двумя различными векторными полями, обозначаемыми, как \vec{H} и \vec{B} , где \vec{H} – напряженность, \vec{B} – индукция магнитного поля.

Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности следующим

выражением:

$$\vec{H} = \vec{B} / (\mu_0 \cdot \mu), \text{ А/м},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, μ – безразмерная величина – *магнитная проницаемость среды*, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в среде \vec{B} больше индукции \vec{B}_0 в вакууме (в вакууме $\mu = 1$):

$$\mu = \vec{B} / \vec{B}_0.$$

Магнитная проницаемость зависит только от свойств среды, в которой создаётся магнитное поле.

Напряженность \vec{H} не зависит от магнитных свойств среды, но учитывает влияние силы тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля в данной точке пространства. Однако, вектор \vec{H} является важной, но вспомогательной характеристикой магнитного поля. Основной характеристикой магнитного поля всё же является вектор \vec{B} .

1.2. Магнитное поле Земли

Магнитное поле Земли (геомагнитное поле или магнитосфера) – магнитное поле, генерируемое внутриземными источниками; предмет изучения геомагнетизма.

Магнитное поле Земли, образующее земную магнитосферу, простирается на расстоянии 70 – 80 тысяч км в направлении к Солнцу и на многие миллионы километров в обратном направлении (рис. 3).

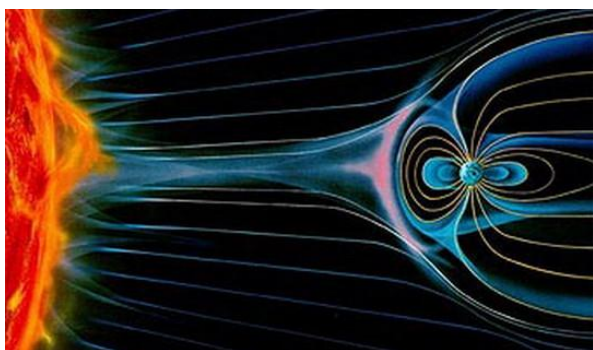


Рис. 3.

Землю можно рассматривать как магнитный диполь. Его южный полюс находится на географическом Северном полюсе, а северный, соответственно, на Южном. На самом деле, географический и магнитный полюса Земли не совпадают не только по "направлению".

Ось магнитного поля наклонена по отношению к оси вращения Земли на 11,6 градуса. Из-за того что разница не очень существенная, мы можем пользоваться компасом. Его стрелка точно указывает на южный магнитный полюс Земли и

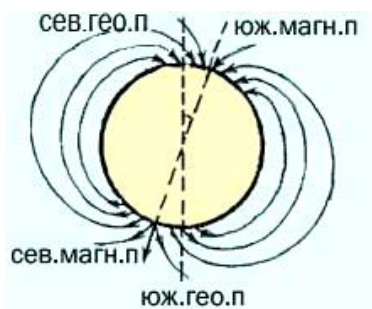


Рис. 4.

почти точно на Северный географический. Графически магнитное поле Земли похоже на магнитное поле постоянного магнита (рис. 4).

Магнитное поле защищает жителей Земли и искусственные спутники от губительного воздействия космических частиц. К таким частицам относятся, например, ионизированные (заряженные) частицы солнечного ветра. Магнитное поле изменяет траекторию их движения (сила Лоренца), направляя частицы вдоль линий

поля. Необходимость наличия магнитного поля для существования жизни сужает круг потенциально обитаемых планет.

Гипотеза о природе магнитного поля Земли

Вопрос о происхождении магнитного поля до сих пор окончательно не решен. В последнее время получила развитие гипотеза, связывающая возникновение магнитного поля Земли с протеканием токов в жидком металлическом ядре: земное ядро состоит из твердой внутренней и жидкой наружной частей; вращение Земли создает в жидком ядре постоянные течения.

Одна из самых распространенных теорий, объясняющих природу поля, – теория динамо-эффекта – предполагает, что конвективные или турбулентные движения проводящей жидкости в ядре способствуют самовозбуждению и поддержанию поля в стационарном состоянии. Подсчитано, что зона, в которой действует механизм «магнитное динамо», находится на расстоянии 0,25 – 0,3 радиуса Земли.

Строение магнитного поля Земли

На небольшом удалении от поверхности Земли, порядка трёх её радиусов, магнитные силовые линии имеют *диполеподобное* расположение. Эта область называется *плазмосферой* Земли.

По мере удаления от поверхности Земли усиливается воздействие солнечного ветра: со стороны Солнца геомагнитное поле сжимается, а с противоположной, ночной стороны, оно вытягивается в длинный хвост. Конфигурация магнитосферы определяется взаимодействием с солнечным ветром – потоком заряженных частиц космического происхождения. С дневной стороны она укорочена и простирается на 8 – 14 радиусов Земли, с ночной – вытянута, образуя, так называемый, магнитный хвост планеты длиной в несколько сот радиусов Земли.

Заметное влияние на магнитное поле на поверхности Земли оказывают токи в ионосфере. Эта область верхней атмосферы, простирающаяся от высот порядка 100 км и выше. Содержит большое количество ионов. Плазма удерживается магнитным полем Земли, но её состояние определяется взаимодействием магнитного поля Земли с солнечным ветром, чем и объясняется связь магнитных бурь на Земле с солнечными вспышками.

Магнитное поле Земли охватывает все оболочки Земли и околопланетное пространство. Поле обусловлено действием постоянных источников, расположенных внутри Земли, которые испытывают медленные (вековые) изменения (вариации), и переменных источников, находящихся в верхних слоях атмосферы. Соответственно различают основное, или главное (магнитное поле Земли 99 %), и переменное (магнитное поле Земли 1 %) магнитные поля.

Основное магнитное поле неоднородно, его напряжённость уменьшается от 55,7 у магнитных полюсов до 33,4 А/м у магнитного экватора, которые не совпадают в пространстве с географическими полюсами и экватором. Отклонения действительных значений магнитного поля в данной точке от расчётного, или нормального, называют *магнитными аномалиями*. Различают мировые аномалии глубинного происхождения (Восточно – Сибирская, Бразильская и др.), региональные и локальные. Последние могут быть вызваны скоплением магнитных горных пород, например, железных руд (*Курская магнитная аномалия*).

Из-за постоянного смещения магнитных аномалий (к западу со скоростью около 0,2 в год), вековых вариаций поля возникает необходимость заново составлять магнитные карты, которые играют важную роль в морской и воздушной навигации, в геодезии и маркшейдерском деле. С этой целью проводятся магнитные съёмки на суше, в океанах, в воздушном и космическом пространстве. Исследования показывают, что направление основного магнитного поля Земли в прошлом многократно изменялось на противоположное. Последнее такое изменение имело место около 0,7 млн. лет назад.

Переменное геомагнитное поле связано с обтеканием магнитосферы плазмой солнечного ветра и прорывом заряженных частиц в магнитосферу. Это приводит к её сжатию с дневной

стороны и формированию магнитного хвоста с противоположной. Изменение интенсивности электрических токов в магнитосфере и ионосфере Земли вызывает колебания частот и амплитуд магнитного поля, которые могут быть *периодическими* (солнечно-суточными и лунно-суточными), *магнитными вариациями* либо *неправильными* – так называемыми, *магнитными возмущениями*. Если последние охватывают всю Землю и продолжаются несколько дней, их называют мировыми *магнитными бурями*, они сопровождаются полярными сияниями, ионосферными возмущениями и др. явлениями.

Параметры земного магнитного поля

Точки Земли, в которых напряжённость магнитного поля имеет вертикальное направление, называют *магнитными полюсами*. Таких точек на Земле две: северный магнитный полюс и южный магнитный полюс.

Прямая, проходящая через магнитные полюсы, называется *магнитной осью* Земли. Окружность большого круга в плоскости, которая перпендикулярна к магнитной оси, называется *магнитным экватором*. Напряжённость магнитного поля в точках магнитного экватора имеет приблизительно горизонтальное направление.

Средняя напряжённость поля на поверхности Земли составляет около 40 А/м и сильно зависит от географического положения. Напряжённость магнитного поля на магнитном экваторе меньше, чем у магнитных полюсов. В некоторых районах (в так называемых районах магнитных аномалий, например, курская магнитная аномалия) напряжённость резко возрастает. Дипольный магнитный момент Земли на 1995 год составлял $7,812 \cdot 10^{22}$ А · м², уменьшаясь в среднем за последние десятилетия на 1/4000 в год.

Для магнитного поля Земли характерны возмущения, называемые геомагнитными пульсациями вследствие возбуждения гидромагнитных волн в магнитосфере Земли; частотный диапазон пульсаций простирается от миллигерц до одного килогерца.

Изменения магнитного поля Земли

Магнитные полюса Земли непостоянны. Периодически они меняются местами. За предыдущие 160 миллионов лет магнитные север и юг менялись местами около 100 раз. Последний раз это событие произошло около 720 тысяч лет назад.

Смещение магнитных полюсов регистрируется с 1885 г. За последние 100 лет магнитный полюс в южном полушарии переместился почти на 900 км и вышел в Индийский океан. Новейшие данные по состоянию арктического магнитного полюса (движущегося по направлению к Восточно-Сибирской мировой магнитной аномалии через Ледовитый океан) показали, что с 1973 по 1984 г. его пробег составил 120 км, с 1984 по 1994 г. – более 150 км. Хотя эти данные расчётные, они подтверждены замерами северного магнитного полюса. По данным на начало 2007-го года, скорость дрейфа северного магнитного полюса увеличилась с 10 км/год в 70-х годах, до 60 км/год в 2004-м году.

Напряжённость земного магнитного поля падает, причём неравномерно. За последние 22 года она уменьшилась в среднем на 1,7 %, а в некоторых регионах – например, в южной части Атлантического океана, – на 10 процентов. В некоторых местах напряжённость магнитного поля, вопреки общей тенденции, даже возросла.

Ускорение движения полюсов (в среднем на 3 км/год) и движение их по коридорам инверсии магнитных полюсов, позволяет предположить, что в данном перемещении полюсов следует усматривать не экскурс, а очередную инверсию магнитного поля Земли.

Это подтверждается и текущим возрастанием угла раствора каспов (полярных щелей в магнитосфере на севере и юге), который к середине 90-ых годов достиг 45°. В расширившиеся щели устремился радиационный материал солнечного ветра, межпланетного пространства и космических лучей, вследствие чего в полярные области поступает большее количество вещества и энергии, что может привести к дополнительному разогреву полярных шапок.

В прошлом инверсии магнитных полюсов происходили многократно и жизнь сохранилась. Вопрос в том, какой ценой. Если, как утверждается в некоторых гипотезах, во время перестановки полюсов магнитосфера Земли на некоторое время исчезнет, то на Землю обрушится поток космических лучей, что представляет опасность для обитателей суши и тем

большую, если исчезновение магнитосферы будет сопряжено с истощением озонового слоя. Обнадёживает тот факт, что во время инверсии магнитного поля Солнца, произошедшего в марте 2001 года, полного исчезновения солнечной магнитосферы зафиксировано не было. Полный цикл обращения магнитного поля Солнца составляет 22 года.

1.3. Величины, характеризующие магнитное поле Земли

В первом приближении магнитное поле Земли аналогично полю, создаваемому однородно намагниченной сферой (шаром). Рисунок 5 представляет сечение Земли.

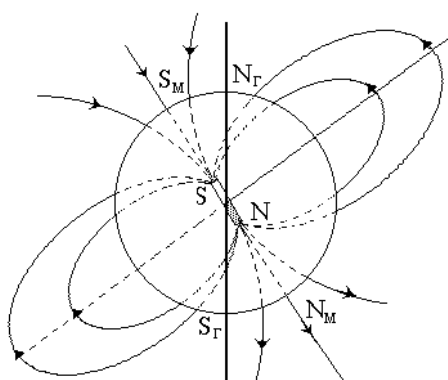


Рис.5.

Так как магнитные и географические полюса Земли не совпадают, то магнитная стрелка указывает направление север-юг только приблизительно.

Магнитными меридианами называются проекции силовых линий магнитного поля Земли на её поверхность; сложные кривые, сходящиеся в северном и южном магнитных полюсах Земли.

Плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называют *плоскостью магнитного меридиана* данного места, тогда прямая, по которой эта плоскость пересекается с горизонтальной плоскостью, и есть магнитный меридиан.

Угол между направлением магнитного и географического меридианов называют *магнитным склонением* α (рис.6). Величина его меняется от места к месту на земном шаре.

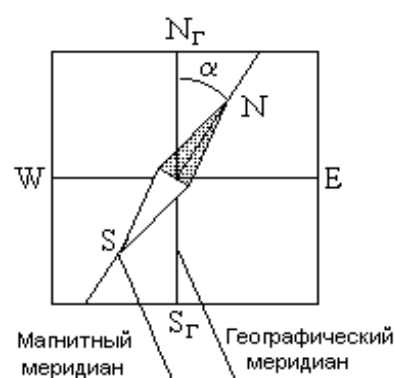


Рис. 6.

Магнитное склонение называют *западным W* или *восточным E* в зависимости от того, к западу или востоку от плоскости географического меридиана отклоняется *северный* полюс магнитной стрелки (рис.6). Часто восточное *E* склонение отмечают знаком (+), а западное *W* – знаком (-).

Вообще говоря, силовые линии магнитного поля Земли не параллельны её поверхности. Поскольку вектор напряженности

магнитного поля \vec{H} направлен по касательной к силовой линии в данной точке, то, за исключением района магнитного экватора, он не лежит в плоскости горизонта данного места, а образует с этой плоскостью некоторый угол. Этот угол называют *магнитным наклоением* i (рис.7).

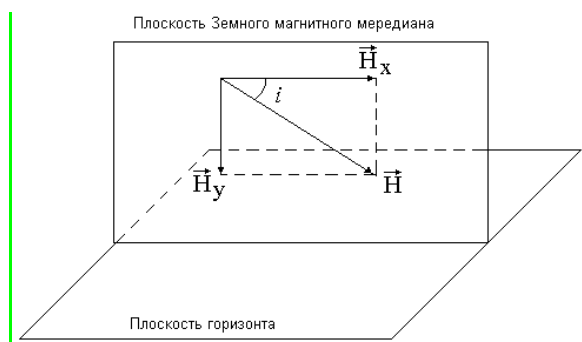


Рис. 7.

Вектор напряженности \vec{H} в таком случае можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие – горизонтальную H_x и вертикальную H_y .

В северном полушарии вертикальная составляющая магнитного поля направлена вниз, в южном полушарии – вверх.

Величина магнитного наклоения в разных местах Земли различна. Вблизи Санкт-Петербурга угол наклоения составляет около 71° и напряженность H_x магнитного поля ~ 13 А/м. Напряженность геомагнитного поля H убывает от магнитных полюсов к экватору и равна $55 - 33$ А/м.

Таким образом, три величины – *склонение*, *наклоение* и численное значение *горизонтальной составляющей напряженности* полностью характеризуют по величине и направлению магнитное поле Земли в данном месте. Эти три величины называют *элементами земного магнитного поля*. Из элементов Земного магнитного поля на практике наиболее удобно измерять именно *горизонтальную H_x составляющую напряженности (индукции)*.

2. Теория лабораторной работы

В данной работе определение H_x (и соответственно $B_x = \mu_0 H_x$) связано с исследованием поведения магнитной стрелки в магнитном поле Земли и магнитном поле, создаваемым круговым током.

С этой целью используется *тангенс-буссоль* – устройство, в котором магнитная стрелка на вертикальной оси устанавливается в центре кругового витка (рис.8, 9).

При отсутствии тока в витке стрелка располагается вдоль магнитного меридиана Земли. Поворотом витка тангенс-буссоли вокруг вертикальной оси можно совместить его плоскость с плоскостью магнитного меридиана.

При пропускании через виток тока I магнитная стрелка повернется на некоторый угол α . Объясняется это действием на стрелку двух полей – магнитного поля Земли H_x и поля кругового тока \vec{H} . В результате стрелка

установится вдоль результирующего поля

$$\vec{H}_{\text{рез.}} = \vec{H}_x + \vec{H}.$$

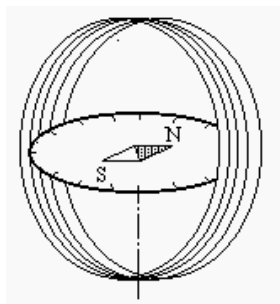


Рис. 8.

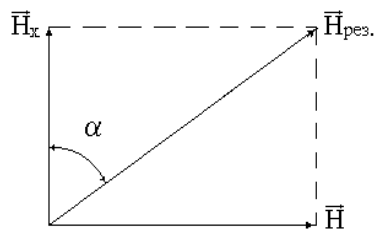
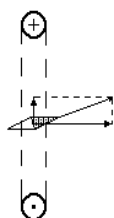


Рис. 9.

Из рис.9 видно, что $H_x = H/\operatorname{tg} \alpha$. Учитывая, что напряженность магнитного поля, создаваемого током I в центре кольца радиусом r , содержащего N витков, равна: $H = NI/2r$, получим $H_x = NI/2r \operatorname{tg} \alpha$. Для индукции магнитного поля B последняя формула примет вид: $B_x = \mu_0 NI/2r \operatorname{tg} \alpha$.

Последняя формула используется для опытного определения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Ее можно переписать в виде:

$$B_x = CI/\operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где $C = \mu_0 N/2r$.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м};$$

$$N = 160 \text{ витков};$$

$$r = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Ознакомиться с электрической схемой установки (рис.10):

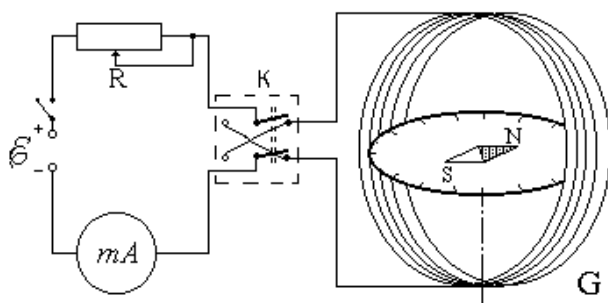


Рис. 10.

