



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Общий физический практикум

Кафедра общей физики

Образовательная программа бакалавриата

03.03.02 – Физика

Направленность (профиль) программы:

Фундаментальная физика, Медицинская физика

Форма обучения:

Очная

Статус дисциплины:

Входит в обязательную часть

Махачкала, 2022год

Рабочая программа дисциплины «**Общий физический практикум**» составлена в 2022 году в соответствии с требованиями ФГОС ВО – бакалавриат по направлению подготовки 03.03.02 – Физика

от «7» августа 2020г. № 891 (С изменениями и дополнениями от: 26 ноября 2020 г.)

Разработчик: кафедра общей физики, Курбанисмаилов В.С., д.ф.-м.н., профессор

Программа дисциплины «Общий физический практикум» одобрена: на заседании Совета физического факультета от «23» марта 2022 г., протокол № 7.

Декан

Курбанисмаилов В.С.

на заседании Методической комиссии физического факультета от «23» марта 2022 г., протокол № 7.

Председатель

Мурлиева Ж.Х.

Рабочая программа дисциплины согласована с учебно-методическим управлением «31» марта 2022 г.

Начальник УМУ

Гасангаджиева А.Г.

Аннотация рабочей программы дисциплины

Дисциплина «**Общий физический практикум**» входит в обязательную часть ОПОП бакалавриата по направлению подготовки **03.03.02 Физика**.

Дисциплина реализуется на физическом факультете, кафедрами: общей физики (1-4,6 семестры) и физической электроники (5 семестр).

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с применением теоретических знаний по курсу общей физики к анализу конкретных физических ситуаций, экспериментально изучить основные закономерности, оценить порядки изучаемых величин, определить точность и достоверность полученных результатов, а также ознакомить с современной измерительной аппаратурой и принципом ее действия: с основными принципами автоматизации и компьютеризации процессов сбора и обработки физической информации: с основными элементами техники безопасности при проведении экспериментальных исследований.

Часть задач физического практикума посвящены количественному изучению тех явлений, которые демонстрировались на лекциях в качественном эксперименте. Общее число задач физического практикума, которое должен выполнить студент в каждом семестре, определяется факультетом (кафедрой) в соответствии с учебным планом и содержанием настоящей программы.

Дисциплина нацелена на формирование следующих компетенций выпускника: *универсальных – УК-1, общепрофессиональных - ОПК-1, ОПК-2, профессиональных ПК-8.*

Преподавание дисциплины предусматривает проведение следующих видов учебных занятий: *лабораторные занятия и самостоятельная работа.*

Рабочая программа дисциплины предусматривает проведение следующих видов контроля успеваемости в форме *контроля текущей успеваемости – контрольная работа* и промежуточный контроль в форме *зачета* (1-6 семестрах).

Объем дисциплины 14 зачетных единиц, в том числе в академических часах по видам учебных занятий

п/п	Наименование тем и разделов	Всего (часов)/ЗЕ	Аудиторные занятия (час.)			Самостоятельная работа
			Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	
1.	Механика	72/2	-	70	-	2
2.	Молекулярная физика	72/2	-	66	-	6
3.	Электричество и магнетизм	108/3	-	72	-	36
4.	Оптика	108/3	-	72	-	36

5.	Физика атома	72/2	-	50	-	22
6.	Физика атомного ядра и элементарных частиц	72/2	-	48	-	24
	ИТОГО:	504/14	-	378	-	126

Семес тр	Учебные занятия						СРС, в том числе экза мен	Форма промежуточной аттестации (зачет)
	в том числе							
	Контактная работа обучающихся с преподавателем							
	Все го	из них						
Лекц ии		Лаборатор ные занятия	Практич еские занятия	КСР	консульт ации			
1	72	-	70	-			2	зачет
2	72	-	66	-			6	зачет
3	108	-	72	-			36	зачет
4	108	-	72	-			36	зачет
5	72	-	50	-			22	зачет
6	72	-	48	-			24	зачет

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины **«Общий физический практикум»** являются:

- дать возможность обучающимся экспериментально изучить основные физические закономерности; научить студентов определять точность и достоверность полученных результатов, применять теоретический материал к анализу конкретных физических ситуаций;
- ознакомить с современной измерительной аппаратурой и принципами ее действия; с основными принципами автоматизации и компьютеризации процессов сбора и обработки физической информации; с основными элементами техники безопасности при проведении экспериментальных исследований;
- обеспечить приобретение практических навыков по выполнению лабораторных измерений, обработке результатов эксперимента и обращению с основными физическими приборами;
- развитие любознательности и интереса обучающихся к научно-техническим и другим прикладным вопросам физики;
- формирование культуры физического мышления;
- подготовка к изучению новых разделов современной физики.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП бакалавриата

Дисциплина **«Общий физический практикум»** входит в обязательную часть ОПОП бакалавриата по направлению подготовки 03.03.02 Физика. Дисциплина включает в себя шесть разделов: часть 1 «Механика», часть 2 «Молекулярная физика», часть 3 «Электричество и магнетизм», часть 4 «Оптика», часть 5 «Физика атома», часть 6 «Физика атомного ядра и элементарных частиц», которые изучаются с 1-го по 6-й семестр, соответственно. Учебный процесс по этим разделам обеспечивается кафедрами: общей физики (1-4,6 семестры) и физической электроники (5 семестр) физического факультета ДГУ.