G – тангенс-буссоль, mA – миллиамперметр, R – реостат, K – переключатель направления тока, ε – источник тока.

2. Установить плоскость катушки (витка) тангенс-буссоли в плоскости

магнитного меридиана Земли. Определить начало отсчета на шкале тангенс-буссоли.

3. С разрешения преподавателя включить питание установки.
4. Установить реостатом R ток I в катушке.
5. Как только стрелка компаса придет в равновесие, отсчитать по шкале тангенс-буссоли угол отклонения стрелки α_1 .
6. Уменьшить ток I до нуля. Изменить с помощью ключа K направление тока и увеличить его до прежнего значения. Измерить величину отклонения стрелки α_2 . (Переключение направления тока необходимо для уменьшения возможной ошибки из-за неточной установки плоскости катушки в плоскости земного меридиана).
7. Повторить измерения по пунктам 4 – 6.
8. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

№ п/п	I , мА	α_1 , град	α_2 , град	$\alpha_{\text{средн.}}$, град	$tga_{\text{средн.}}$	$B_{x_{\text{гор.}}}$, Тл	$\langle B_{x_{\text{гор.}}} \rangle$, Тл	$H_{\text{гор.}}$, А/м
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

9. Обесточить установку.
10. Для каждого значения тока I определить значение $\alpha_{\text{cp}} = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ и соответствующее ему значение tga_{cp} и записать их в таблицу.

11. Вычислить значения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли для каждого измерения и записать их в таблицу.
12. Вычислить и записать среднее значение B_x .
13. По среднему значению индукции магнитного поля Земли вычислить значение напряженности $H_{гор.} = \frac{B_x \text{ гор.}}{\mu_0 \mu}$, где $\mu = 1$.
14. Проанализировать результаты, сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Согласно обозначениям на шкалах электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, указать назначение прибора, тип тока, безопасность, класс точности, систему измерительного механизма, рабочее положение при эксплуатации.
2. По классу точности электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, вычислить их абсолютную (инструментальную) погрешность и указать к какой группе приборов (прецизионным, техническим или внеклассовым) они относятся.
3. Чем обусловлены существования основного и переменного магнитного полей Земли?
4. Дайте определения плоскости магнитного меридиана, магнитного меридиана и магнитного склонения?
5. Укажите формулу, связывающую магнитную индукцию \vec{B} и напряженность магнитного поля \vec{H} ? Единицы измерения этих величин?
6. Что называется магнитным наклоном i ?
7. Перечислите величины, называемые элементами магнитного поля Земли.
8. Как направлена вертикальная составляющая магнитного поля Земли в северном полушарии и южном полушарии?
9. Кратко опишите устройство и принцип работы тангенс-буссоля?

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ
МАГНЕТРОНА

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: определить отношение заряда электрона к его массе (e/m).

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета (Δx_{np})
1	Электронная лампа с цилиндрическим анодом	–	–	–	–
2	Соленоид	–	–	–	–
3	Амперметр				
4	Миллиамперметр				
5	Вольтметр				

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. *Магнитное поле и его характеристики*

Магнитное поле – одна из форм электромагнитного поля, релятивистский эффект электрического поля.

Магнитное поле создаётся (порождается) током заряженных частиц, или изменяющимся во времени электрическим полем (током смещения), или собственными магнитными моментами частиц.

Магнитное поле действует только на движущиеся заряды. Оно обладает энергией, которая проявляет себя в виде электромагнитных сил, действующих на отдельные движущиеся электрические заряды (электроны и ионы) и на их потоки, т. е. электрический ток. Под влиянием электромагнитных сил движущиеся заряженные частицы отклоняются от своего первоначального пути.

Основными характеристиками магнитного поля являются *магнитная индукция и напряженность*.

Механическое действие, которое магнитное поле оказывает на другие тела, можно характеризовать вектором силы, а само поле – векторной физической величиной, называемой *магнитной индукцией*, которая позволяет определить эту силу. Магнитная индукция обозначается буквой \vec{B} , измеряется в теслах (Тл).

Индукция магнитного поля – векторная физическая величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям.

1Тл – индукция однородного магнитного поля, в котором на проводник длиной 1м с током в 1А, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям, действует сила 1Н.

Магнитная индукция \vec{B} является основной силовой характеристикой магнитного поля. Индукция магнитного поля может быть определена в любой точке пространства и в любой момент времени:

$$\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t).$$

Направление вектора магнитной индукции задается направлением магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Оно совпадает с направлением, которое указывает северный полюс стрелки (рис. 1).



Рис. 1.

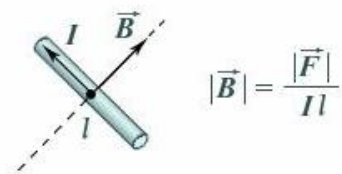


Рис. 2.

Модуль вектора $|\vec{B}|$ можно определить с помощью силы, действующей на движущийся свободный заряд или проводник с током, где заряды перемещаются вдоль проводника, а также с помощью момента сил, действующих на рамку, по которой течет ток (рис. 2).

Магнитное поле в макроскопическом описании представлено двумя различными векторными полями, обозначаемыми, как \vec{H} и \vec{B} , где \vec{H} – напряженность, \vec{B} – индукция магнитного поля.

Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности следующим

выражением: $\vec{H} = \vec{B}/(\mu_0\mu)$, А/м, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, μ – безразмерная величина – *магнитная проницаемость среды*, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в среде \vec{B} больше индукции \vec{B}_0 в вакууме (в вакууме $\mu = 1$):

$$\mu = \vec{B}/\vec{B}_0$$

Магнитная проницаемость зависит только от свойств среды, в которой создаётся магнитное поле.

Напряженность \vec{H} не зависит от магнитных свойств среды, но учитывает влияние силы тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля в данной точке пространства. Однако, вектор \vec{H} является важной, но вспомогательной характеристикой магнитного поля. Основной характеристикой магнитного поля всё же является вектор \vec{B} .

1.2. Сила Лоренца

Магнитное поле проявляется в воздействии на магнитные моменты частиц и тел, на движущиеся заряженные частицы (или проводники с током).

Силой Лоренца – называется сила, действующая на движущуюся в магнитном поле электрически заряженную частицу.

Она пропорциональна заряду частицы q , составляющей скорости \vec{v} , перпендикулярной направлению вектора магнитного поля \vec{B} , и величине индукции магнитного поля B . В СИ сила Лоренца выражается так:

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}],$$

где квадратными скобками обозначено векторное произведение (рис.3).

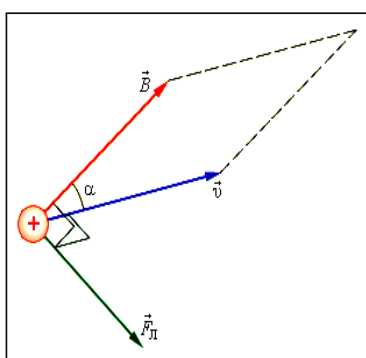


Рис. 3.

Взаимное расположение векторов \vec{v} , \vec{B} , \vec{F}_L , и модуль силы Лоренца F_L численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах \vec{v} и \vec{B} помноженной на заряд q .

В случае однородного магнитного поля ($\vec{B} = const$) сила Лоренца равна:

$$F = |\vec{F}| = q v B \sin \alpha,$$

где: q – заряд частицы, v – скорость частицы, B – магнитная индукция поля, α – угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции.

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки (рис.4, 5):

Если поставить левую руку так, чтобы перпендикулярная скорости составляющая вектора индукции входила в ладонь, а четыре пальца были бы расположены по направлению скорости движения положительного заряда (или против направления скорости отрицательного заряда), то отогнутый большой палец укажет направление силы Лоренца.

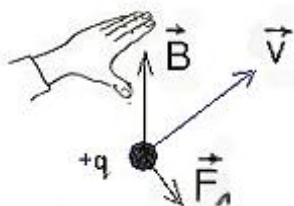


Рис.4.

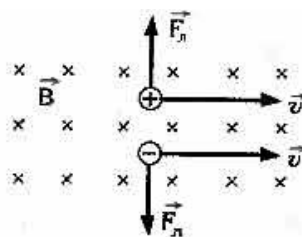


Рис.5.

Полная сила

При движении заряженной частицы в электромагнитном поле на неё будут действовать и электрическое, и магнитное поле, а полная сила есть сумма сил со стороны первого и второго:

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}],$$

где: \vec{E} – напряжённость электрического поля, \vec{F}_m – сила действующая со стороны магнитного поля (сила Лоренца), \vec{F}_e – сила, действующая со стороны электрического поля.

Свойства силы Лоренца

1. Сила Лоренца направлена перпендикулярно векторам \vec{v} и \vec{B} (рис. 3, 4).
2. Для силы Лоренца, так же как и для сил инерции, третий закон Ньютона не выполняется.
3. При движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает, (т.е. не изменяет величину скорости заряда и его кинетическую энергию).
4. Макроскопическим проявлением силы Лоренца является сила Ампера. (Так как электрический ток представляет собой упорядоченное движение зарядов, то действие магнитного поля на проводник с током есть результат его действия на отдельные движущиеся заряды).

Частные случаи

1. Если заряженная частица движется параллельно силовым линиям магнитного поля, то $F_L = 0$, и заряд в магнитном поле движется равномерно и прямолинейно.
2. В однородном магнитном поле, направленном перпендикулярно вектору скорости, под действием силы Лоренца заряженная частица будет равномерно двигаться по окружности постоянного радиуса r (рис. 6). Сила Лоренца в этом случае является центростремительной силой:

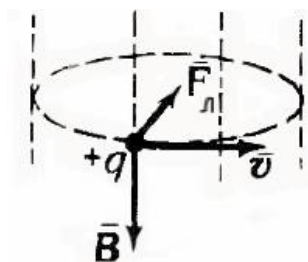


Рис. 6.

$$\frac{mv^2}{r} = |q|vB$$

$$r = \frac{m}{|q|} \cdot \frac{v}{B}$$

1.3. Магнетрон

Магнетрон – это мощная электронная лампа, генерирующая микроволны при взаимодействии потока электронов с магнитным полем.

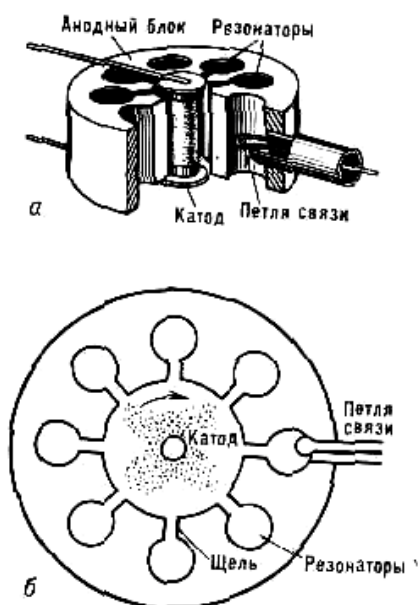


Рис. 7.

В простейшей конструкции многорезонаторного магнетрона (рис. 7) анодный блок представляет собой массивный медный цилиндр с центральным круглым сквозным отверстием и симметрично расположенными сквозными полостями (от 8 до 40 мм), выполняющими роль объёмных резонаторов. Каждый резонатор соединяется щелью с центральным отверстием, в котором расположен катод. Резонаторы образуют кольцевую колебательную систему. Такая система имеет не одну, а несколько резонансных частот, при которых на кольцевой колебательной системе укладывается целое число стоячих волн.

Электроны эмитируются из катода в пространство взаимодействия, где на них действует постоянное электрическое поле анод-катод, постоянное магнитное поле и поле электромагнитной волны. Если бы не было поля электромагнитной волны, электроны бы двигались в скрещённых электрическом и магнитном полях по сравнительно простым кривым: эпициклоидам (кривая, которую описывает точка на круге, катящемся по наружной поверхности окружности большего

диаметра, в конкретном случае – по наружной поверхности катода). При достаточно высоком магнитном поле (параллельном оси магнетрона) электрон, движущийся по этой кривой, не может достичь анода (по причине действия на него со стороны этого магнитного поля силы Лоренца), при этом говорят, что произошло магнитное запертие диода. В режиме магнитного запертия некоторая часть электронов движется по эпициклоидам в пространстве анод-катод. Под действием собственного поля электронов, а также статистических эффектов (дробовой шум) в этом электронном облаке возникают неустойчивости, которые приводят к генерации электромагнитных колебаний, эти колебания усиливаются резонаторами. Электрическое поле возникшей электромагнитной волны может замедлять или ускорять электроны. Если электрон ускоряется полем волны, то радиус его циклотронного движения уменьшается и он отклоняется в направлении катода. При этом энергия передаётся от волны к электрону. Если же электрон

тормозится полем волны, то его энергия передаётся волне, при этом циклотронный радиус электрона увеличивается и он получает возможность достигнуть анода.

2. Теория лабораторной работы

Название “метод магнетрона” связано с тем, что применяемая в работе конфигурация электрического и магнитного полей очень напоминает конфигурацию полей в магнетронах.

Движение электронов в данной работе происходит в кольцеобразном пространстве между катодом и анодом двух электродной электронной лампы. Нить лампы (катод) располагается вдоль оси цилиндра (анода) так, что электрическое поле направлено по радиусу. Лампа помещается внутри соленоида, создающего магнитное поле, параллельное катоду.

Рассмотрим траекторию электрона под действием комбинации электрического и магнитного полей. Воспользуемся цилиндрической системой координат (рис.8): r – расстояние от оси цилиндра, φ – полярный угол.

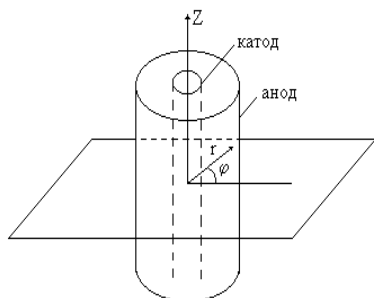


Рис. 8.

Сила, действующая на электрон в электрическом поле цилиндра равна:

$$F_{r_{эл}} = eE_{r_{эл}},$$

где E_r – напряженность электрического поля, направленная по радиусу. Другие компоненты электрических сил в радиальном поле отсутствуют, поэтому

$$F_{z_{эл}} = F_{\varphi_{эл}} = 0.$$

Рассмотрим силы, действующие на электрон со стороны магнитного поля. Так как магнитное поле направлено вдоль оси Z , то:

$$F_{z_{маг}} = 0, \quad F_{\varphi_{маг}} = -e \cdot v_r \cdot B, \quad F_{r_{маг}} = e \cdot v_\varphi \cdot B.$$

Соответственно:

$$\begin{cases} v_r = \dot{r} = \frac{dr}{dt}, \\ v_\varphi = r\dot{\varphi} = r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right), \\ v_z = const \text{ (т.к. } F_{z_{маг}} = 0). \end{cases}$$

Движение в плоскости (r, φ) описывается с помощью основного уравнения динамики вращательного движения:

$$J(d^2\varphi/dt^2) = M_z,$$

где $J = mr^2$ – момент инерции электрона относительно оси Z , m – масса электрона, M_z – момент силы вдоль оси Z .

С другой стороны,

$$M_z = r(F_{\varphi_{\text{маг}}} + F_{\varphi_{\text{эл}}}).$$

Подставив значение $F_{\varphi_{\text{маг}}} = -e v_r$ и учитывая, что $F_{\varphi_{\text{эл}}} = 0$, получим:

$$M_z = -e \cdot r \cdot v_r \cdot B,$$

где B – индукция магнитного поля, а v_r – скорость вдоль радиуса.

Окончательно:

$$\frac{d}{dt}(m r^2 \dot{\varphi}) = -e B r \frac{dr}{dt} = -\frac{1}{2} e B \frac{d(r^2)}{dt}.$$

Интегрируя это уравнение и замечая, что заряд электрона отрицательный, получим:

$$r^2 \dot{\varphi} + C = |e| \frac{B \cdot r^2}{2m},$$

где C – постоянная интегрирования.

Учитывая, что электроны вылетают из катода с малой скоростью, можно положить $C = 0$. Тогда уравнение приобретет вид:

$$\dot{\varphi} = |e| \frac{B}{2m}.$$

Рассмотрим теперь движение электрона вдоль радиуса. Работа сил электрического поля $W = e \cdot U_i$, где U_i – потенциал точки, в которую переместился электрон. Магнитное поле работы не производит, следовательно, W определяет кинетическую энергию электрона:

$$eU = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} m \cdot (v_r^2 + v_{\varphi}^2) = \frac{1}{2} m \cdot \left[\dot{r}^2 + \left(\frac{r \cdot e \cdot B}{2m} \right)^2 \right].$$

Движение электрона при различных значениях индукции магнитного поля B показано на рис. 9.

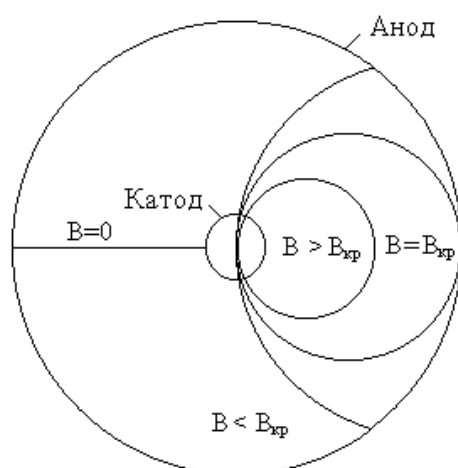


Рис. 9.

Величину $B_{кр}$ можно найти, заметив, что радиальная скорость $\dot{r} = 0$, при $r = r_a$.

Отсюда:
$$U_a = \frac{e \cdot B_{кр}^2 \cdot r_a^2}{8m}.$$

Для отношения e / m получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 \cdot r_a^2}, \quad (1)$$

где $r = 9,6 \cdot 10^{-3}$ м - радиус анода.

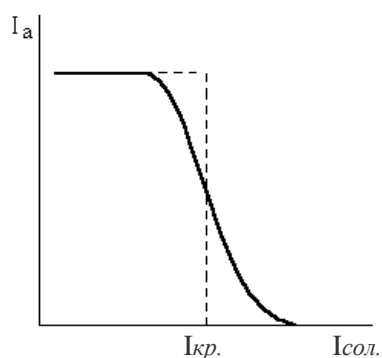


Рис. 10.

На рис. 10 представлена зависимость анодного тока от индукции магнитного поля. Пунктирная кривая соответствует случаю, когда все электроны, покидая катод, имели бы одинаковую скорость. Сплошная линия соответствует наблюдаемой на опыте зависимости.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 11 представлены схемы питания анода и соленоида.

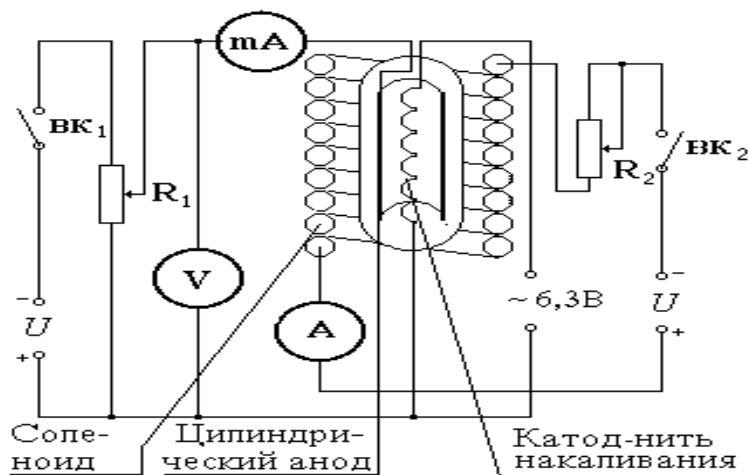


Рис. 11.

1. Включить источник питания. Обеспечить прогрев аппаратуры 5 – 7 минут.
2. Реостатом R_2 установить начальное значение тока в соленоиде (0,2 А), и изменяя его каждый раз на 0,1 А, выполнить измерения для трех значений анодного напряжения U_a установив его с помощью сопротивления R_1 и

контролируя по вольтметру (численные значения указаны в таблице), величину анодного тока (I_a) заносить в таблицу.

Таблица

	$U_a = 30 \text{ В}$	$U_a = 40 \text{ В}$	$U_a = 50 \text{ В}$	e / m ,	Относи- тельная погрешность $\delta \%$
$I_{\text{сол}}, \text{ А}$	$I_a, \text{ А}$	$I_a, \text{ А}$	$I_a, \text{ А}$	Кл/кг	
0,2					
0,3					
0,4					
0,5					
0,6					
0,7					
0,8					
0,9					
1,0					

3. Результаты занести в таблицу и по ним построить семейство характеристик $I_a = f(I_{\text{сол}})$ (рис. 10), откладывая по оси абсцисс $I_{\text{сол}}$, а по ординате $-I_a$. При определении $I_{\text{кр}}$ в качестве истинных лучше всего принимать значения тока, при которых кривые имеют наибольший наклон.
4. Вычислить $B_{\text{кр}}$ для каждого графика по формуле:

$$B_{\text{кр}} = \mu\mu_0 n \cdot I_{\text{кр}} \frac{l}{\sqrt{4R^2 + l^2}}$$

(n, R, l – заданы на стенде и ниже по тексту).

5. По формуле (1) рассчитать среднее значение e / m для электрона. Сравнить полученное значение с принятой табличной величиной: $\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{табл}} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ и определить относительную погрешность измерения, приняв табличную величину за истинную.
6. Проанализировать результаты, сделать вывод.

Параметры соленоида: $n = 10^4 \text{ м}^{-1}$; $R = 0,05 \text{ м}$;
 $l = 0,11 \text{ м}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Согласно обозначениям на шкалах электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, указать назначение прибора, тип тока, безопасность, класс точности, систему измерительного механизма, рабочее положение при эксплуатации.
2. По классу точности электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, вычислить их абсолютную (инструментальную) погрешность и указать к какой группе приборов (прецизионным, техническим или внеклассовым) они относятся.
3. Кратко опишите устройство и принцип действия установки, используемой в данной работе.
4. Какие силы действуют на электрон в пространстве между анодом и катодом двухэлектродной электронной лампы?
5. Как направлена сила, действующая на рассматриваемый электрон со стороны электрического поля?
6. Как направлена сила, действующая на рассматриваемый электрон со стороны магнитного поля? Как называется эта сила?
7. Под действием какой силы рассматриваемый электрон движется по криволинейной траектории?
8. Какая сила сообщает электрону кинетическую энергию?
9. Объяснить: почему при индукции магнитного поля $B \geq B_{кр}$ резко падает сила анодного тока I_a лампы.
10. Какой будет траектория электрона, если он влетает в магнитное поле вдоль направления поля? перпендикулярно ему?
11. В каком случае траекторией электрона является винтовая линия?

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10
СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ
ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ
С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: изучить процесс намагничивания ферромагнетика, снять кривую намагничивания, исследовать петли гистерезиса различных сортов трансформаторной стали.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Электронный осциллограф	–	-	-	-
2	Трансформатор в виде тороида с железным сердечником	–	–	–	–
3	Источник переменного тока	–	–	–	–
4	Вольтметр				
5	Миллиамперметр				

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. *Понятие о магнитном поле и его некоторые характеристики*

Магнитное поле – одна из форм электромагнитного поля, релятивистский эффект электрического поля.

Магнитное поле создаётся (порождается) током заряженных частиц, или изменяющимся во времени электрическим полем (током смещения), или собственными магнитными моментами частиц.

Магнитное поле действует только на движущиеся заряды. Оно обладает энергией, которая проявляется себя в виде электромагнитных сил, действующих на отдельные движущиеся электрические заряды (электроны и ионы) и на их потоки, т. е. электрический ток. Под

влиянием электромагнитных сил движущиеся заряженные частицы отклоняются от своего первоначального пути.

Основными характеристиками магнитного поля являются *магнитная индукция, напряженность и магнитный момент.*

Индукция, напряжённость магнитного поля, магнитная проницаемость

Механическое действие, которое магнитное поле оказывает на другие тела, можно характеризовать вектором силы, а само поле – векторной физической величиной, называемой *магнитной индукцией*, которая позволяет определить эту силу. Магнитная индукция обозначается буквой \vec{B} , измеряется в теслах (Тл).

Индукция магнитного поля - векторная физическая величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям.

Магнитная индукция \vec{B} является основной силовой характеристикой магнитного поля. Индукция магнитного поля может быть определена в любой точке пространства и в любой момент времени:

$$\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t)$$

Направление вектора магнитной индукции задается направлением магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Оно совпадает с направлением, которое указывает северный полюс стрелки (рис. 1).



Рис. 1.

Магнитное поле в макроскопическом описании представлено двумя различными векторными полями, обозначаемыми, как \vec{H} и \vec{B} , где \vec{H} - напряженность, \vec{B} - индукция магнитного поля.

Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности следующим выражением:

$$\vec{H} = \vec{B}/(\mu_0\mu), \text{ А/м,}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, μ – безразмерная величина – *магнитная проницаемость среды*, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в среде \vec{B} больше индукции \vec{B}_0 в вакууме (в вакууме $\mu = 1$):

$$\mu = \vec{B}/\vec{B}_0$$

Магнитная проницаемость зависит от свойств среды, в которой создаётся магнитное поле⁶.

Напряженность \vec{H} не зависит от магнитных свойств среды, но учитывает влияние силы тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля в данной точке пространства. Однако, вектор \vec{H} является важной, но вспомогательной характеристикой магнитного поля. Основной характеристикой магнитного поля всё же является вектор \vec{B} .

Магнитный момент контура с током

Подобно тому, как для исследования электрического поля мы использовали пробный заряд, применим для исследования магнитного поля пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре очень малых размеров. Будем называть такой контур пробным контуром (рис. 2).

⁶ В общем случае магнитная проницаемость конкретного вещества зависит от многих факторов: напряженности магнитного поля, формы рассматриваемого поля (так как конечные размеры любого магнетика приводят к появлению встречного поля, уменьшающего первоначальное), температуры, частоты изменения магнитного поля, наличия дефектов структуры и т.д.

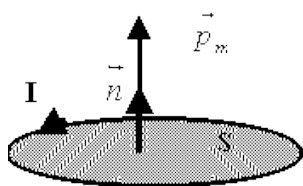


Рис. 2.

Ориентацию его в пространстве характеризует направление нормали \vec{n} к контуру, восстанавливаемой по правилу правого буравчика: вращаем рукоятку правого буравчика по направлению тока в контуре, тогда направление его поступательного движения даст направление нормали \vec{n} (рис. 2).

Векторную величину: $\vec{P}_m = IS\vec{n}$ называют магнитным моментом контура, который в СИ измеряется в $A \cdot m^2$, где I - ток контуре, S - площадь контура с током.

1.2. Магнитное поле в веществе. Магнетики

Все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами.

Магнетик – термин, применяемый ко всем веществам при рассмотрении их магнитных свойств.

Магнитное поле в веществе является суперпозицией двух полей: внешнего магнитного поля, создаваемого *макротоками*⁷ и внутреннего, или собственного, магнитного поля, создаваемого *микротоками*⁸.

Намагниченное вещество создает магнитное поле \vec{B}' , которое накладывается на внешнее поле \vec{B}_0 (поле в вакууме). Оба поля в сумме дают результирующее магнитное поле с индукцией

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

причем под здесь \vec{B} и далее подразумевается макроскопическое (усредненное по физически бесконечно малому объему вещества) поле.

Разнообразие типов магнетиков обусловлено различием магнитных свойств микрочастиц, образующих вещество, а также характера взаимодействия между ними.

Для объяснения способности тел к намагничиванию, Ампер предположил, что в молекулах вещества циркулируют круговые токи (получившие впоследствии название *молекулярных токов Ампера*). Каждый такой ток обладает *собственным* магнитным моментом \vec{P}_m и создает в окружающем пространстве магнитное поле. В отсутствие внешнего магнитного поля токи Ампера ориентированы *беспорядочным* образом, вследствие чего обусловленное ими магнитное поле равно нулю. Суммарный магнитный момент тела также равен нулю (рис.3).

Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты молекул приобретают *преимущественную ориентацию* в одном направлении, вследствие

⁷ *Макротоками* называются токи проводимости и конвекционные токи, связанные с движением заряженных макроскопических тел.

⁸ *Микротоками* (молекулярными токами) называют токи, обусловленные движением электронов в атомах, молекулах и ионах.

чего магнетик намагничивается, а его суммарный магнитный момент становится отличным от нуля (см. рис.3).

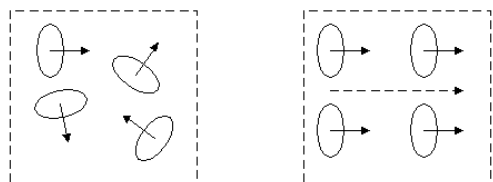


Рис.3.

Магнитные свойства веществ определяются магнитными свойствами атомов или элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав атомов. В настоящее время установлено, что магнитные свойства протонов и нейтронов почти в 1000 раз слабее магнитных свойств электронов. Поэтому магнитные свойства веществ в основном определяются электронами, входящими в состав атомов.

Одним из важнейших свойств электрона является наличие у него не только электрического, но и собственного магнитного поля. Собственное магнитное поле электрона называют *спиновым* (spin – вращение). Электрон создает магнитное поле также и за счет орбитального движения вокруг ядра, которое можно уподобить круговому микротоку. Спиновые поля электронов и магнитные поля, обусловленные их орбитальными движениями, и определяют широкий спектр магнитных свойств веществ.

Все вещества (и вообще среды) в отношении их магнитных свойств делятся на следующие основные группы:

- *Диамагнетики* – вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля ($\vec{B} < \vec{B}_0; \mu < 1$).

Молекулы диамагнетика собственного магнитного момента не имеют. Он возникает у них только под действием внешнего магнитного поля и направлен против него. Таким образом, результирующее магнитное поле в диамагнетике меньше, чем внешнее поле, правда, на очень малую величину. Это приводит к тому, что при перемещении диамагнетика в неоднородное магнитное поле он стремится сместиться в ту область, где напряженность магнитного поля меньше.

- *Парамагнетики* – вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля ($\vec{B} > \vec{B}_0; \mu > 1$).

Молекулы (или атомы) парамагнетика имеют собственные магнитные моменты, которые под действием внешних полей ориентируются по полю и тем самым создают результирующее поле, превышающее внешнее. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле. Так, например, жидкий кислород – парамагнетик, он притягивается к магниту.

- *Ферромагнетики* – вещества, в которых ниже определённой критической температуры (точки Кюри) устанавливается дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов ($\vec{B} \gg \vec{B}_0; \mu \gg 1$).

Различают так же:

- *Ферромагнетики* – материалы, у которых магнитные моменты вещества направлены противоположно и не равны по силе.
- *Антиферромагнетики* – вещества, в которых установился антиферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов: магнитные моменты веществ направлены противоположно и равны по силе.

К перечисленным выше группам веществ в основном относятся обычные твердые или (к некоторым) жидкие вещества, а также газы. Существенно отличается взаимодействие с магнитным полем сверхпроводников и плазмы.

1.3. Магнитный момент атома

Атомы всех веществ состоят из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Движение электронов в атомах подчиняется квантовым законам. Магнетизм вещества удастся объяснить посредством модели Бора, согласно которой электроны в атомах движутся по стационарным круговым орбитам. Электрон, движущийся по одной из таких орбит, эквивалентен круговому току, поэтому он обладает орбитальным магнитным моментом: $\vec{p}_m = IS\vec{n}$, модуль которого равен:

$$p_m = IS = evS, \quad (1)$$

где $I = ev$ – сила кругового тока, вызванного движением электрона по орбите вокруг ядра атома; v – частота вращения электрона по орбите; S – площадь орбиты. Если электрон движется по часовой стрелке (рис. 4), то ток направлен против часовой стрелки и вектор \vec{p}_m (в соответствии с правилом правого винта) направлен перпендикулярно плоскости орбиты электрона.

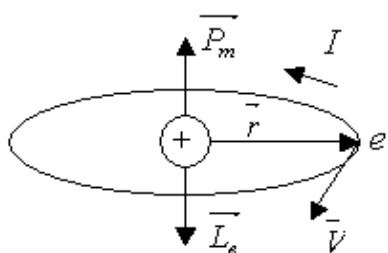


Рис. 4.

Орбитальный магнитный момент \vec{p}_m и механический момент \vec{L}_l электрона.

момента электрона. Из рис. 4 следует, что направления \vec{p}_m и \vec{L}_l противоположны, поэтому, учитывая выражение (1) и (2), получим:

$$\vec{p}_m = -\frac{e}{2m} \cdot \vec{L}, \quad (3)$$

где величина:

$$g = -\frac{e}{2m} \quad (4)$$

называется *гиромангнитным отношением орбитальных моментов* (общепринято писать со знаком $< - >$, указывающим на то, что направления моментов противоположны). Это отношение, определяемое универсальными постоянными, одинаково для любой орбиты, хотя для разных орбит значения v и

С другой стороны, движущийся по орбите электрон обладает механическим моментом импульса \vec{L}_l , модуль которого:

$$L_l = mvv = 2mvS, \dots (2)$$

где $v = 2\pi\nu r$ – скорость движения электрона по орбите, $\pi r^2 = S$ – площадь орбиты.

Вектор \vec{L}_l (его направление также определяется по правилу правого винта) называется орбитальным механическим

r различны. Формула (4) выведена для круговой орбиты, но она справедлива и для эллиптических орбит.

Позже, в опытах Эйнштейна и де Гааза, выяснилось, что наряду с орбитальными моментами, электрон обладает также *собственным механическим моментом (спином)* \vec{L}_S (т.е. подобен волчку) и *собственным магнитным моментом* $\vec{\mu}_S$, для которых гиромагнитное отношение оказалось в два раза большим:

$$g = -\frac{e}{2m}, \quad \vec{\mu}_S = -\frac{e}{m} \vec{L}_S$$

Магнитный момент атома складывается из орбитальных и собственных магнитных моментов входящих в его состав электронов, а также магнитного момента ядра атома. Магнитный момент ядра, обусловленный магнитными моментами входящих в состав ядра протонов и нейтронов, *значительно меньше* электронных магнитных моментов, поэтому при рассмотрении многих вопросов им можно пренебречь. Таким образом, *полный магнитный момент атома равен векторной сумме магнитных моментов всех его электронов. Магнитный момент молекулы также можно считать равным сумме магнитных моментов входящих в ее состав электронов.*

1.4. Намагниченность

Различные вещества в той или иной степени способны к **намагничиванию**: то есть под действием магнитного поля, в которое их помещают, приобретают магнитный момент. Одни вещества намагничиваются *сильнее*, другие *слабее*.

Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит векторная величина – **намагниченность (вектор намагничивания)** \vec{J} .

Намагниченность – векторная физическая величина, характеризующая магнитное состояние макроскопического физического тела; определяется как магнитный момент единицы объёма вещества:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{m_i}, \text{ А/м}$$

где \vec{p}_{m_i} – магнитный момент i – го атома из числа n атомов, в объеме ΔV .