Часть задач практикума (лабораторные работы) посвящены количественному изучению тех явлений, которые демонстрировались на лекциях в качественном эксперименте. Общее число лабораторных работ, которое должен выполнить студент в каждом семестре, определяется кафедрой в соответствии с учебным планом и содержанием настоящей программы.

Дисциплина **«Общий физический практикум»** в неразрывной связи с курсом общей физики призвана обеспечить высокое качество фундаментальной подготовки выпускаемых специалистов. В ходе учебного процесса студенты должны научиться правильно и осознанно проводить

экспериментальные исследования, приобрести навыки обращения с измерительными приборами и измерительной аппаратурой, научиться обрабатывать экспериментальные данные, применять теоретические знания в экспериментальной работе, понимая при этом роль физической идеализации, научиться критически осмысливать любой получившийся в эксперименте результат.

В познании физических закономерностей в учебных лабораториях Общего физического практикума важна убежденность студента в правильности получаемого на опыте результата. Эта убежденность должна базироваться не только на совпадении найденных значений с табличными значениями соответствующих физических величин, но и на уверенности в правильности постановки задачи, методов ее экспериментальной реализации и проведения всех измерений.

В ходе учебного процесса студентами по каждой части дисциплины должно быть выполнено 10-16 лабораторных работ. В рамках настоящего курса лабораторные работы выполняются в лабораториях «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Атомная и ядерная физика». Список действующих лабораторных работ приведен в настоящей программе, и он может корректироваться в каждом учебном году. Работа в общем физическом практикуме сопровождается обязательной подготовкой студентов по основам техники безопасности.

Выполнение каждой лабораторной работы требует самостоятельной теоретической подготовки студента по теме исследования. При подготовке от студентов потребуются знания основ классической физики и базовых математических дисциплин (векторная алгебра и аналитическая геометрия, дифференциальное и интегральное исчисление), а также навыки самостоятельной работы с литературой. Лабораторные работы по завершающим курс разделам «Атомная физика» и «Физика атомного ядра и элементарных частиц», изучаемым в 5-м и 6-м семестрах, требуют также знания основ квантовой механики и методов математической физики (классификация квантовых состояний, простейшие задачи для уравнения Шредингера, сферические функции, полиномы Лежандра, Лагерра). Кроме того, студенты должны изучить элементарные основы математической статистики и применять их для обработки экспериментальных результатов. Поэтому самостоятельная работа студентов в процессе обучения приобретает особое значение.

Основными формами контроля знаний являются предварительный и окончательный отчеты преподавателю при выполнении и сдаче (защите) каждой лабораторной работы, а также заключительный зачет по дисциплине.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (перечень планируемых результатов обучения и процедура освоения).

Код и наименование компетенции из ОПОП	Код и наименование индикатора достижения компетенций	Планируемые результаты обучения	Процедура освоения
<p>УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач</p>	<p>Б-УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие;</p>	<p>Знает: основные методы критического анализа; методологию системного подхода, принципы научного познания. Умеет: производить анализ явлений и обрабатывать полученные результаты; выявлять проблемные ситуации, используя методы анализа, синтеза и абстрактного мышления; использовать современные теоретические концепции и объяснительные модели при анализе информации Владеет: навыками критического анализа.</p>	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>
	<p>Б-УК-1.2. Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи;</p>	<p>Знает: систему информационного обеспечения науки и образования; Умеет: осуществлять поиск решений проблемных ситуаций на основе действий, эксперимента и опыта; выделять экспериментальные данные, дополняющие теорию (принцип дополнительности). Владеет: основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией.</p>	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>

	<p>Б-УК-1.3. Осуществляет поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам запросов</p>	<p>Знает: методы поиска информации в сети Интернет; правила библиографирования информационных источников; библиометрические и наукометрические методы анализа информационных потоков Умеет: критически анализировать информационные источники, научные тексты; получать требуемую информацию из различных типов источников, включая Интернет и зарубежную литературу. Владеет: методами классификации и оценки информационных ресурсов.</p>	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>
	<p>Б-УК-1.4. При обработке информации отличает факты от мнений, интерпретаций, оценок, формирует собственные мнения и суждения, аргументирует свои выводы и точку зрения, в том числе с применением философского понятийного аппарата</p>	<p>Знает: базовые и профессионально-профилированные основы философии, логики, права, экономики и истории; сущность теоретической и экспериментальной интерпретации понятий; сущность операционализации понятий и ее основных составляющих. Умеет: формулировать исследовательские проблемы; логически выстраивать последовательную содержательную аргументацию; выявлять логическую структуру понятий, суждений и умозаключений, определять их вид и логическую корректность. Владеет: методами логического анализа различного рода рассуждений, навыками</p>	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>

		<p>ведения дискуссии и полемики.</p>	
	<p>Б-УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленных задач.</p>	<p>Знает: требования, предъявляемые к гипотезам научного исследования; виды гипотез (по содержанию, по задачам, по степени разработанности и обоснованности). Умеет: определять в рамках выбранного алгоритма вопросы (задачи), подлежащие дальнейшей разработке и предлагать способы их решения. Владеет: технологиями выхода из проблемных ситуаций, навыками выработки стратегии действий; навыками статистического анализа данных.</p>	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>