Для того чтобы связать вектор намагниченности среды \vec{J} с током $I_{\text{микро}}$, рассмотрим равномерно намагниченный параллельно оси цилиндрический стержень длиной h и поперечным сечением S (рис. 5, а). Равномерная намагниченность означает, что плотность атомных циркулирующих токов внутри материала $I_{\text{микро}}$ повсюду постоянна.

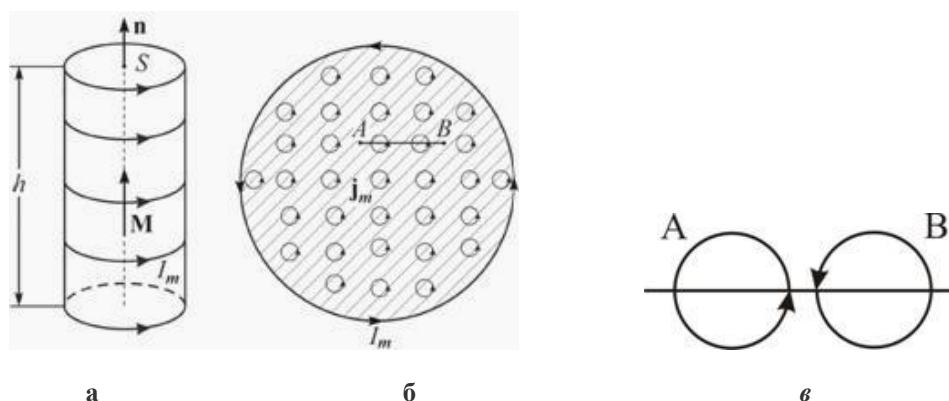


Рис. 5.

Каждый атомный ток в плоскости сечения стержня, перпендикулярной его оси, представляет микроскопический кружок, причем все микротоки текут в одном направлении – против часовой стрелки (рис. 5, б). В местах соприкосновения отдельных атомов и молекул (A, B) молекулярные токи противоположно направлены и компенсируют друг друга (рис. 5, в). Нескомпенсированными остаются лишь токи, текущие вблизи поверхности материала, создавая на поверхности материала некоторый микроток $I_{\text{микро}}$, возбуждающий во внешнем пространстве магнитное поле, равное полю, созданному всеми молекулярными токами.

Закон полного тока для магнитного поля в вакууме можно обобщить на случай магнитного поля в веществе:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$

где $I_{\text{макро}}$ и $I_{\text{микро}}$ – алгебраическая сумма макро- и микротоков сквозь поверхность, натянутую на замкнутый контур L .

Как видно из рис. 6, вклад в $I_{\text{микро}}$ дают только те молекулярные токи, которые нанизаны на замкнутый контур L .

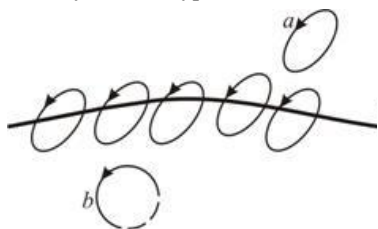


Рис. 6.

Алгебраическая сумма сил микротоков связана с циркуляцией вектора намагниченности соотношением:

$$I_{\text{микро}} = \oint_L \vec{j} d\vec{l},$$

тогда закон полного тока можно записать в виде:

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j} \right) d\vec{l} = I_{\text{макро}}.$$

Вектор:
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j}$$

называется **напряженностью магнитного поля**.

Таким образом, **закон полного тока** для магнитного поля в веществе утверждает, что **циркуляция вектора напряженности** магнитного поля \vec{H} вдоль произвольного замкнутого контура L равна алгебраической сумме макротоков сквозь поверхность, натянутую на этот контур:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{макро}}$$

Последнее выражение – это закон полного тока в интегральной форме.

Намагниченность изотропной среды с напряженностью \vec{H} связаны соотношением:

$$\vec{j} = \chi \vec{H}$$

где χ – коэффициент пропорциональности, характеризующий магнитные свойства вещества и называемый **магнитной восприимчивостью среды**. Он связан с магнитной проницаемостью соотношением $\mu = 1 + \chi$.

Вещества с отрицательными значениями магнитной восприимчивости: $\chi < 0$ ($\mu < 1$) называют **диамагнетиками**. Вещества с небольшими, но положительными значениями магнитной восприимчивости: $\chi > 0$ ($\mu > 1$) называют **парамагнетиками**.

К ферромагнетикам относятся вещества, магнитная восприимчивость которых достигает очень больших значений порядка 10^4 – 10^6 и сильно зависит от напряженности внешнего поля и от температуры.

1.5. Ферромагнетизм

Ферромагнетиками называются **твердые тела, которые могут обладать спонтанной намагниченностью, т. е. намагничены уже в отсутствие магнитного поля.**

Магнитная проницаемость ферромагнетиков по порядку величины лежит в пределах 10^2 – 10^5 . Например, у стали $\mu \approx 8000$, у сплава железа с никелем магнитная проницаемость достигает значений 250000.

К рассматриваемой группе относятся четыре химических элемента: железо, никель, кобальт, гадолиний. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Поэтому вся эта группа получила название ферромагнетиков.

Ферромагнетиками могут быть различные сплавы, содержащие ферромагнитные элементы. Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы – ферриты.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая *температура или точка Кюри*), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. У железа, например, температура Кюри равна 770°C , у кобальта 1130°C , у никеля 360°C .

Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы – на *магнито-мягкие* и *магнито-жесткие* материалы. Магнито-мягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю. К магнито-мягким материалам относятся, например, чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы. Эти материалы применяются в приборах переменного тока, в которых происходит непрерывное перемагничивание, то есть изменение направления магнитного поля (трансформаторы, электродвигатели и т. п.).

Магнито-жесткие материалы в значительной мере сохраняют свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля. Примерами магнито-жестких материалов могут служить углеродистая сталь и ряд специальных сплавов. Магнито-жесткие материалы используются в основном для изготовления *постоянных магнитов*.

Магнитная проницаемость μ ферромагнетиков *не является постоянной величиной*; она сильно зависит от индукции B_0 внешнего поля. Типичная зависимость $\mu(B_0)$ приведена на рис. 7. В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции B магнитного поля в ферромагнетике от индукции B_0 внешнего магнитного поля. Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является *магнитный гистерезис*⁹, то есть *зависимость намагничивания от предыстории образца*.

⁹ **Гистерезис** (от греч. hysteresis — отставание, запаздывание), явление, которое состоит в том, что физическая величина, характеризующая состояние тела (например, намагниченность), неоднозначно зависит от физической величины, характеризующей внешние условия (например, магнитного поля).

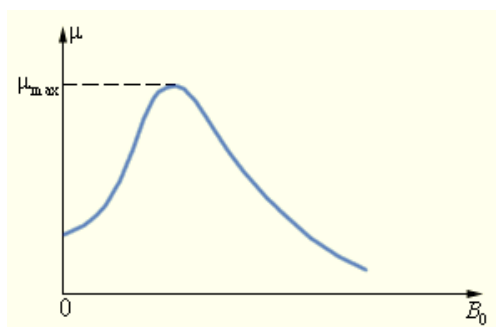


Рис. 7.

Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции внешнего магнитного поля.

Кривая намагничивания $B(B_0)$ ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса* (рис. 8).

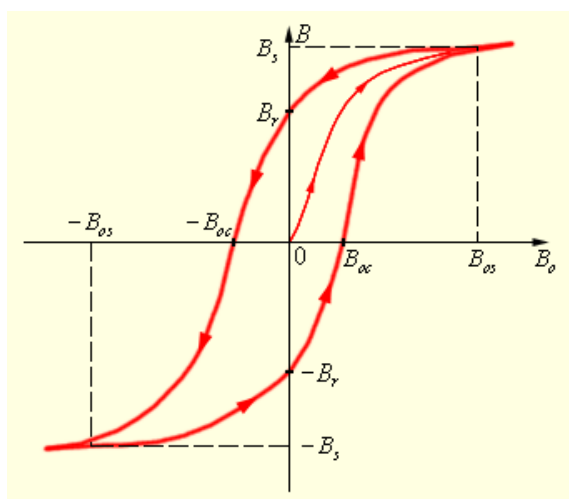


Рис. 8.

Петля гистерезиса ферромагнетика.

Стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении индукции B_0 внешнего магнитного поля.

Из рис. 8 видно, что при $|B_0| > B_{0s}$ наступает магнитное насыщение – намагниченность образца достигает максимального значения.

Если теперь уменьшать магнитную индукцию B_0 внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит *остаточную намагниченность* – поле внутри образца будет равно B_r . Остаточная

намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Для того, чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию B_0 до значения $-B_{0c}$, которое принято называть **коэрцитивной силой** (коэрцитивное поле имеет направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание). Далее процесс перемангничивания может быть продолжен, как это указано стрелками на рис. 8.

Магнитный гистерезис имеет место и для намагниченности (рис.9).

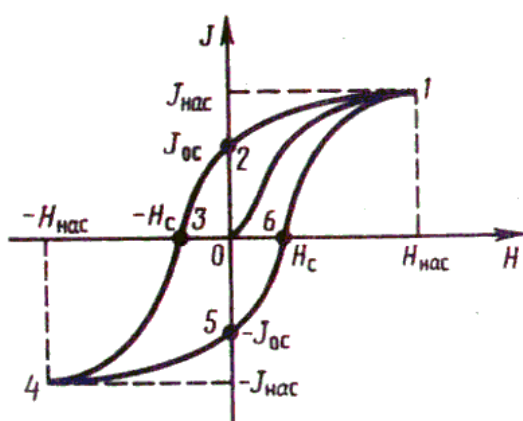


Рис. 9.

Если довести намагниченность до насыщения и затем уменьшать напряженность магнитного поля, то намагниченность изменяется не по первоначальной кривой 0–1, а изменяется в соответствии с кривой 1–2. В результате, когда напряженность внешнего поля станет равной нулю, намагниченность не исчезает, а характеризуется величиной $J_{ос}$, которая называется *остаточной намагниченностью*. Первоначальной намагниченности образец достигает под действием поля H_c , которое называется *коэрцитивной силой*.

У магнито-мягких материалов значения коэрцитивной силы B_{0c} невелико – петля гистерезиса таких

материалов достаточно узкая. Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие широкую петлю гистерезиса, относятся к магнито-жестким.

Природа ферромагнетизма может быть до конца понята только на основе квантовых представлений. Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка $10^{-2} - 10^{-4}$ см. Эти области называются **доменами**. Каждый домен представляет из себя небольшой постоянный магнит.

В отсутствие внешнего магнитного поля, направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы в большом кристалле хаотически. Такой кристалл, в среднем, оказывается ненамагниченным. При наложении внешнего магнитного поля \vec{B}_0 происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. С

увеличением индукции внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение. Рис. 10 может служить качественной иллюстрацией процесса намагничивания ферромагнитного образца.

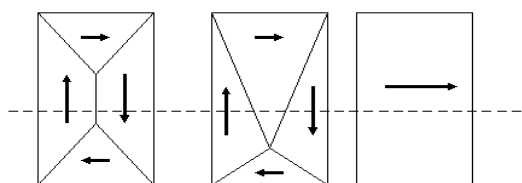


Рис. 10.

Ферромагнетизм (англ. *ferromagnetism*) – магнитоупорядоченное состояние вещества, в котором большинство атомных магнитных моментов параллельны друг другу, так что вещество обладает самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью.

1.6. Устройство и принцип работы электронного осциллографа

Осциллограф – электронный прибор, предназначенный для наблюдения быстропеременных электрических сигналов.

Главным элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка. Промышленность выпускает два рода трубок – трубки с электростатическим, и электромагнитным управлением. В первом случае для отклонения электронного луча используется электрическое, во втором – магнитное поле. В осциллографах обычно используются трубки с электростатическим управлением, а в телевизорах – с электромагнитным отклонением луча.

Трубка состоит из откаченной до глубокого вакуума стеклянной колбы (рис. 11), внутри которой помещается подогреватель 1 - 1, катод – 2, управляющий электрод (модулятор) – 3, первый анод (фокусирующий) – 4, второй анод – 5, горизонтально отклоняющие пластины – 6 и вертикально отклоняющие пластины – 7. Передняя часть колбы – 8 покрыта флуоресцирующим веществом.

Подогреватель, катод, модулятор и оба анода образуют так называемую электронную пушку. Источником электронов служит нагретый катод трубки.

Интенсивность электронного пучка и яркость светящегося пятна регулируется путем изменения отрицательного смещения на управляющем электроде (играющем ту же роль, что и сетка электронной лампы). Ручка переменного резистора регулировки смещения на управляющем электроде выведена на лицевую панель осциллографа. Она имеет надпись «яркость».

Управляющий электрод и система анодов образуют фокусирующую систему. Эта система фокусирует электроны в одной точке на экране 8 (ручка «фокусировка»).

В момент прохождения электронами электрического поля отклоняющих пластин на них действует сила со стороны электрического поля, и каждый электрон начинает двигаться равноускоренно, передвигаясь от одной пластины к другой (в то же самое время электроны продолжают двигаться равномерно вдоль трубки).

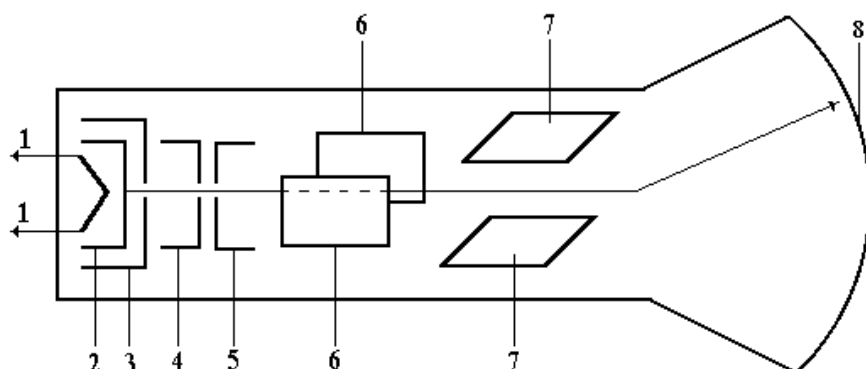


Рис. 11.

Траектория между отклоняющими пластинами представляет параболу. На выходе из пластин траектория оказывается отклоненной от первоначального направления на некоторый угол.

Для изучения повторяющихся процессов на горизонтально отклоняющие пластины подают периодическое напряжение (напряжение развертки), изменяющееся так, что луч смещается слева направо пропорционально времени и, дойдя до правого края экрана, быстро возвращается назад, после чего процесс повторяется. Такое напряжение называется пилообразным.

Для улучшения линейности пилообразное напряжение делают симметричным относительно нуля, так что при выключенной развертке луч находится в центре экрана. Но положение нулевой точки относительно экрана трубки можно менять переменным резистором, ручка регулировки которого выведена на лицевую панель и имеет надпись «ось X», «влево», «вправо».

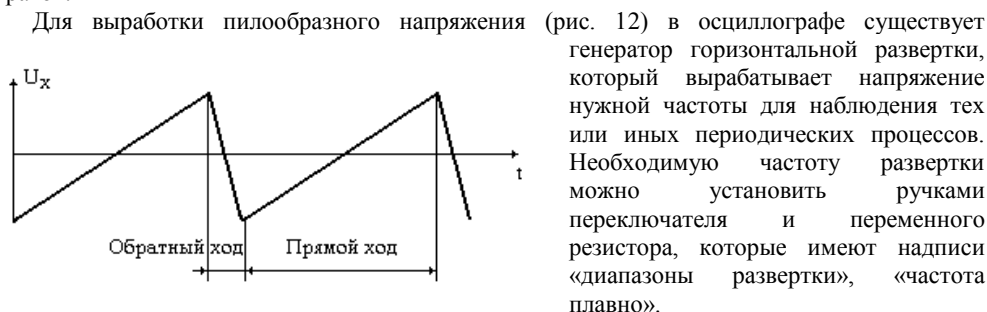


Рис. 12.

Для выработки пилообразного напряжения (рис. 12) в осциллографе существует генератор горизонтальной развертки, который вырабатывает напряжение нужной частоты для наблюдения тех или иных периодических процессов. Необходимую частоту развертки можно установить ручками переключателя и переменного резистора, которые имеют надписи «диапазоны развертки», «частота плавно».

При наблюдении периодических и особенно быстро протекающих процессов важно получить на экране неподвижное изображение. Для этого нужно, чтобы период развертки был кратен периоду изучаемого процесса.

Обычно достаточно точное соотношение периодов соблудности оказывается невозможно из-за нестабильности генератора развертки или самого изучаемого процесса. Для принудительного согласования периодов используют поэтому «синхронизацию», т. е. выбирают схему, при которой изучаемое напряжение «навязывает» свой период генератору развертки.

Изучаемое напряжение подается на вертикально отклоняющие пластины, предварительно усиленное усилителем вертикального усиления.

Размер изображения на экране (размер отклонения луча по вертикали) можно регулировать регулятором усиления на входе усилителя вертикального отклонения. Один из них - ступенчатый имеет надпись «ослабление», другой - плавный имеет надпись

«вертикальное усиление». Положение нулевой точки оси вертикального отклонения имеет регулировку такую же, как и по оси X. Надпись на лицевой панели этой регулировки следующая: «ось Y», «вниз», «вверх».

2. Теория лабораторной работы

Если образец из ферромагнитного вещества поместить во внешнее магнитное поле напряженностью H , то внутри образца магнитная индукция будет равна:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{внутр}} \quad (5)$$

где: $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$, $\vec{B}_{\text{внутр}}$ – индукция магнитного поля, создаваемая намагниченным веществом образца, μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Для ферромагнитных веществ (ферромагнетиков) и малых намагничивающих полей $\vec{B}_{\text{внутр}} \gg \vec{B}_0$. Для малых B_0 формулу (5) можно представить в виде:

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \vec{H} = \mu B_0.$$

Пусть образец перед намагничиванием был полностью размагничен. Поместим его во внешнее поле, которое будем увеличивать от нуля до некоторого значения B_0 . Зависимость B от B_0 выразится кривой oa (см. рис.13). Если теперь уменьшать поле до нуля, то зависимость B от B_0 уже изобразится кривой ac .

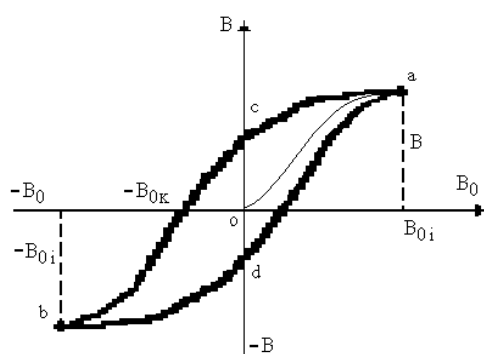


Рис. 13.

При $B_0 = 0$ магнитная индукция образца отличается от нуля: в ферромагнетике наблюдается остаточное намагничивание, численно равное отрезку oc . Чтобы полностью размагнитить образец, следует создать магнитное поле напряженности $B_{0к}$, направленное в противоположную сторону. Величина $B_{0к}$ называется коэрцитивной (задерживающей)

силой. Увеличивая поле B_0 обратного направления до $(-B_{0i})$, получим часть cb кривой намагничивания. Снова уменьшая поле до нуля, получим часть bd . Поменяв направление поля на первоначальное и увеличивая его от нуля до B_{0i} , вернемся в точку a по кривой da . Полученная кривая является петлей гистерезиса.

Ферромагнитные материалы применяются в трансформаторах, дросселях, машинах переменного тока, т. е. в устройствах, где они подвергаются периодическому перемагничиванию. Изучение магнитных характеристик ферромагнетиков в переменных полях представляет, поэтому, большой

практический интерес. Основные характеристики ферромагнетиков – их коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, мощность, рассеиваемая в виде тепла при перемагничивании и т. д. зависят от частоты перемагничивающегося поля. В настоящей работе кривые гистерезиса трансформаторной стали изучаются с помощью электронного осциллографа.

Значение площади петли гистерезиса данного образца пропорционально тепловой энергии, выделяющейся при перемагничивании. Можно дать качественную оценку определенному сорту трансформаторной стали, если сравнивать площади петель гистерезиса образцов.

Обмотка возбуждения трансформатора включается в сеть. Количество витков подобрано так, что в сердечнике наступает магнитное насыщение. На потенциометре R_1 возникает соответственно переменная ЭДС, величина которой пропорциональна напряженности магнитного поля H , намагничивающего сердечник. Эту ЭДС подают на горизонтально отклоняющие пластины X осциллографа (предварительно усилив усилителем горизонтального отклонения).

На вертикальные пластины осциллографа Y подается напряжение, возникающее на вторичной обмотке. Это напряжение, однако, пропорционально не магнитной индукции B , а скорости изменения магнитной индукции (dB/dt). Между вторичной обмоткой и осциллографом, поэтому, включается интегрирующее звено. Интегрирование напряжения проще всего осуществить при помощи RC –ячейки, удовлетворяющей условию $RC \gg T$, где T – период изучаемого явления. При большом сопротивлении R_2 падение напряжения на конденсаторе мало по сравнению с падением напряжения на резисторе, так что ток через ячейку равен: $I_2 \approx \frac{U_2}{R_2}$, где U_2 – напряжение на выходе вторичной обмотки. Напряжение на конденсаторе, которое подается на вход осциллографа, равно:

$$U_C = \frac{\int I_2 dt}{C} = \frac{1}{R_2 C} \int U_2 dt. \quad (6)$$

Из этого уравнения видно, что ячейка не только интегрирует напряжение, но и ослабляет его.

В данной схеме напряжение $U_C(t)$ на конденсаторе C пропорционально не току $I_2(t)$, а интегралу от тока. Подобное соединение конденсатора C и резистора R_2 называется *интегрирующей цепочкой*.

Таким образом, на экране осциллографа получается петля гистерезиса $B = f(B_0)$. За один период синусоидального изменения тока электронный луч опишет на экране полную петлю гистерезиса. На переменном токе промышленной частоты на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса. Изменяя потенциометром R напряжение $U_R \approx B_0$, на экране получаем ряд различных по площади петель, вершины которых находятся на кривой

намагничивания. Для построения кривых намагничивания необходимо снять координаты вершин петель гистерезиса; (точки *a* и *b*). После этого следует определить величины U_X и U_Y с учётом чувствительности пластин осциллографа h_x и h_y :

$$U_X = \frac{l_x}{h_x}, \quad U_Y = \frac{l_y}{h_y}, \quad (7)$$

где l_x и l_y – координаты вершин петель гистерезиса.

Вычислить значения: B_0 и B по формулам:

$$B_0 = \frac{\mu_0 n_1}{R_1} U_X, \quad B = \frac{R_2 C}{S N_2} U_Y, \quad (8)$$

где n_1 – число витков на единицу длины.

По вычисленным значениям B и B_0 строится кривая намагничивания (рис.14).

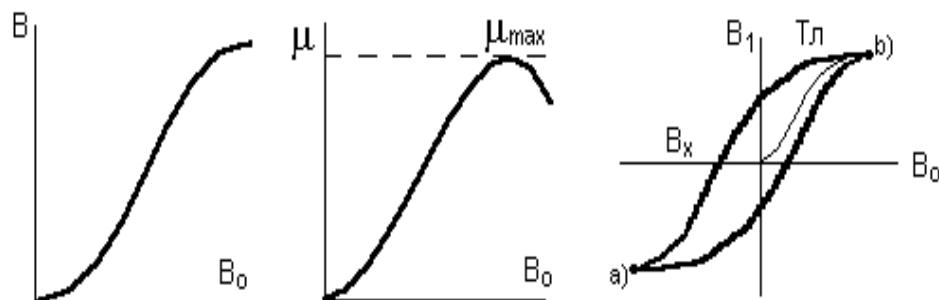


Рис. 14

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Проанализировать схему (рис. 15) и ознакомиться с порядком подготовки осциллографа к работе.

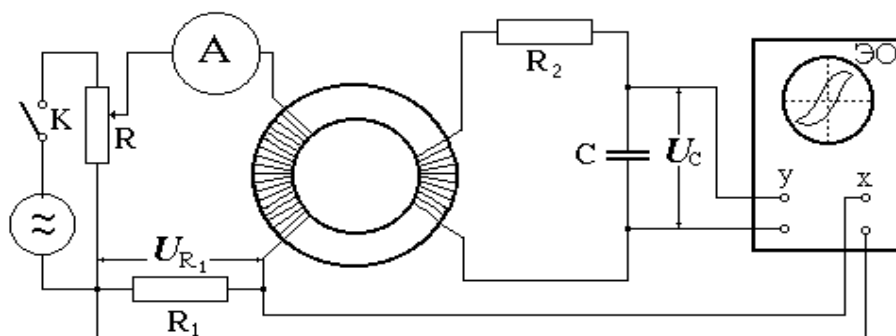


Рис. 15

- Включить осциллограф. Установить напряжение $U = 220$ В, а силу тока $I = 40$ мА (по нижней шкале миллиамперметра).
- Записать значения чувствительности h_x и h_y для данного усиления, указанные примечания к работе.
- Изменяя величину сопротивления R , уменьшать силу тока с шагом $\Delta I = 4$ мА; получить семейство петель гистерезиса в зависимости от тока I .
- Снять значения координат точек насыщения петель l_x и l_y в зависимости от тока I , результаты занести в таблицу.

Таблица

Номер измерения	I , А	l_x , мм	U_x , В	B_0 , Тл	l_y , мм	U_y , В	B , Тл	$B_{01} = n_1 I_1$, Тл	$\mu = B/B_0$
1									
2									
3									
4									
5									

- По данным, приведенным в работе, и полученным значениям l_x и l_y рассчитать значения напряжений U_x , U_y и B_0 , В (соотношения 7, 8) при различных значениях тока I .
- Построить кривую намагничивания материала $B(B_0)$.
- Обесточить установку.
- Проанализировать результаты, сделать вывод.

Примечание:

1). $R_1 = 200$ Ом; $R_2 = 10^5$ Ом; $n_1 = 5 \times 10^3$ 1/м; $N_2 = 600$ витков;

$C = 1$ мкФ; $S = 3 \times 10^{-4}$ м² $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

2). Чувствительность $h_x = 5$ мм/В; $h_y = 10$ мм/В; при

$I = \text{max}$. (50 мА – по верхней шкале), в координатах точек:

а) $X = -4$, $Y = -4$; б) $X = +4$, $Y = +4$ (см. рис 9).

Материал сердечника – сталь электротехническая $\mu_{\text{max}} = 15000$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Согласно обозначениям на шкалах электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, указать назначение прибора, тип тока,

безопасность, класс точности, систему измерительного механизма, рабочее положение при эксплуатации.

2. По классу точности электроизмерительных приборов, используемых в данной работе, вычислить их абсолютную (инструментальную) погрешность и указать к какой группе приборов (прецизионным, техническим или внеклассовым) они относятся.
3. Какие вещества называются магнетиками?
4. В чем заключается причина намагничивания веществ по гипотезе Ампера?
5. Чему равно результирующее магнитное поле магнетика (в соответствии с принципом суперпозиции магнитных полей)?
6. Перечислите существующие виды магнетиков?
7. Какие вещества называются ферромагнетиками?
8. Что называется явлением гистерезиса?
9. Что называется магнитным гистерезисом?
10. Назовите характерные точки петли магнитного гистерезиса.
11. Что называется коэрцитивной силой?
12. Какие вещества называются мягкими магнитными материалами? твёрдыми магнитными материалами?
13. Что называется доменами?
14. В чём особенность кривой намагничивания ферромагнетика?
15. Кратко опишите схему и принцип работы установки для снятия кривой намагничивания и петли гистерезиса.

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: изучение температурной кривой вблизи точки Кюри для характеристики магнитных свойств ферромагнетиков.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Трансформатор с ферромагнитным сердечником	-	-	-	-
2	Нагреватель	-	-	-	-
3	Датчик температуры (термопара с милливольтметром)	-			
4	Микроамперметр				

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. Понятие о магнитном поле и его некоторые характеристики

Магнитное поле – одна из форм электромагнитного поля, релятивистский эффект электрического поля.

Магнитное поле создаётся (порождается) током заряженных частиц, или изменяющимся во времени электрическим полем (током смещения), или собственными магнитными моментами частиц.

Магнитное поле действует только на движущиеся заряды. Оно обладает энергией, которая проявляет себя в виде электромагнитных сил, действующих на отдельные движущиеся электрические заряды (электроны и ионы) и на их потоки, т. е. электрический ток. Под влиянием электромагнитных сил движущиеся заряженные частицы отклоняются от своего первоначального пути.

Основными характеристиками магнитного поля являются *магнитная индукция, напряжённость и магнитный момент.*

Индукция, напряжённость магнитного поля, магнитная проницаемость

Механическое действие, которое магнитное поле оказывает на другие тела, можно характеризовать вектором силы, а само поле – векторной физической величиной, называемой *магнитной индукцией*, которая позволяет определить эту силу. Магнитная индукция обозначается буквой \vec{B} , измеряется в теслах (Тл).

Индукция магнитного поля – векторная физическая величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям.

Магнитная индукция \vec{B} является основной силовой характеристикой магнитного поля. Индукция магнитного поля может быть определена в любой точке пространства и в любой момент времени:

$$\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t).$$

Направление вектора магнитной индукции задается направлением магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Оно совпадает с направлением, которое указывает северный полюс стрелки (рис. 1).



Рис. 1.

Магнитное поле в макроскопическом описании представлено двумя различными векторными полями, обозначаемыми, как \vec{H} и \vec{B} , где \vec{H} – напряженность, \vec{B} – индукция магнитного поля.

Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности следующим выражением:

$$\vec{H} = \vec{B}/(\mu_0\mu), \text{ А/м,}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнитная постоянная, μ – безразмерная величина – *магнитная проницаемость среды*, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в среде \vec{B} больше индукции \vec{B}_0 в вакууме (в вакууме $\mu = 1$):

$$\mu = \vec{B}/\vec{B}_0$$

Магнитная проницаемость зависит от свойств среды, в которой создается магнитное поле¹⁰.

Напряженность \vec{H} не зависит от магнитных свойств среды, но учитывает влияние силы тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля в данной точке пространства. Однако, вектор \vec{H} является важной, но вспомогательной характеристикой магнитного поля. Основной характеристикой магнитного поля всё же является вектор \vec{B} .

Магнитный момент контура с током

Подобно тому, как для исследования электрического поля мы использовали пробный заряд, применим для исследования магнитного поля пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре очень малых размеров. Будем называть такой контур *пробным контуром* (рис. 2).

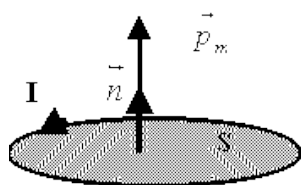


Рис. 2.

Ориентацию его в пространстве характеризует направление нормали \vec{n} к контуру, восстанавливаемой по правилу правого буравчика: вращаем рукоятку правого буравчика по направлению тока в контуре, тогда направление его поступательного движения даст направление нормали \vec{n} (рис. 2).

$$\text{Векторную величину} \quad \vec{p}_m = IS\vec{n}$$

¹⁰ В общем случае магнитная проницаемость конкретного вещества зависит от многих факторов: напряженности магнитного поля, формы рассматриваемого поля (так как конечные размеры любого магнетика приводят к появлению встречного поля, уменьшающего первоначальное), температуры, частоты изменения магнитного поля, наличия дефектов структуры и т.д.

называют магнитным моментом контура, который в СИ измеряется в $A \cdot m^2$, где I - ток контуре, S - площадь контура с током.

1.2. Магнитное поле в веществе. Магнетики

Все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами.

Магнетик – МАГНЕТИК термин, применяемый ко всем веществам при рассмотрении их магнитных свойств.

Магнитное поле в веществе является суперпозицией двух полей: внешнего магнитного поля, создаваемого макротоками¹¹ и внутреннего, или собственного, магнитного поля, создаваемого микротоками¹².

Намагниченное вещество создает магнитное поле \vec{B}' , которое накладывается на внешнее поле \vec{B}_0 (поле в вакууме). Оба поля в сумме дают результирующее магнитное поле с индукцией

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

причем под здесь \vec{B} и далее подразумевается макроскопическое (усредненное по физически бесконечно малому объему вещества) поле.

Разнообразие типов магнетиков обусловлено различием магнитных свойств микрочастиц, образующих вещество, а также характера взаимодействия между ними.

Для объяснения способности тел к намагничиванию, Ампер предположил, что в молекулах вещества циркулируют круговые токи (получившие впоследствии название *молекулярных токов Ампера*). Каждый такой ток обладает *собственным* магнитным моментом \vec{p}_m и создает в окружающем пространстве магнитное поле. В отсутствие внешнего магнитного поля токи Ампера ориентированы *беспорядочным* образом, вследствие чего обусловленное

ими магнитное поле равно нулю.

Суммарный магнитный момент тела также равен нулю (рис.3).

Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты молекул приобретают *преимущественную ориентацию* в одном направлении, вследствие

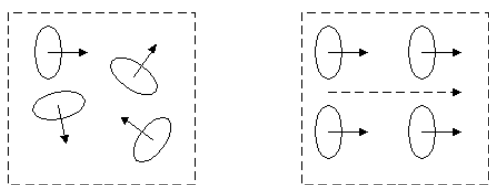


Рис.3.

чего магнетик намагничивается, а его суммарный магнитный момент становится отличным от нуля (см. рис.3).

¹¹ *Макротоками* называются токи проводимости и конвекционные токи, связанные с движением заряженных макроскопических тел.

¹² *Микротоками* (молекулярными токами) называют токи, обусловленные движением электронов в атомах, молекулах и ионах.

Магнитные свойства веществ определяются магнитными свойствами атомов или элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав атомов. В настоящее время установлено, что магнитные свойства протонов и нейтронов почти в 1000 раз слабее магнитных свойств электронов. Поэтому магнитные свойства веществ в основном определяются электронами, входящими в состав атомов.

Одним из важнейших свойств электрона является наличие у него не только электрического, но и собственного магнитного поля. Собственное магнитное поле электрона называют *спиновым* (spin – вращение). Электрон создает магнитное поле также и за счет орбитального движения вокруг ядра, которое можно уподобить круговому микротoku. Спиновые поля электронов и магнитные поля, обусловленные их орбитальными движениями, и определяют широкий спектр магнитных свойств веществ.

Все вещества (и вообще среды) в отношении их магнитных свойств делятся на следующие основные группы:

- *Диамагнетики* – вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля ($\vec{B} < \vec{B}_0; \mu < 1$).

Молекулы диамагнетика собственного магнитного момента не имеют. Он возникает у них только под действием внешнего магнитного поля и направлен против него. Таким образом, результирующее магнитное поле в диамагнетике меньше, чем внешнее поле, правда, на очень малую величину. Это приводит к тому, что при перемещении диамагнетика в неоднородное магнитное поле он стремится сместиться в ту область, где напряженность магнитного поля меньше.

- *Парамагнетики* – вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля ($\vec{B} > \vec{B}_0; \mu > 1$).

Молекулы (или атомы) парамагнетика имеют собственные магнитные моменты, которые под действием внешних полей ориентируются по полю и тем самым создают результирующее поле, превышающее внешнее. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле. Так, например, жидкий кислород – парамагнетик, он притягивается к магниту.