<p>ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности;</p>	<p>ОПК-1.1. Выявляет и анализирует проблемы, возникающие в ходе профессиональной деятельности, основываясь на современной научной картине мира</p>	<p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> - физико-математический аппарат, необходимый для решения задач профессиональной деятельности - тенденции и перспективы развития современной физики, а также смежных областей науки и техники. <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, анализировать и обрабатывать соответствующую научно-техническую литературу при выполнении работ физического практикума с учетом зарубежного опыта. <p>Владеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками находить и критически анализировать информацию, выявлять естественнонаучную сущность проблем при выполнении работ физического практикума. 	<p>Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>
	<p>ОПК-1.2. Реализует и совершенствует новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области профессиональной деятельности.</p>	<p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основные понятия, идеи, методы, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области физики атомного ядра и элементарных частиц; - новые методологические подходы к решению задач в области профессиональной деятельности. <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - реализовать и совершенствовать новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и 	<p>Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>

		<p>прикладных задач при выполнении работ физического практикума.</p> <p>Владеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками реализовать и совершенствовать новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач при выполнении работ физического практикума 	
	<p>ОПК-1.3. Проводит качественный и количественный анализ выбранного методов решения выявленной проблемы, при необходимости вносит необходимые коррективы.</p>	<p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основы качественного и количественного анализа методов решения выявленной проблемы. <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выбирать метод решения выявленной проблемы, проводить его качественный и количественный анализ, при необходимости вносить необходимые коррективы для достижения оптимального результата при выполнении работ физического практикума. <p>Владеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками проводить качественный и количественный анализ методов решения выявленной проблемы, оценивать эффективность выбранного метода при выполнении работ физического практикума. 	<p>Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>
<p>ОПК-2 Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные</p>	<p>ОПК-2.1. Выбирает или самостоятельно формулирует тему исследования, составляет программу исследования.</p>	<p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> - актуальные проблемы, основные задачи, направления, тенденции и перспективы развития физики, а также смежных областей науки и техники. - принципы планирования экспериментальных исследований для решения поставленной задачи в при 	<p>Устный опрос, письменный опрос</p>

данные		<p>выполнении работ физического практикума.</p> <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований; - рассматривать возможные варианты реализации экспериментальных исследований, оценивая их достоинства и недостатки. <p>Владеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками формулировать конкретные темы исследования, планировать эксперименты по заданной методике для эффективного решения поставленной задачи при выполнении работ физического практикума. 	
	<p>ОПК-2.2. Самостоятельно выбирает методы исследования, разрабатывает и проводит исследования.</p>	<p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> - современные инновационные методики исследований, в том числе с использованием проблемно-ориентированных прикладных программных средств. <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - предлагать новые методы научных исследований и разработок, новые методологические подходы к решению поставленных задач; - самостоятельно выбирать методы исследования, разрабатывать и проводить исследования в области физического практикума. <p>Владеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> -навыками самостоятельно выбирать методы исследования, разрабатывать и проводить исследования при выполнении работ физического практикума. 	<p>Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ. Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>
	ОПК-2.3.	Знает:	Устный

	<p>Анализирует, интерпретирует, оценивает, представляет и защищает результаты выполненного исследования с обоснованными выводами и рекомендациями.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - основные приемы обработки и представления результатов выполненного исследования; - передовой отечественный и зарубежный научный опыт и достижения по теме исследования. <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - использовать основные приемы обработки, анализа и представления экспериментальных данных; - формулировать и аргументировать выводы и рекомендации по выполненной работе. <p>Владеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками обработки, анализа и интерпретации полученных данных с использованием современных информационных технологий; - формулировать и аргументировать выводы и рекомендации по исследовательской работе при выполнении работ физического практикума 	<p>опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>
<p>ПК-8. Способен проводить работы по обработке и анализу научно-технической информации, проводить эксперименты и оформлять результаты.</p>	<p>ПК-8.1. Способен собирать, обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов и исследований в соответствующей области знаний, проводить эксперименты и наблюдения, составлять отчеты по теме или по результатам проведенных экспериментов</p>	<p>Знает: методы исследований, проведения, обработки и анализа результатов испытаний и измерений; критерии выбора методов и методик исследований.</p> <p>Умеет: проводить испытания, измерения и обработку результатов; регистрировать показания приборов; проводить расчёты критически анализировать результаты делать выводы по результатам выполнения работ физического</p>	<p>Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>

	<p>ПК-8.2. Способен применять полученные знания на практике для решения профессиональных задач.</p>	<p>практикума. Владеет: выбором испытательного и измерительного оборудования, необходимого для проведения исследований; выполнением оценки и обработки результатов исследования при выполнении работ физического практикума.</p>	<p>Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>
	<p>ПК-8.3. Способен пользоваться современными методами обработки и анализа научно-технической информации и результатов исследований в избранной области профессиональной деятельности</p>	<p>Знает: основы теории фундаментальных разделов физики; основные методы получения и исследования физических явлений, применяемые в отечественной и зарубежной практике; опыт лабораторных работ, требования техники безопасности; методы исследования, правила и условия выполнения работ, технических расчетов, оформления получаемых результатов.</p>	<p>Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>
	<p>ПК-8.4. Способен строить математические модели физических процессов, задавать параметры и проводить моделирование физических задач</p>	<p>Уметь: составлять общий план исследования и детальные планы отдельных стадий, моделировать основные процессы предстоящего исследования; выбирать оптимальные методы исследования; Владеть: навыками выбора экспериментальных и расчетно-теоретических методов решения поставленной задачи исходя из имеющихся материальных и временных ресурсов при выполнении работ физического практикума.</p>	<p>Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.</p>

4. Объем, структура и содержание дисциплины.

4.1. Объем дисциплины составляет 14 зачетных единиц, 504 академических часов.

4.2. Структура дисциплины.