- *Ферромагнетики* – вещества, в которых ниже определённой критической температуры (точки Кюри) устанавливается дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов ($\vec{B} \gg \vec{B}_0; \mu \gg 1$).

К перечисленным выше группам веществ в основном относятся обычные твердые или (к некоторым) жидкие вещества, а также газы. Существенно отличается взаимодействие с магнитным полем сверхпроводников и плазмы.

Различают так же:

- *Ферримагнетики* – материалы, у которых магнитные моменты вещества направлены противоположно и не равны по силе.
- *Антиферромагнетики* – вещества, в которых установился антиферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов: магнитные моменты веществ направлены противоположно и равны по силе.

1.3. Магнитный момент атома

Атомы всех веществ состоят из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Движение электронов в атомах подчиняется квантовым законам. Магнетизм вещества удается объяснить посредством модели Бора, согласно которой электроны в атомах движутся по стационарным круговым орбитам. Электрон, движущийся по

одной из таких орбит, эквивалентен круговому току, поэтому он обладает орбитальным магнитным моментом: $\vec{p}_m = IS\vec{n}$, модуль которого равен:

$$p_m = IS = evS, \quad (1)$$

где $I = ev$ – сила кругового тока, вызванного движением электрона по орбите вокруг ядра атома; v – частота вращения электрона по орбите; S – площадь орбиты. Если электрон движется по часовой стрелке (рис. 4), то ток направлен против часовой стрелки и вектор \vec{p}_m (в соответствии с правилом правого винта)

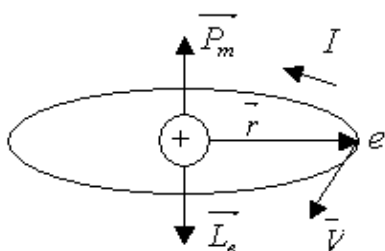


Рис. 4.

Орбитальный магнитный момент \vec{p}_m и механический момент \vec{L}_l электрона.

направлен перпендикулярно плоскости орбиты электрона. С другой стороны, движущийся по орбите электрон обладает механическим моментом импульса \vec{L}_l , модуль которого:

$$L_l = mvv = 2mvS, \quad (2)$$

где $v = 2\pi vr$ – скорость движения электрона по орбите, $\pi r^2 = S$ – площадь орбиты.

Вектор \vec{L}_l (его направление также определяется по правилу

правого винта) называется орбитальным механическим моментом электрона. Из рис. 4 следует, что направление \vec{p}_m и \vec{L}_l противоположны, поэтому, учитывая выражение (1) и (2), получим:

$$\vec{p}_m = -\frac{e}{2m} \cdot \vec{L}, \quad (3)$$

где величина:

$$g = -\frac{e}{2m} \quad (4)$$

называется *гиромангнитным отношением орбитальных моментов* (общепринято писать со знаком $< - >$, указывающим на то, что направления моментов противоположны). Это отношение, определяемое универсальными постоянными, одинаково для любой орбиты, хотя для разных орбит значения v и r различны. Формула (4) выведена для круговой орбиты, но она справедлива и для эллиптических орбит.

Позже, в опытах Эйнштейна и де Гааза, выяснилось, что наряду с орбитальными моментами, электрон обладает также *собственным механическим моментом (спином) \vec{L}_S* (т.е. подобен волчку) и *собственным магнитным моментом $\vec{\mu}_S$* , для которых гиромангнитное отношение оказалось в два раза большим:

$$g = -\frac{e}{m}; \quad \vec{\mu}_S = -\frac{e}{m} \vec{L}_S$$

Магнитный момент атома складывается из орбитальных и собственных магнитных моментов входящих в его состав электронов, а также магнитного момента ядра атома. Магнитный момент ядра, обусловленный магнитными моментами входящих в состав ядра протонов и нейтронов, значительно меньше электронных магнитных моментов, поэтому при

рассмотрении многих вопросов *им можно пренебречь*. Таким образом, *полный магнитный момент атома* равен *векторной сумме магнитных моментов всех его электронов*. *Магнитный момент молекулы* также можно считать равным *сумме магнитных моментов входящих в ее состав электронов*.

1.4. Намагниченность

Различные вещества в той или иной степени способны к **намагничиванию**: то есть под действием магнитного поля, в которое их помещают, приобретать магнитный момент. Одни вещества намагничиваются *сильнее*, другие *слабее*.

Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит векторная величина – **намагниченность (вектор намагничивания)** \vec{J} .

Намагниченность – векторная физическая величина, характеризующая магнитное состояние макроскопического физического тела; определяется как магнитный момент единицы объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{m_i}, \text{ А/м}$$

где \vec{p}_{m_i} – магнитный момент i – го атома из числа n атомов, в объеме ΔV .

1.5. Диамагнетизм и парамагнетизм

Пара- и диамагнетизм объясняется поведением электронных орбит во внешнем магнитном поле. У атомов диамагнитных веществ в отсутствие внешнего поля собственные магнитные поля электронов и поля, создаваемые их орбитальным движением, полностью скомпенсированы. Возникновение диамагнетизма связано с действием силы Лоренца на электронные орбиты. Под действием этой силы изменяется характер орбитального движения электронов и нарушается компенсация магнитных полей. Возникающее при этом собственное магнитное поле атома оказывается направленным *против* направления индукции внешнего поля.

В атомах парамагнитных веществ магнитные поля электронов скомпенсированы не полностью, и атом оказывается подобным маленькому круговому току. В отсутствие внешнего поля эти круговые микротоки ориентированы произвольно, так что суммарная магнитная индукция равна нулю. Внешнее магнитное поле оказывает ориентирующее действие – микротоки стремятся сориентироваться так, чтобы их собственные магнитные поля оказались направленными по направлению индукции внешнего поля. Из-за теплового движения атомов ориентация микротоков никогда не бывает полной. При усилении внешнего поля ориентационный эффект возрастает, так что индукция собственного магнитного поля парамагнитного образца растет прямо пропорционально индукции внешнего магнитного поля. Полная индукция магнитного поля в образце складывается из индукции внешнего магнитного поля и индукции собственного магнитного поля, возникшего в процессе

намагничивания. Механизм намагничивания парамагнетиков очень похож на механизм поляризации полярных диэлектриков. Диамагнетизм не имеет аналога среди электрических свойств вещества.

Следует отметить, что диамагнитными свойствами обладают атомы любых веществ. Однако во многих случаях диамагнетизм атомов маскируется более сильным парамагнитным эффектом. Явление диамагнетизма было открыто М. Фарадеем в 1845 г.

1.6. Ферромагнетизм

Ферромагнетиками называются твердые тела, которые могут обладать спонтанной намагниченностью, т. е. намагничены уже в отсутствие магнитного поля.

Магнитная проницаемость ферромагнетиков по порядку величины лежит в пределах 10^2 – 10^5 . Например, у стали $\mu \approx 8000$, у сплава железа с никелем магнитная проницаемость достигает значений 250000.

К рассматриваемой группе относятся четыре химических элемента: железо, никель, кобальт, гадолиний. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Поэтому вся эта группа получила название ферромагнетиков.

Ферромагнетиками могут быть различные сплавы, содержащие ферромагнитные элементы. Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы – ферриты.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая *температура или точка Кюри*), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. У железа, например, температура Кюри равна 770°C , у кобальта 1130°C , у никеля 360°C .

Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы – на *магнито-мягкие* и *магнито-жесткие* материалы. Магнито-мягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю. К магнито-мягким материалам относится, например, чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы. Эти материалы применяются в приборах переменного тока, в которых происходит непрерывное перемагничивание, то есть изменение направления магнитного поля (трансформаторы, электродвигатели и т. п.).

Магнито-жесткие материалы в значительной мере сохраняют свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля. Примерами магнито-жестких материалов могут служить углеродистая сталь и ряд специальных сплавов. Магнито-жесткие материалы используются в основном для изготовления *постоянных магнитов*.

Магнитная проницаемость μ ферромагнетиков *не является постоянной величиной*; она сильно зависит от индукции B_0 внешнего поля. Типичная зависимость $\mu(B_0)$ приведена на рис. 5. В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

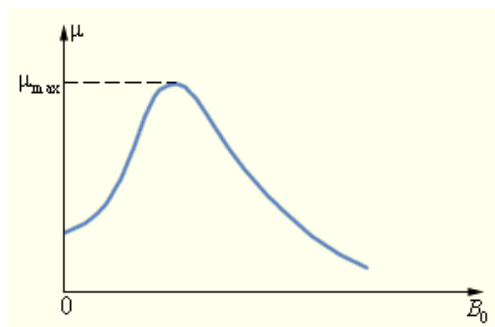


Рис. 5.

Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции внешнего магнитного поля.

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции B магнитного поля в ферромагнетике от индукции B_0 внешнего магнитного поля.

Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является **магнитный гистерезис**¹³, то есть зависимость намагничивания от предыстории образца.

Кривая намагничивания $B(B_0)$ ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется **петлей гистерезиса** (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что при $|B_0| > B_{0s}$ наступает магнитное насыщение — намагниченность образца достигает максимального значения. Если теперь уменьшать магнитную индукцию B_0 внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит *остаточную намагниченность* — поле внутри образца будет равно B_r . Остаточная намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Для того, чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию B_0 до значения $-B_{0c}$, которое принято называть **коэрцитивной силой** (коэрцитивное поле имеет направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание). Далее процесс перемангничивания может быть продолжен, как это указано стрелками на рис. 6.

¹³ **Гистерезис** (от греч. hysteresis — отставание, запаздывание), явление, которое состоит в том, что физическая величина, характеризующая состояние тела (например, намагниченность), неоднозначно зависит от физической величины, характеризующей внешние условия (например, магнитного поля).

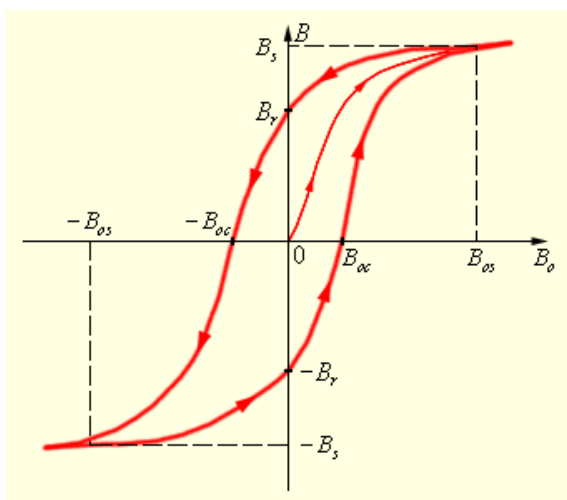


Рис. 6.

Петля гистерезиса ферромагнетика.

Стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении индукции B_0 внешнего магнитного поля.

Магнитный гистерезис имеет место и для намагниченности (рис.7).

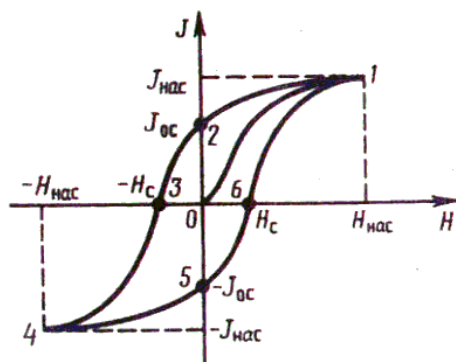


Рис. 7.

Если довести намагниченность до насыщения и затем уменьшать напряженность магнитного поля, то намагниченность изменяется не по первоначальной кривой 0–1, а изменяется в соответствии с кривой 1–2. В результате, когда напряженность внешнего поля станет равной нулю, намагниченность не исчезает, а характеризуется величиной $J_{ос}$, которая называется *остаточной намагниченностью*. Первоначальной намагниченности образец достигает под действием поля H_c , которое называется *коэрцитивной силой*.

У магнито-мягких материалов значения коэрцитивной силы $B_{ос}$ невелико – петля гистерезиса таких материалов достаточно узкая. Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие широкую петлю гистерезиса, относятся к магнито-жестким.

Природа ферромагнетизма может быть до конца понята только на основе квантовых представлений. Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов,

энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка $10^{-2} - 10^{-4}$ см. Эти области называются **доменами**. Каждый домен представляет из себя небольшой постоянный магнит.

В отсутствие внешнего магнитного поля, направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы в большом кристалле хаотически. Такой кристалл, в среднем, оказывается ненамагниченным. При наложении внешнего магнитного поля \vec{B}_0 происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. С увеличением индукции внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение. Рис. 8 может служить качественной иллюстрацией процесса намагничивания ферромагнитного образца.

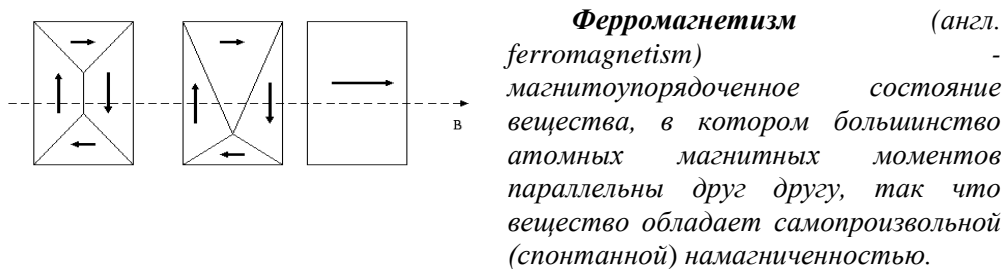


Рис. 8.

1.7. Магнитная восприимчивость

Вектор намагничивания \vec{J} принято связывать не с магнитной индукцией \vec{B} , а с напряженностью магнитного поля \vec{H} и, как показывает опыт, для диа- и парамагнетиков, вектор \vec{J} связан с вектором \vec{H} соотношением:

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H},$$

где χ – характерная для данного магнетика величина, называемая **магнитной восприимчивостью**.

Поскольку \vec{J} имеет ту же размерность, что и \vec{H} , [А/м], то χ – безразмерная величина. На основании двух последних формул имеем:

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu_0 \cdot \mu\vec{H},$$

где $\mu = 1 + \chi$.

В то время как **диэлектрическая проницаемость** ϵ у всех веществ всегда больше единицы (диэлектрическая восприимчивость $\chi_e > 0$), **магнитная проницаемость** μ может быть как больше единицы, так и меньше единицы

(соответственно магнитная восприимчивость $\chi > 0$ – у парамагнетиков и $\chi < 0$ – у диамагнетиков; у ферромагнетиков – $\chi \gg 0$).

1.8. Точка Кюри

Точка Кюри, или температура Кюри (T_c), – температура фазового перехода II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества (например, магнитной – в ферромагнетиках, электрической – в сегнетоэлектриках, кристаллохимической – в упорядоченных сплавах). Названа по имени П. Кюри.

В более узком смысле: *точка Кюри* – температура, выше которой исчезает самопроизвольная намагниченность доменов ферромагнетиков и ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

При температуре T ниже точки Кюри T_c ферромагнетики обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью и определённой магнитно-кристаллической симметрией. В точке Кюри ($T = T_c$) интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения доменов т.е. его самопроизвольной намагниченности (тепловое движение атомов «расшатывает» существующий магнитный порядок – одинаковую ориентацию магнитных моментов атомов) и в результате ферромагнетик становится парамагнетиком.

Аналогично у антиферромагнетиков при $T = T_c$ (в так называемой *антиферромагнитной точке Кюри* или *точке Нееля*) происходит разрушение характерной для них магнитной структуры (магнитных подрешёток), и антиферромагнетики становятся парамагнетиками.

Численные значения температуры Кюри приводятся в специальных справочниках.

При охлаждении ферромагнетика ниже температуры Кюри ($T < T_c$) его ферромагнитные свойства восстанавливаются.

Закон Кюри – Вейса

Закон Кюри – Вейса описывает магнитную восприимчивость ферромагнетика в области температур выше точки Кюри (то есть в парамагнитной области). Закон выражается следующей математической формулой:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c},$$

где χ – магнитная восприимчивость,
 C – постоянная Кюри, зависящая от вещества,
 T – абсолютная температура в кельвинах,
 T_c – температура Кюри, К.

При $T = T_C$ магнитная восприимчивость стремится к бесконечности. При снижении температуры до точки Кюри и ниже возникает спонтанная намагниченность вещества.

2. Теория лабораторной работы

Для определения точки Кюри применяется установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 9.

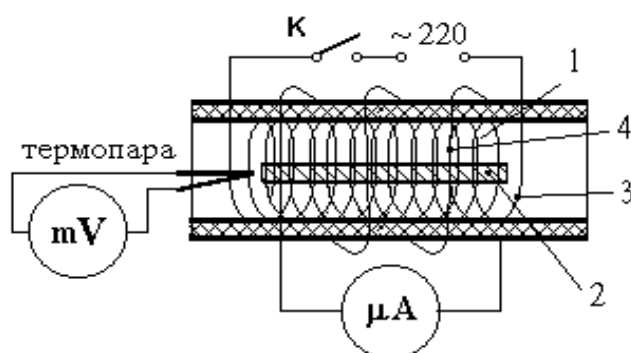


Рис. 9.

В печь (1) помещается исследуемый образец (2), который нагревается спиралью (3). При протекании переменного тока через спираль индуцируется ток во вторичной обмотке (4). Этот ток регистрируется микроамперметром. Первичная обмотка отделена от вторичной слоем теплоизолирующего материала. Температура образца измеряется термопарой.

При достижении температуры Кюри магнитные свойства вещества меняются, вследствие чего ЭДС индукции во второй обмотке резко падает, что отмечается микроамперметром.

Нагревательная спираль 1 обладает как индуктивным, так и омическим сопротивлением. Поэтому принципиальную схему прибора можно представить, как это показано на рис. 10. Коэффициент самоиндукции первичной обмотки зависит от ее параметров и материала сердечника.