Раздел I. Механика

№ п/п	Разделы и темы дисциплины по модулям	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	...	Самостоятельная работа в т.ч. зачет, экзамен	
Модуль 1.								
1	Определение ускорения свободного падения с помощью универсального маятника	1			6			Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
2	Изучение движения маятника Максвелла				6		1	
3	Изучение сил сухого трения	1			6			
4	Изучение законов динамики вращательного движения на крестообразном маятнике Обербека	1			6			
5	Определение ускорение свободного падения на машине Атвуда	1			6			
6	Определение момента инерции тел с помощью крутильного маятника	1			6			
	<i>Итого по модулю 1:</i>				36		1	
7	Изучение собственных колебаний сосредоточенной системы	1			4			Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
8	Определение скорости звука методом стоячей волны	1			6			
9	Определение модуля Юнга из растяжения и изгиба	1			6			
10	Определение коэффициента Пуассона и периода биений	1			6			
11	Определение скорости	1			6			

	полета пули с помощью баллистического маятника							
12	Исследование упругих и неупругих столкновений шаров	1			6			
	<i>Итого по модулю 2:</i>				34		1	
	ИТОГО:				70		2	<i>Зачет</i>

Раздел II. Молекулярная физика

№ п/п	Разделы и темы дисциплины по модулям	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	...	Самостоятельная работа в т.ч. зачет, экзамен	
Модуль 1. (название модуля)								
1	Вводное занятие	2			4			Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
2	Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом				4		1	
3	Определение коэффициента теплопроводности методом нагретой нити				6			
4	Определение коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара				4			
5	Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и объеме				6		1	
6	Получение и измерение высокого вакуума				4			
7	Определение теплоемкости твердых тел				6			
	<i>Итого по модулю 1:</i>				34		2	
Модуль 2								
8	Вводное занятие	2			4			Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
9	Определение теплоты парообразования воды				4		1	
10	Определение изменения энтропии при нагревании и плавлении олова				6		1	
11	Определение молярной массы и плотности газа методом откачки				4		1	
12	Определение скрытой теплоты кристаллизации и				4		1	

	плавлении вещества						
13	Определение термодинамического коэффициента давления с помощью газового термометра			4			
14	Измерение коэффициента поверхностного натяжения			6		1	
	<i>Итого по модулю 2:</i>			32		4	...
	ИТОГО:			66		6	<i>Зачет</i>

Раздел III. Электричество и магнетизм

№ п/п	Разделы и темы дисциплины по модулям	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	...	Самостоятельная работа в т.ч. зачет, экзамен	
Модуль 1. (название модуля)								
1	Электромагнитные колебания в двухпроводной линии	3			6		2	Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
2	Изучение мощности переменного тока и сдвига фаз между током и напряжением с помощью ваттметра				6		4	
3	Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли				6		2	
4	Изучение явления резонанса напряжений в электрической цепи				6		4	
	<i>Итого по модулю 1:</i>			24		12		
5	Определение удельного заряда	3			6		4	Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
6	Изучение коэффициента самоиндукции и емкости конденсатора. Проверка Закона Ома				6		2	
7	Изучение электростатического поля				6		4	
8	Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла				6		2	
	<i>Итого по модулю 2:</i>			24		12		
9	Термоэлектричество. Эффект Зеебека	3			6		2	Устный опрос, контрольные

10	Изучение терморезисторов			6		4	вопросы, защита работ.
11	Определение частоты при помощи фигур Лиссажу			6		2	
12	Определение точки Кюри			6		4	
	<i>Итого по модулю 3:</i>			24		12	
	ИТОГО:			72		36	<i>Зачет</i>

Раздел IV. Оптика

№ п/п	Разделы и темы дисциплины по модулям	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	...	Самостоятельная работа в т.ч. зачет, экзамен	
	Модуль 1. (название модуля)							
1	Фотоэлектрический эффект	4			6		2	Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
2	Изучение явления поляризации света в параллельных лучах				6		4	
3	Определение длины световой волны с помощью бипризмы Френеля				6		2	
4	Изучение зонной пластинки				6		4	
	<i>Итого по модулю 1:</i>			24		12		
5	Изучения принципа работы лазера непрерывного действия	4			6		4	Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
6	Когерентность света				6		2	
7	Основы рефрактометрии				6		4	
8	Определение концентрации медного купороса и постоянной планка на основе исследования. Явления поглощения света в водных растворах				6		2	
	<i>Итого по модулю 2:</i>			24		12		
9	Вращение плоскости поляризации света в магнитном поле	4			6		2	Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
10	Определение качества поверхности с помощью интерферометра Линника				4		2	
11	Изучение градуировки монохроматора УМ-2 и снятие спектра излучения лампы накаливания				6		4	
12	Изучение естественного вращения плоскости поляризации				4		2	

13	Изучение законов теплового излучения				4		2	
	<i>Итого по модулю 3:</i>				24		12	
	ИТОГО:				72		36	<i>Зачет</i>

Раздел V. Физика атома

№ п/п	Разделы и темы дисциплины по модулям	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	...	Самостоятельная работа в т.ч. зачет, экзамен	
Модуль 1. (название модуля)								
1	Изучение спектра ртути	5			6		2	Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
2	Изучение спектра водорода				6		2	
3	Исследование спектра поглощения красителей с помощью фотометра				6		4	
4	Определение потенциалов возбуждения (опыты Франка и Герца)				8		2	
	<i>Итого по модулю 1:</i>				26		10	
5	Определение энергии диссоциации молекулы йода	5			8		4	Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.
6	Проверка закона Эйнштейна	5			8		4	
7	Определение потенциалов ионизации инертных газов с помощью осциллографа				8		4	
	<i>Итого по модулю 2:</i>				24		12	
	ИТОГО:				50		22	<i>Зачет</i>

Раздел VI. Физика атомного ядра и элементарных частиц

№ п/п	Разделы и темы дисциплины по модулям	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	...	Самостоятельная работа в т.ч. зачет, экзамен	
Модуль 1. (название модуля)								
1	Определение энергии и				6		4	Устный опрос,

	среднего пробега частиц в воздухе							контрольные вопросы, защита работ.
2	Пересчетное устройство типа Б-2.			6		2		
3	Определение верхней границы β спектра			6		4		
4	Измерение периода полураспада			6		2		
	<i>Итого по модулю 1:</i>			24		12		
5	Определение длины пробега α частицы в воздухе			6		4	Устный опрос, контрольные вопросы, защита работ.	
6	Особенности рассеяния электронов на атомах (опыт Рамзауэра)			6		4		
7	Определение удельной рефракции молекул			6		2		
8	Определение спектральной чувствительности полупроводникового фотоэлемента			6		2		
	<i>Итого по модулю 2:</i>			24		12		
	ИТОГО:			48		24	<i>Зачет</i>	

4.3. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам).

Содержание каждого раздела подробно описано в изданных материалах дисциплины "Общий физический практикум", где подробно к каждой работе приведены цели и задачи лабораторных работ и практических занятий, описание исследуемых процессов и явлений, необходимый теоретический аппарат для их анализа, используемое при измерениях оборудование, необходимые этапы измерений, контрольные вопросы для подготовки к защите работ.

4.3.1, 4.3.2. Содержание лекционных и практических занятий по дисциплине (не предусмотрено учебным планом)

4.3.3. Содержание лабораторных занятий по дисциплине

Содержание разделов дисциплины на примере раздела II.

Молекулярная физика

№ и названия разделов и тем	Цель и содержание лабораторной работы	Результаты лабораторной работы
Модуль 1		
Лабораторная работа №1. Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом	Изучение внутреннего трения – вязкости воздуха, как одного из явлений переноса в газах	Численно вычислить вязкость воздуха в лаборатории

Лабораторная работа №2. Определение коэффициента теплопроводности методом нагретой нити.	Изучение теплопроводности воздуха как одного из явлений переноса воздуха	Найти численное значение теплопроводности воздуха в лаборатории
Лабораторная работа №3. Определение коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара.	Изучение диффузии как одного из явлений переноса	Вывод расчетной формулы для определения коэффициента взаимной диффузии. Найти численное значение коэффициента взаимной диффузии.
Лабораторная работа №4. Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и объеме.	Определение отношения $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$	Вывести формулу для определения γ и вычислить экспериментально.
Лабораторная работа №5. Получение и измерение высокого вакуума.	Изучить принцип работы вакуумной установки (форвакуумной и диффузионной) и приборов для изучения вакуума	Получить вакуум $\sim 10^{-4}$ мм.рт.ст. Определить скорость откачки
Лабораторная работа №6. Определение теплоемкости твердых тел.	Определение теплоемкости образцов металлов колориметрическим методом	Вывести формулу для экспериментального определения теплоемкости ТТ и экспериментально найти зависимость теплоемкости от температуры
Модуль 2		
Лабораторная работа №7. Определение теплоты парообразования воды.	Определение удельной и молярной теплоты парообразования воды	Вывести основную рабочую формулу, используемую в данной работе и вычислить теплоту парообразования воды и насыщенного пара
Лабораторная работа №8. Определение изменения энтропии при нагревании и плавлении олова.	Ознакомление с понятием энтропии	Измерить изменения энтропии при увеличении температуры. Вывести расчетную формулу изменения ΔS и объяснить.
Лабораторная работа №9. Определение молярной массы и плотности газа методом откачки.	Ознакомление с методом определения молярной массы и плотности газа	Вывести расчетную формулу для определения молярной массы методом взвешивания
Лабораторная работа №10. Определение скрытой теплоты кристаллизации и плавления вещества.	Ознакомиться с определением удельной скрытой теплоты кристаллизации	Вывести формулу измерения удельной открытой теплоты кристаллизации и вычислить эту величину для олова

Лабораторная работа №11. Определение термодинамического коэффициента давления с помощью газового термометра	Определение термического коэффициента давления и абсолютной температуры таящего льда	Вывести формулу для определения термического коэффициента давления при любой температуре на этом основании найти абсолютную температуру тающего льда.
Лабораторная работа №12. Измерение коэффициента поверхностного натяжения.	Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости	Найти жидкость с наименьшим коэффициентом поверхностного натяжения.

5. Образовательные технологии

В процессе изучения дисциплины «Общий физический практикум» используются следующие методы обучения и формы организации занятий:

- лабораторные занятия, на которых обсуждаются основные проблемы, выполняемых работ, проводятся опросы по контрольным вопросам и порядке выполнения лабораторных работ, проверяются результаты (табличные данные, выводы) по проделанной работе;
- консультация преподавателя;
- самостоятельная работа студентов, которая включает освоение теоретического материала, подготовку к выполнению эксперимента по физическому практикуму.

При реализации программы «Общий физический практикум» используются следующие образовательные технологии:

- внеаудиторная работа в форме обязательных консультаций и индивидуальных занятий со студентами (помощь в понимании тех или иных методов исследования материалов, обработке результатов физического эксперимента и т.д.).