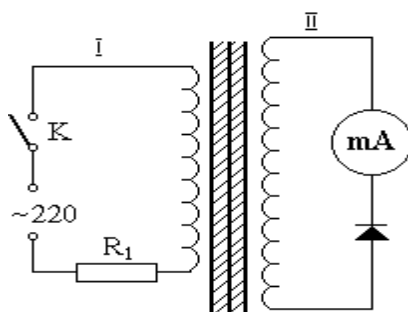


Рис. 10.

Напряжение на первичной обмотке равно:

$$U_1 = U_{R_1} - \varepsilon_{\text{инд}}^{(1)}, \quad (1)$$

где $U_{R_1} = I_1 R_1$, – падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки; $\varepsilon_{\text{инд}}^{(1)}$ – падение напряжения на чисто индуктивном сопротивлении, численно равное ЭДС индукции, возникающей в первичной цепи.

Из уравнения (1):

$$\varepsilon_{\text{инд}}^{(1)} = -U_1 + I_1 R_1. \quad (2)$$

$\varepsilon_{\text{инд}}$ возникает за счет изменения магнитного потока через витки обмотки. Если Φ – магнитный поток, проходящий через все N_1 витков первичной обмотки, то имеем $\varepsilon_{\text{инд}}^{(1)} = -N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}$, где Φ_1 – поток магнитной индукции через один виток, N_1 – число витков первичной обмотки, Φ – магнитный поток через N_1 витков.

$$\text{ЭДС во вторичной обмотке равна: } \varepsilon_{\text{инд}}^{(2)} = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (3)$$

С учетом (2) уравнение (3) можно записать:

$$\varepsilon_{\text{инд}}^{(2)} = \frac{N_2}{N_1} (I_1 R_1 - U_1) \quad (4)$$

Из данной формулы следует, что при $U_1 = I_1 R_1$ ЭДС индукции во вторичной обмотке равна 0. Равенство $U_1 = I_1 R_1$ выполняется лишь в том случае, когда индуктивное сопротивление в цепи первичной катушки равно 0. Если температура образца достигает точки Кюри, то коэффициент самоиндукции, а, следовательно, и индуктивное сопротивление первичной обмотки резко падает и практически становится равным 0. Поэтому можно считать $\varepsilon_{\text{инд}}^{(2)} \cong 0$, и ток во вторичной обмотке очень мал. На этом основано определение точки Кюри ферромагнетиков.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. В работе используется установка, изображенная на (рис. 11).

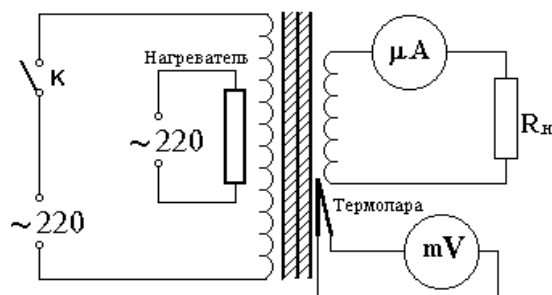


Рис. 11.

2. Включают ток, секундомер и через каждую минуту снимают показания по шкале микроамперметра, включенного во вторичную обмотку, и милливольтметра, отградуированного по шкале температур $^{\circ}\text{C}$.

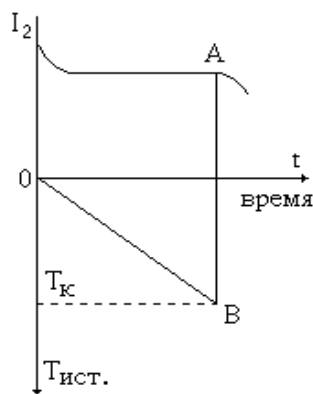


Рис. 12.

3. Данные заносятся в таблицу. По полученным данным строят графики, как показано на рис. 12.

4. По оси X откладывают показания секундомера. По оси Y в положительном направлении откладывают показания микроамперметра. По оси Y в отрицательном направлении откладывают температуру. Для определения температуры Кюри из точки перегиба (т. А) проводят пунктирную прямую до пересечения с градуировочным графиком термометра (т. В). Ордината точки даст значение температуры Кюри. В данной работе величина $\mu(T) = nI_2(T)$, $n \approx 1$.

Таблица

$t, ^{\circ}\text{C}$									
$I_2, \text{мкА}$									

5. Проанализировать результаты, сделать вывод.

Окончательный результат: $T_k = \underline{\hspace{2cm}}$

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются магнетиками?
2. В чём заключается причина намагничивания веществ по гипотезе Ампера?
3. Чему равно результирующее магнитное поле магнетика (в соответствии с принципом суперпозиции магнитных полей)?
4. Перечислите существующие виды магнетиков?
5. Какие вещества называются ферромагнетиками?
6. Напишите формулу связи относительной магнитной проницаемости среды с магнитной восприимчивостью.
7. Укажите значения, которые могут принимать относительная магнитная проницаемость среды и магнитная восприимчивость у диамагнетиков, парамагнетиков и ферромагнетиков.
8. Что называется намагниченностью магнетика? Единица измерения намагниченности?

9. Что называется точкой Кюри? К какому типу фазовых переходов (I или II рода) относится рассматриваемый переход? Какие изменения происходят в магнетике при таком фазовом переходе?
10. Объясните закон Кюри-Вейца.
11. Дайте краткое объяснение устройства и принципа действия используемой в работе установки. Объясните почему при достижении температуры Кюри сила тока во вторичной обмотке резко уменьшается.

Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу физики.- М.: Высш. школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Механика. М.: Наука, 1979.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики.- М.: Наука, 1971
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

СЛОЖЕНИЕ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ. ФИГУРЫ ЛИССАЖУ

Выполнил студент -----, группа -----, дата -----.

Допуск _____

Выполнение _____

Зачет _____

Цель работы: изучить правила сложения взаимно-перпендикулярных колебаний и условия возникновения фигур Лиссажу на экране осциллографа. Определить частоту колебания неизвестной частоты.

Приборы и материалы

№ п\п	Наименование прибора	Класс точности (E_n)	Цена деления	Предел измерения (x_{max})	Точность отсчета ($\Delta x_{пр}$)
1	Осциллограф	–	–	–	–
2	Генератор неизвестной частоты	–	–	–	–
3	Генератор известной частоты	–	–	–	–

1. Теоретические сведения

Основные понятия и законы

1.1. Понятие о колебаниях

Колебаниями называются процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости (качание маятника часов, колебания струны или ножек камертона, напряжение между обкладками конденсатора в контуре радиоприемника, работа сердца).

Система, совершающая колебания, называется *осциллятором*.

Все колебательные процессы – по характеру взаимодействия с окружающей средой подразделяются:

- *Свободные (или собственные)* – это колебания в системе под действием внутренних сил, после того как система выведена из состояния равновесия. Простейшими примерами свободных колебаний являются

колебания груза, прикрепленного к пружине, или груза, подвешенного на нити.

- *Вынужденные* – колебания, протекающие в системе под влиянием внешнего периодического воздействия. Примеры: листья на деревьях, поднятие и опускание руки. При вынужденных колебаниях может возникнуть явление резонанса: резкое возрастание амплитуды колебаний при совпадении собственной частоты осциллятора и частоты внешнего воздействия.
- *Автоколебания* – колебания, при которых система имеет запас потенциальной энергии, расходуемой на совершение колебаний (пример такой системы – механические часы). Характерным отличием автоколебаний от свободных колебаний является, то, что их амплитуда определяется свойствами самой системы, а не начальными условиями.
- *Параметрические* – колебания, возникающие при изменении какого-либо параметра колебательной системы в результате внешнего воздействия.
- *Затухающие колебания* – постепенное ослабление колебаний с течением времени, обусловленное потерей энергии колебательной системой. Затухание свободных механических колебаний вызывается главным образом трением и возбуждением в окружающей среде упругих волн.

Будем рассматривать *незатухающие свободные колебания* – идеальный случай, т.к. свободные колебания реальных систем всегда затухающие.

Общими характеристиками колебаний являются:

- *Смещение* x – отклонение тела от положения равновесия, (м).
- *Амплитуда* A (м) – максимальное отклонение тела от положения равновесия.
- *Период* T (с) – наименьший промежуток времени, за который тело совершает одно полное колебание¹⁴: $T = t/N$, где t – время, за которое совершается N колебаний.
- *Частота* f или ν (Гц, с⁻¹) – число колебаний в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t} = 1/T.$$

В круговых или циклических процессах вместо характеристики «частота» используется понятие *круговая (циклическая) частота* ω (рад/с) показывающая число колебаний за 2π единиц времени:

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$$

¹⁴ За одно полное колебание тело проходит расстояние $S = 4A$.

Фаза колебаний $\varphi = (\omega t + \varphi_0)$ – определяет смещение тела в любой момент времени, то есть определяет состояние колебательной системы, где φ_0 – начальная фаза (в момент времени $t = 0$).

Простейшим видом колебательного процесса являются простые **гармонические колебания**.

Гармонические колебания

Гармонические колебания – колебания, при которых физическая величина, характеризующая эти колебания, изменяется во времени по синусоидальному закону

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Графиком гармонических колебаний является синусоида (рис. 1):

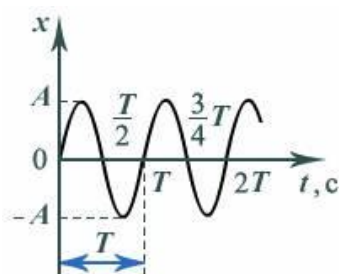


Рис. 1.

Выбор начальной фазы позволяет при описании гармонических колебаний перейти от функции синуса к функции косинуса:

$$x = A \cos\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right).$$

Обобщенное гармоническое колебание в дифференциальном виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0, \quad \text{или} \quad x'' + \omega^2 x = 0$$

Для того чтобы свободные колебания совершались по гармоническому закону, необходимо, чтобы сила, стремящаяся вернуть тело в положение равновесия, была пропорциональна смещению тела из положения равновесия и направлена в сторону, противоположную смещению:

$$F = ma = -m\omega^2 x,$$

где m – масса колеблющегося тела.

Физическую систему, в которой могут существовать гармонические колебания, называют *гармоническим осциллятором*, а уравнение гармонических колебаний – *уравнением гармонического осциллятора*.

1.2. Сложение колебаний

Нередки случаи, когда система одновременно участвует в двух или нескольких независимых друг от друга колебаниях. В этих случаях образуется сложное колебательное движение, которое создается путем наложения (сложения) колебаний друг на друга. Очевидно, случаи сложения колебаний могут быть весьма разнообразны. Они зависят не только от числа складываемых колебаний, но и от параметров колебаний, от их частот, фаз, амплитуд, направлений. Не представляется возможным обозреть все возможное разнообразие случаев сложения колебаний, поэтому ограничимся рассмотрением лишь отдельных примеров.

Сложение гармонических колебаний, направленных вдоль одной прямой

Рассмотрим сложение одинаково направленных колебаний одного периода, но отличающихся начальной фазой и амплитудой. Уравнения складываемых колебаний заданы в следующем виде:

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1), \quad x_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2),$$

где x_1 и x_2 – смещения; A_1 и A_2 – амплитуды; φ_1 и φ_2 – начальные фазы складываемых колебаний.

Амплитуду результирующего колебания удобно определить с помощью векторной диаграммы (рис. 2), на которой отложены векторы амплитуд \vec{A}_1 и \vec{A}_2 складываемых колебаний под углами φ_1 и φ_2 к оси x и по правилу параллелограмма получен вектор амплитуды суммарного колебания \vec{A} .

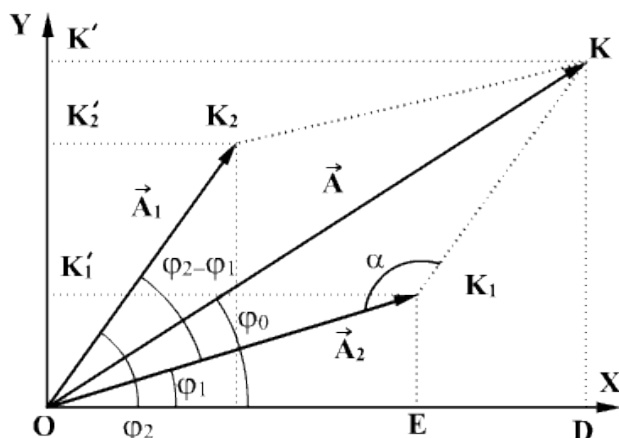


Рис.2.

Если равномерно вращать систему векторов (параллелограмм) и проектировать векторы на ось OY , то их проекции будут совершать гармонические колебания в соответствии с заданными уравнениями. Взаимное расположение векторов \vec{A}_1 и \vec{A}_2 при этом остается неизменным, поэтому колебательное движение проекции результирующего вектора \vec{A} тоже будет гармоническим.

Отсюда следует вывод, что суммарное движение – гармоническое колебание, имеющее заданную циклическую частоту. Определим модуль амплитуды A результирующего колебания. В $\triangle OKK_1$ угол $OK_1K = [\pi - (\varphi_2 - \varphi_1)]$ (из равенства противоположных углов параллелограмма).

Следовательно,

$$2(\varphi_2 - \varphi_1) + 2\alpha = 2\pi$$

отсюда:

$$\alpha = [\pi - (\varphi_2 - \varphi_1)].$$

Согласно теореме косинусов

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos[\pi - (\varphi_2 - \varphi_1)],$$

или

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (1)$$

Начальная фаза φ_0 результирующего колебания определяется из $\triangle OKD$:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{KD}{OD} = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

Соотношения для фазы и амплитуды позволяют найти амплитуду и начальную фазу результирующего движения и составить его уравнение: $x = A \sin(\omega t + \varphi)$.

Биения

Рассмотрим случай, когда частоты двух складываемых колебаний мало отличаются друг от друга $\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$, и пусть амплитуды одинаковы и начальные фазы $\varphi_0 = 0$, т.е.

$$x_1 = A \sin(\omega_1 t), \quad x_2 = A \sin(\omega_2 t).$$

Сложим эти уравнения аналитически:

$$\begin{aligned} x = x_1 + x_2 &= A[\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)] = 2A \left[\cos\left(\frac{\omega_1 t + \omega_2 t}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_2 t - \omega_1 t}{2}\right) \right] \\ &= 2A \cos\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_1 t + \omega_2 t}{2}\right) \end{aligned}$$

Преобразуем

$$\frac{\omega_1 t + \omega_2 t}{2} = \frac{(\omega_1 t + \omega_2 t) + (\omega_1 t - \omega_2 t)}{2} = \frac{2\omega_1 t}{2} + \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t = \omega_1 t + \frac{\Delta\omega}{2} t = \left(\omega_1 + \frac{\Delta\omega}{2}\right) t \cong \omega_1 t$$

Тогда

$$x = 2A \cos\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right) \cos(\omega_1 t)$$

Так как, $\Delta\omega t/2$ медленно изменяется, величину $2A \cos\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right)$ нельзя назвать амплитудой в полном смысле этого слова (амплитуда величина постоянная). Условно эту величину можно назвать переменной амплитудой. График таких колебаний показан на рис.3. Складываемые колебания имеют одинаковые амплитуды, но различные периоды, при этом периоды T_1 и T_2 отличаются незначительно друг от друга. При сложении таких колебаний наблюдаются биения. Число n биений в секунду определяется разностью частот складываемых колебаний, т.е.

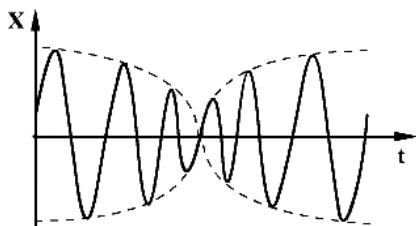


Рис. 3.

$$n = \nu_1 \nu_2$$

Биения можно наблюдать при звучании двух камертонов, если частоты и колебаний близки друг к другу.

Сложение взаимно перпендикулярных колебаний

Пусть материальная точка одновременно участвует в двух гармонических колебаниях, совершающихся с одинаковыми периодами T в двух взаимно перпендикулярных направлениях. С этими направлениями можно связать прямоугольную систему координат XOY , расположив начало координат в положении равновесия точки. Обозначим смещение точки C вдоль осей OX и OY , соответственно, через x и y . (рис. 4).

Рассмотрим несколько частных случаев.

1). Начальные фазы колебаний одинаковы

Выберем момент начала отсчета времени таким образом, чтобы начальные фазы обоих колебаний были равны нулю. Тогда смещения вдоль осей OX и OY можно выразить уравнениями:

$$x = A_1 \sin(\omega t), \quad y = A_2 \sin(\omega t)$$

Поделив почленно эти равенства, получим уравнения траектории точки C :

$$\frac{x}{y} = \frac{A_1}{A_2} \quad \text{или} \quad -y = \frac{A_2}{A_1} x.$$

Следовательно, в результате сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний точка С колеблется вдоль отрезка C_1C_2 прямой, проходящей через начало координат (рис.4).

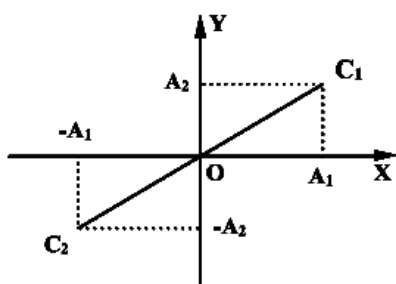


Рис. 4.

2). Начальная разность фаз равна π :

Уравнения колебания в этом случае имеют вид:

$$x = A_1 \sin(\omega t + \pi) = -A_1 \sin(\omega t),$$

$$y = A_2 \sin(\omega t)$$

Уравнение траектории точки:

$$y = -\frac{A_2}{A_1} x \quad (2)$$

Следовательно, точка С колеблется вдоль отрезка C_1C_2 прямой, проходящей через начало координат, но лежащей в других квадрантах, чем в первом случае. Амплитуда A результирующих колебаний в обоих рассмотренных случаях равна:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$$

3). Начальная разность фаз равна $\frac{\pi}{2}$.