Курс построен на принципах системного подхода к отбору программного материала и определению последовательности его изучения студентами, что предусматривает глубокое изучение предметов за счет объединения занятий в блоки, т.е. реализуется технология концентрированного обучения. Для контроля усвоения программного материала учитывается работа студентов на лабораторных занятиях (результаты устного опроса, выполнение экспериментальной части работы, обработка результатов и отчет по результатам).

Для выполнения физического практикума изданы учебно-методические пособия и разработки по курсу общей физики, которые в сочетании с внеаудиторной работой способствуют формированию и развития профессиональных навыков обучающихся.

В рамках *лабораторного практикума* используется умение студентов производить расчеты с помощью средств вычислительной техники. Это позволяет существенно приблизить уровень статистической культуры обработки результатов измерений в практикуме к современным стандартам,

принятым в науке и производственной деятельности. На этих занятиях студенты уже на I курсе приобретают опыт общения с ЭВМ и использования статистических методов обработки результатов наблюдений, что совершенно необходимо для работы в специальных учебных и производственных лабораториях.

Для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов учебные занятия организуются с учетом индивидуальных возможностей обучающихся – с применением дистанционных образовательных технологий и средств удаленного доступа, с проведением консультаций в интерактивном режиме on-line (Skype) и (или) по электронной почте, с обеспечением электронными образовательными ресурсами (электронными пособиями, презентациями).

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Студентам предоставляется раздаточный материал: методическое пособие и литература по выполнению лабораторных работ, методическое пособие подготовленное сотрудниками, указанное в дополнительной литературе.

Учебно-методический комплекс по дисциплине, размещенный на сайте факультета.

При изучении курса в рамках самостоятельной работы используются: самостоятельное освоение отдельных вопросов теоретического курса.

Примерное распределение времени самостоятельной работы студентов

№ пп	Вид самостоятельной работы	Примерная трудоёмкость, ч.
Текущая СРС		
1.	Работа с лекционным материалом, с учебной литературой	6
2.	Опережающая самостоятельная работа (изучение нового материала до его изложения на занятиях)	8
3.	Самостоятельное изучение разделов дисциплины с использованием рекомендуемой литературы	4
4.	Подготовка к лабораторным занятиям	6
5.	Решение расчетных задач по темам лабораторных работ	8
6.	Выполнение реферата по отдельным разделам дисциплины	8
7.	Доклад, сообщение по представлению полученных результатов решения определенной учебно-исследовательской или научной темы	4
8.	Представление студентом наработанной информации по заданной тематике (презентация)	6

№ пп	Творческая проблемно-ориентированная СРС	Примерная трудоёмкость, ч.
1	Поисковая учебно-исследовательская деятельность с использованием современных информационных технологий	8
2	Овладение методами решения проблемных ситуаций, соответствующих актуальным задачам науки и практики	8
3	Инновационные технологии, преобразующие характер обучения в отношении целевой ориентации	8
4	Применение современных методических подходов и информационных средств для использования в учебно- и научно-поисковой деятельности студентов	8
5	Применение информационно-технологических средств, которые будут использоваться в организации самостоятельной деятельности студентов	8
6	Использовать проблемно-ориентированную систему добавленных знаний и умений, композиционные демонстрации физических экспериментов	8
7	Поиск, изучение и презентация информации по физике элементарных процессов в плазме газового разряда, анализ научных публикаций по заданной теме	10
8	Анализ литературных данных по содержанию работ физического практикума, выполнение расчётов, составление схем и моделей на основе собранных данных	8
9	Обработка результатов исследования по выполненной работе с применением современных ИКТ.	10
Итого СРС:		126

Итоговый контроль. Зачет в 1-6 семестрах, включающий проверку теоретических знаний и умение решения по всему пройденному материалу.

Содержание и объем самостоятельной работы студентов

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Форма самостоятельной работы	Кол-во часов	Форма контроля выполнения самостоятельной работы
1	2	3	4	5
1.	Механика. Содержание законов сохранения и их роль в природе. Изолированная система. Закон сохранения импульса. Работа силы. Закон сохранения механической энергии. Законы сохранения при столкновениях. Закон тяготения Ньютона. Сила тяжести. Ускорение свободного падения. Зависимость ускорения свободного падения от высоты над уровнем моря. Вес тела. Зависимость веса тела от широты местности.	Подготовка допуска к лабораторной работе	2	Опрос, контрольная работа, письменное домашнее задание.
2.	Молекулярная физика и термодинамика.	Подготовка	6	Опрос,

	<p>Уравнение вращательно движения твердого тела. Момент инерции. Свободные оси вращения, главные моменты инерции. Вычисление момента инерции относительно данной оси.</p> <p>Теорема Штейнера. Понятие о тензоре момента инерции.</p> <p>Колебательный процесс. Собственные и вынужденные колебания. Колебания с одной степенью свободы. Физический и пружинный маятники. Уравнение собственных колебаний.</p>	допуска лабораторной работе	к		контрольная работа, письменное домашнее задание.
3.	<p>Электричество и магнетизм.</p> <p>Закон Кулона. Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля как его силовая характеристика.</p> <p>Принцип суперпозиции.</p> <p>Проводники в электростатическом поле. Емкость проводника, емкость системы проводников, конденсаторы.</p>	Подготовка допуска лабораторной работе	к	36	Опрос, контрольная работа, письменное домашнее задание.
4	<p>Оптика.</p> <p>Электромагнитная природа света. Элементарная оптика. Немонохроматическое и хаотическое излучение. Распространение, преломление и отражение света в изотропных средах. Дисперсия и поглощение света. Геометрическая оптика и простейшие оптические приборы. Интерференция света. Интерференция при белом свете. Временная и пространственная когерентности. Интерферометр Фабри - Перо. Интерференционные фильтры. Интерференция света. Дифракция. Основы голографии. Распространение света в анизотропных средах. Оптика анизотропных сред. Рассеяние света. Закон Рэлея. Рассеяние Мандельштама – Бриллюэна. Генерация света. Экспериментальные законы излучения абсолютно черного тела. Лазеры. Нелинейные явления в оптике. Фотоэффект и его применения.</p>	Подготовка допуска лабораторной работе	к	36	Опрос, контрольная работа, письменное домашнее задание.

5.	Физика атома. Экспериментальные сведения о волновых и квантовых свойствах излучения и вещества. Модель атома Томсона. Модель атома Резерфорда. Свойства альфа-частиц. Эксперимент Резерфорда. Теория рассеяния альфа-частиц. Закономерности в атомных спектрах. Постулаты Бора. Опыт Франка и Герца. Природа спектральных термов. Спектры щелочных металлов. Ширина спектральных линий. Принцип Паули. Распределение электронов по энергетическим уровням атома. Рентгеновские спектры. Молекулярные спектры. Элементы квантовой механики. Гипотеза де-Бройля. Волновые свойства вещества. Волновая функция, ее свойства. Уравнения Шредингера. Соотношения неопределенностей. Одномерные задачи: свободное движение частицы; прямоугольная яма. Туннельный эффект. Принцип Паули.	Подготовка допуска к лабораторной работе	22	Опрос, контрольная работа, письменное домашнее задание.
6.	Физика атомного ядра и элементарных частиц Основы физики атомного ядра. Модель атома Томсона. Модель атома Резерфорда. Свойства α - частиц. Эксперимент Резерфорда. Атомное ядро. Состав и характеристики. Дефект массы и энергия связи ядра. Ядерные силы. Радиоактивность. Закон радиоактивного превращения. Радиоактивный распад. α , β распады. Спонтанное деление тяжелых ядер. Ядерные реакции. Деление ядер. Ядерный синтез. Термоядерная реакция. Элементарные частицы. Классификация элементарных частиц. Фундаментальные взаимодействия. Частицы и античастицы. Кварки.	Подготовка допуска к лабораторной работе	24	Опрос, контрольная работа, письменное домашнее задание.
	Итого:		126	

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы по отдельным разделам дисциплины указано в описаниях к выполнению лабораторных работ. Перечень основной и дополнительной учебной литературы по отдельным разделам общей физики, необходимой для освоения дисциплины дан в пункте 8.

7. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

7.1. Типовые контрольные задания

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ I "МЕХАНИКА"

1. Что такое материальная точка? Радиус-вектор материальной точки?

2. Чему равна мгновенная скорость при поступательном движении? Ускорение (прямолинейная и криволинейная траектория)?
3. Угловая скорость - модуль, направление, единица измерения? Угловое ускорение - модуль, направление, единица измерения?
4. В чем заключается 1-й закон Ньютона?
5. В чем заключается 2-й закон Ньютона?
6. В чем заключается 3-й закон Ньютона?
7. Что называют импульсом системы точки? Моментом импульса? Моментом силы?
8. Вращательное движение твердого тела. Вектор элементарного углового перемещения. Вектор угловой скорости.
9. Плоское движение абсолютно твердого тела. Разложение плоского движения на поступательное и вращательное. Мгновенная ось вращения.
10. Сформулируйте определение понятия "число степеней свободы". Приведите конкретные примеры степеней свободы.
11. Что такое момент инерции системы материальных точек относительно оси вращения? Чему равен момент инерции твердого тела относительно оси вращения?
12. Что называют работой силы (в том числе, в поле переменной силы) ?
13. Чему равна кинетическая энергия материальной точки? Твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси?
14. Что такое потенциальная энергия? Чему равна потенциальная энергия тела, поднятого над поверхностью Земли? Потенциальная энергия сжатой пружины?
15. Сформулируйте определение потенциального силового поля и докажите, что однородное и стационарное поле сил тяжести - потенциально.
16. В чем заключается закон сохранения импульса? Уточните понятие "изолированная система". Примеры?
17. В чем заключается закон сохранения момента импульса? Что значит "изолированная система". Примеры?
18. В чем заключается закон сохранения механической энергии? Что значит "изолированная система". Примеры?
19. Какие деформации называют упругими, а какие - пластическими? В чем состоит закон Гука?
20. Что характеризуют модуль Юнга и коэффициент Пуассона?
21. Запишите уравнение гармонического колебания - в тригонометрической комплексной форме. Объясните физический смысл обозначений. Как из периодичности \sin (\cos) вытекает связь периода колебаний с циклической частотой?
22. Что происходит при сложении сонаправленных гармонических колебаний одинаковой частоты? Как зависит амплитуда результирующего колебания от разности начальных фаз?