Уравнения колебаний имеют вид:

$$x = A_1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = A_1 \cos(\omega t), \quad y = A_2 \sin(\omega t)$$

Разделим первое уравнение на A_1 , второе – на A_2 :

$$\frac{x}{A_1} = \cos(\omega t), \quad \frac{y}{A_2} = \sin(\omega t).$$

Возведем оба равенства в квадрат и сложим. Получим следующее уравнение траектории результирующего движения колеблющейся точки:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1 \quad (3)$$

Колеблющаяся точка С движется по эллипсу с полуосями A_1 и A_2 . При равных амплитудах $A_1 = A_2 = A$ траекторией суммарного движения будет окружность $x^2 + y^2 = A^2$. В общем случае при $\omega_1 \neq \omega_2$, но кратным, т.е. $\omega_1 = k\omega_2$, при сложении, взаимно перпендикулярных колебаний колеблющаяся точка движется по кривым, называемым фигурами Лиссажу.

Фигуры Лиссажу

Фигуры Лиссажу – замкнутые траектории, прочерчиваемые точкой, совершающей одновременно два гармонических колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Впервые изучены французским учёным Жюлем Антуаном Лиссажу. Вид фигур зависит от соотношения между периодами (частотами), фазами и амплитудами обоих колебаний (рис. 5).

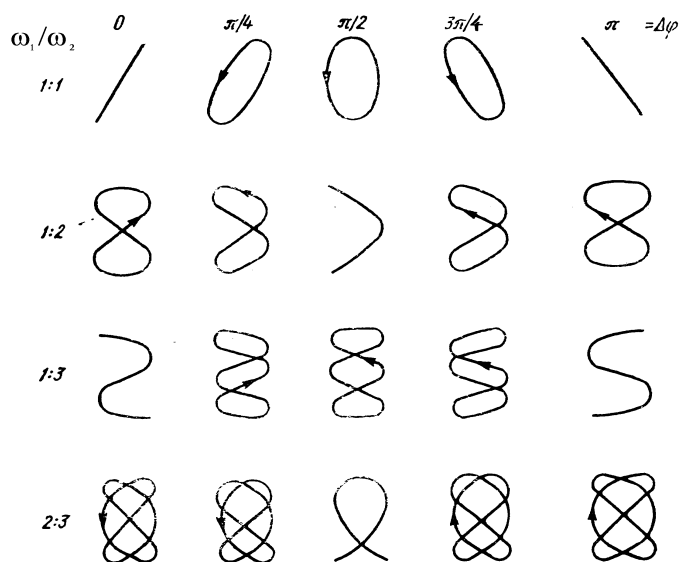


Рис.5.

В простейшем случае равенства обоих периодов фигуры представляют собой эллипсы, которые при разности фаз 0 или π вырождаются в отрезки прямых, а при разности фаз $\frac{\pi}{2}$ и равенстве амплитуд превращаются в окружность. Если периоды обоих колебаний неточно совпадают, то разность фаз всё время меняется, вследствие чего эллипс всё время деформируется. При существенно различных периодах фигуры Лиссажу не наблюдаются. Однако, если периоды относятся как целые числа, то через промежуток времени, равный наименьшему кратному обоим периодам, движущаяся точка снова возвращается в то же положение – получаются фигуры Лиссажу более сложной формы.

Фигуры Лиссажу вписываются в прямоугольник, центр которого совпадает с началом координат, а стороны параллельны осям координат и расположены по обе стороны от них на расстояниях, равных амплитудам колебаний (рис. 6).

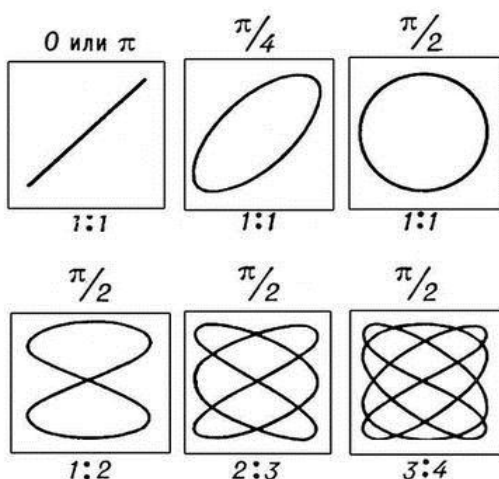


Рис. 6.

Вид фигур Лиссажу при различных соотношениях периодов (1 : 1; 1 : 2 и т. д.) и разностях фаз.

Математическое выражение для кривой Лиссажу

$$\begin{cases} x(t) = A \sin(at + \delta) \\ y(t) = B \sin(bt) \end{cases}$$

где A, B – амплитуды колебаний, a, b – частоты, δ – сдвиг фаз.

Вид кривой сильно зависит от соотношения a/b . Когда соотношение равно 1, фигура Лиссажу имеет вид эллипса, при определённых условиях она имеет вид окружности ($A = B, \delta = \pi/2$ радиан) и отрезка прямой ($\delta = 0$). Ещё один пример фигуры Лиссажу – парабола ($a/b = 2, \delta = \pi/2$).

При других соотношениях фигуры Лиссажу представляют собой более сложные фигуры, которые являются замкнутыми при условии a/b – рациональное число.

Фигуры Лиссажу, где $a = 1, b = N$ (N – натуральное число) и

$$\delta = \frac{N-1}{N} \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

являются полиномами Чебышева первого рода степени N .

Фигуры Лиссажу можно наблюдать, например, на экране электронно-лучевого осциллографа, если к двум парам отклоняющих пластин подведены переменное напряжения с равными или кратными периодами. Вид фигур Лиссажу позволяет определить соотношения между периодами и фазами обоих колебаний. Если колебания, которые совершает точка, происходят не по

гармоническому, а по более сложному закону, но с одинаковым периодом, то получаются замкнутые траектории, аналогичные фигурам Лиссажу но искажённой формы. По виду этих фигур можно судить о форме колебаний. Таким образом, наблюдение фигур Лиссажу – удобный метод исследования соотношений между периодами и фазами колебаний, а также и формы колебаний.

2. Теория лабораторной работы

Для определения частоты неизвестного гармонического колебания часто используется метод фигур Лиссажу, который заключается в следующем: исследуемое колебание складывается с взаимно-перпендикулярным ему колебанием известной частоты. В общем случае в результате сложения получаются фигуры Лиссажу, по общему виду которых можно определить частоты исследуемого напряжения. В настоящей работе сравнение частот производится с помощью электронного осциллографа, на вертикально отклоняющие пластины которого подается исследуемое напряжение от источника колебаний звуковой частоты, а на горизонтально отклоняющие пластины - напряжение определенной частоты от другого генератора.

Рассмотрим два взаимно-перпендикулярных колебания x и y с частотами $\omega_x = \omega$ и $\omega_y = n\omega_x = n\omega$.

$$\begin{cases} x = x_0 \cos \omega t = x_0 \cos 2 \pi \nu t \\ y = y_0 \cos(n\omega t + \varphi) = y_0 \cos(2 \pi n \nu t + \varphi) \end{cases} \quad (5)$$

где φ - начальная разность фаз между колебаниями. Очевидно, $n = \frac{\omega_y}{\omega_x}$

Система уравнений (5) представляет собой уравнение кривой, являющейся результатом сложения этих колебаний, заданной в параметрической форме. Определим уравнение траектории точки, участвующей в данных колебаниях, исключая из уравнения (5) время t :

$$\frac{x}{x_0} = \cos \omega t; \quad \frac{y}{y_0} = \cos n \left(\omega t + \frac{\varphi}{n} \right) = \cos n \alpha, \quad \text{где } \alpha = \omega t + \frac{\varphi}{n} \quad (6)$$

Прибавим к левой и правой части (6) минимальную величину $i \sin n \alpha$, получим:

$$\frac{y}{y_0} + i \sin n \alpha = \cos n \alpha + i \sin n \alpha.$$

По формуле Муавра: $\cos n \alpha + i \sin n \alpha = (\cos \alpha + i \sin \alpha)^n$.

Продолжим преобразования:

$$\frac{y}{y_0} + i \sin n \left(\omega t + \frac{\varphi}{n} \right) = \left[\cos \omega t \cos \frac{\varphi}{n} - \sin \omega t \sin \frac{\varphi}{n} + i \left(\sin \omega t \cos \frac{\varphi}{n} + \cos \omega t \sin \frac{\varphi}{n} \right) \right]^n. \quad (7)$$

$$\text{Но } \cos \omega t = \frac{x}{x_0}; \quad \sin \omega t = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2}.$$

Подставляя эти значения в формулу (7), получим:

$$\frac{y}{y_0} = i \sin \left(\omega t + \frac{\varphi}{n} \right) = \left[\left(\frac{x}{x_0} \cos \frac{\varphi}{n} - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \sin \frac{\varphi}{n} \right) + i \left(\sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \cos \frac{\varphi}{n} + \frac{x}{x_0} \sin \frac{\varphi}{n} \right) \right]^n. \quad (8)$$

Разлагая по биному Ньютона выражение в квадратных скобках и приравнявая действительные части слева и справа, получим уравнение траектории колеблющейся точки.

Рассмотрим частный случай - сложение колебаний с одинаковыми частотами

$$(n = 1), \quad \frac{y}{y_0} = \frac{x}{x_0} \cos \varphi - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \sin \varphi,$$

$$\text{Откуда:} \quad \left(\frac{x}{x_0} \right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 - 2 \frac{x}{x_0} \frac{y}{y_0} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (9)$$

Это уравнение в общем случае является уравнением эллипса. Рассмотрим частные случаи этого уравнения. Пусть колебания происходят с разностью фаз равной нулю или π . В этом случае уравнение (9) принимает вид:

$$\left(\frac{x}{x_0} - \frac{y}{y_0} \right)^2 = 0$$

$$y = \frac{y_0}{x_0} x, \quad \text{или} \quad y = -\frac{y_0}{x_0} x,$$

т.е. эллипс вырождается в прямую (рис. 7).

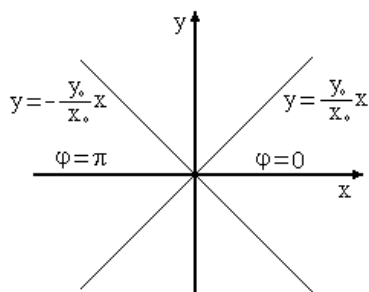


Рис. 7.

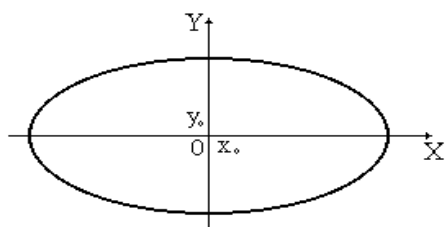


Рис. 8.

Пусть разность фаз между колебаниями равна $\frac{\pi}{2}$. Тогда уравнение (9) будет иметь вид: $\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} = 1$.

Полученная кривая является эллипсом, оси которого совпадают с осями координат (рис. 8). Если амплитуды колебаний одинаковы, то эллипс вырождается в окружность $x^2 + y^2 = R^2$. В тех случаях, когда $n \neq 1$, по общему виду уравнения результирующего колебания, получаемого по формуле (8), трудно судить о форме траектории.

Пусть показатель степени в уравнении (8) есть число рациональное, т. е. может быть представлено в виде отношения двух целых чисел n_y и n_x :

$$n = \frac{n_x}{n_y}.$$

Из системы уравнений (5) следует, что:

$$n = \frac{\omega_y}{\omega_x} = \frac{T_x}{T_y} = \frac{n_x}{n_y} = \frac{v_y}{v_x},$$

где ω_x и T_x – частота и период колебаний в направлении оси X ; ω_y и T_y – частота и период колебаний в направлении оси Y . Перепишем последнее соотношение в виде:

$$n_y T_x = n_x T_y = t.$$

Отсюда следует, что за промежуток времени t точка совершит n_x полных колебаний в направлении оси Y и n_y полных колебаний в направлении оси X .

После истечения времени t точка будет находиться в той же фазе, что и в начальный момент, т. е. за следующий промежуток времени $t_2 = t_1$ колебания в точности повторятся. В результате колебания будут накладываться сами на себя и дадут устойчивую картину (фигуры Лиссажу). Если же одно из чисел n_x или n_y иррациональное, т. е. n нельзя представить в виде отношения целых чисел, то это приведет к добавочной разности фаз. В результате картина результирующего колебания будет непрерывно изменяться. Если частота одного из колебаний известна, то по виду фигур Лиссажу можно определить частоту другого. Такое сравнение частот можно проделать осциллографическим методом, подавая на горизонтально отклоняющие пластины напряжение с известной частотой v_x а на вертикально отклоняющие пластины – исследуемое напряжение с частотой v_y .

Пусть $\frac{v_y}{v_x} = \frac{n_x}{n_y}$, тогда: $v_y = \frac{n_x}{n_y} v_x$. (10)

Выведем правило нахождения отношения частоты по фигурам Лиссажу. Учитывая уравнение (10), можно переписать уравнение (8) в виде:

$$\left[\frac{y}{y_0} + i \sin n \left(\omega t + \frac{\varphi}{n} \right) \right]^{n_y} = \left[\left(\frac{x}{x_0} \cos \frac{\varphi}{n} - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \sin \frac{\varphi}{n} \right) + i \left(\sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \cos \frac{\varphi}{n} + \frac{x}{x_0} \sin \frac{\varphi}{n} \right) \right]^{n_x}.$$

Положим $x = 0$. Тогда, возводя левую и правую части по биному Ньютона и приравнявая действительные части, получим уравнение n_y – степени относительно Y , имеющее n_y корней. Графически это означает, что ось Y пересекает кривую n_y раз. Если $X = C_1$, где C_1 – произвольная постоянная, то получим так же уравнение, имеющее n_y корней.

Фигура Лиссажу будет пересекать n_y раз прямую, параллельную оси Y .

Полагая $Y = C_2$, получим уравнение n_x степени относительно X , т. е. кривая будет пересекать прямую, параллельную оси X , n_x раз. Так на рис. 9 $n_x = 4$ и $n_y = 2$.

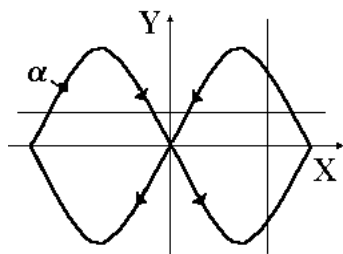


Рис. 9.

Следовательно, $\frac{v_y}{v_x} = \frac{1}{2}$

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе исследуется схема, изображенная на рис.10. В схеме используется

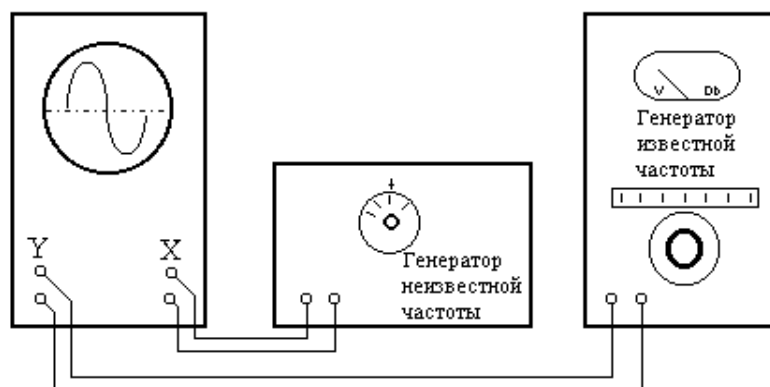


Рис. 10.

генератор опорных (известных) сигналов, частоту которых можно установить по шкале. Напряжение известной частоты подается на вертикальные пластины «вход Y». Генератор неизвестной частоты связан с «входом X».

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Включить в сеть звуковые генераторы и осциллограф, прогреть. Сфокусировать и вывести световое пятно на центр координатной сетки. Вращая ручку «усиление по X» добиться горизонтальной полоски на $2/3$ экрана.
2. Установить заданную преподавателем частоту на генераторе известной частоты. Вращая регулятор генератора неизвестной частоты добиться устойчивой фигуры и зарисовать её.
3. Для определения неизвестной частоты нужно определить число пересечений n_x и n_y кривой с осями X и Y. Для этого выбрать точку на фигуре (например, точка a на рис. 9) и обходить кривую, отмечая число пересечений с осью Y (n_y) и осью X (n_x) до возвращения в исходную точку. Вычислить неизвестную частоту по формуле (10).
4. Изменяя частоту добиться новой устойчивой фигуры и определить n_{2y} . Измерения проделать для шести фигур Лиссажу.

Таблица наблюдений

№ п/п	Вид фигуры Лиссажу	ν_x , Гц	n_x	n_y	ν_y , Гц
1					
2					
3					
4					
5					
6					

5. Проанализировать результаты, сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется периодом, частотой, амплитудой и фазой колебания?
2. Какие колебания называются гармоническими? Уравнение свободных незатухающих гармонических колебаний, в том числе в дифференциальной форме.
3. Выведите уравнение траектории результирующего движения точки при сложении двух взаимно перпендикулярных свободных незатухающих гармонических колебаний одинаковой частоты?
4. Какая будет траектория движения этой точки при разности фаз складываемых колебаний $\Delta\alpha = \pi/2$?
5. При каком соотношении частот двух складываемых взаимно перпендикулярных гармонических колебаний возникают фигуры Лиссажу?
6. Как с помощью метода фигур Лиссажу определить неизвестную частоту колебаний?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1982. Т.1.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985.
3. Хайкин С.Э. Физические основы механики. – М.: Наука, 1971
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.
- 5.