23. Что происходит при сложении взаимно-перпендикулярных гармонических колебаний одинаковой частоты? Как зависит траектория материальной точки от разности начальных фаз?
24. Что такое гармонический осциллятор? Как из закона Гука вытекает уравнение гармонических колебаний пружинного маятника? Как из основного закона динамики твердого тела вытекает уравнение гармонических колебаний физического маятника? Математического маятника?
25. Чему равна энергия гармонического осциллятора?
26. Как из 2-го закона Ньютона для пружинного маятника с учетом сил трения вытекает уравнение затухающих колебаний? Что такое "апериодическое движение"?
27. В чем заключается явление резонанса? Получите выражение для амплитуды вынужденных колебаний (внешняя сила меняется по гармоническому закону).
28. Что называют резонансной частотой? Как получить выражение для резонансной частоты из формулы для амплитуды вынужденных колебаний?
29. Что такое волна? Что называют плоской волной? Запишите волновое уравнение и уравнение плоской волны (как дифференциальное уравнение и его решения).
30. В чем заключается явление интерференции волн? Как происходит перераспределение энергии при интерференции? Что такое когерентные источники? Когерентные волны?
31. Как возникают стоячие волны? Получите выражение для стоячей волны. Почему стоячей волной не переносится энергия?
32. Чем объясняется звучание струн и воздушных столбов (струнные и духовые музыкальные инструменты)?
33. Как ограничена область слышимости звуковых волн (по интенсивности и частотному диапазону)?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ II "МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА"

1. В чем заключается особенность поведения системы, состоящей из большого числа частиц? Объясните результаты опыта с доской Гальтона, броуновское движение.
2. Что называют равновесным состоянием системы? Что такое флуктуация?
3. Что называют теплотой? Температурой?
4. Что такое термометр?
5. Что такое атомная единица массы? Число Авогадро? Что такое моль?
6. Как определить число молекул некоторой массы известного вещества?
7. Какими свойствами реальных молекул пренебрегают, формируя модель идеального газа?

8. Что называют идеальным газом? Какому эмпирическому закону строго подчиняется идеальный газ?
9. Какие изопроцессы вы знаете? Как выглядят графики изопроцессов в осях (V,P) , (P,T) , (T,V) ?
10. Как связаны макропараметры идеального газа (P,T) с микрохарактеристикой одной молекулы?
11. Как статические законы описывают поведение совокупности молекул? В чем заключается закон распределения молекул по скоростям (Максвелла)? Как выглядят графики этого распределения для различных температур?
12. Что такое наиболее вероятная скорость? Как получается выражение для наиболее вероятной скорости?
13. Что такое средняя скорость молекул? Как получается выражение для средней скорости из закона распределения Максвелла?
14. Что такое средняя квадратичная скорость молекул? Как получить выражение для нее?
15. Что такое число степеней свободы? В чем заключается теорема Максвелла-Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы?
16. Чему равна внутренняя энергия идеального газа?
17. В чем заключается Первое начало термодинамики? Как этот закон записывается для различных изопроцессов?
18. Что такое теплоемкость? Удельная? Молярная? Теплоемкость при постоянном объеме и постоянном давлении?
19. Какой процесс называют адиабатическим? Как изменяется температура идеального газа при адиабатическом расширении? Сжатии? Получите уравнение, связывающее давление и объем идеального газа при адиабатическом процессе.
20. Как из определения механической работы получают выражение для работы газа? Как выглядит уравнение для работы газа (общий случай)? Для различных изопроцессов?
21. Что такое цикл Карно? Получите выражение для КПД цикла Карно. Чему равен КПД реальной тепловой машины?
22. Что такое приведенная теплота? Запишите равенство Клаузиуса для произвольного обратимого цикла. Как из этого соотношения вводится понятие энтропии?
23. Как записать неравенство Клаузиуса для необратимого процесса? Как изменяется энтропия изолированной системы при обратимых и необратимых процессах?
24. Что такое термодинамическая вероятность? Как она связана с энтропией системы? Приведите примеры к утверждению: "Энтропия-мера беспорядка ."
25. Как выглядит график цикла Карно в осях (S,T) ?

26. Как изменяется энтропия куска льда при минусовой температуре, когда в результате нагревания он превращается в пар (при нормальном давлении). Получите формулу для ΔS .
27. Запишите уравнение Ван-дер-Ваальса. Какие свойства реального газа описывают поправки к уравнению Менделеева-Клапейрона?
28. Как выглядят изотермы Ван-дер-Ваальса для различных температур? Сравните их с эмпирическими изотермами. Что такое квазистабильное и нестабильное состояния?
29. Что такое критическое состояние вещества? Каковы его параметры?
30. Как уравнение Клайперона-Клаузиуса связывает давление и температуру фазового перехода?
31. Чему равна внутренняя энергия реального газа? Как изменяется температура идеального и реального газов при адиабатическом расширении в пустоту?
32. В чем заключается эффект Джоуля-Томпсона? Как это явление используется для получения жидких газов?
33. Что вы знаете о свойствах и строении жидкости? Что такое сфера действия молекулярных сил?
34. Что такое поверхностное натяжение? Коэффициент поверхностного натяжения? Поверхностно-активные вещества? Адсорбция?
35. Чему равна энергия поверхностного слоя жидкости? Как зависит поверхностное натяжение от температуры?
36. Выведите формулу Лапласа (связь между кривизной поверхности жидкости и добавочным давлением).
37. Чем объясняется явление смачивания (несмачивания) в системах: жидкость - жидкость; жидкость - твердое тело?
38. Чем объясняются явления капиллярности? Как зависит высота поднятия жидкости от радиуса капилляра?
39. В чем особенность строения твердых (т.е. кристаллических) тел? Что такое кристаллическая анизотропия?
40. Чему равна теплоемкость твердых тел? В чем заключается закон Дюлонга и Пти?
41. Что такое фазовые переходы первого и второго рода? Что такое возгонка? Плавление? Испарение?
42. Что такое диаграмма состояний? Приведите диаграмму состояний воды? Что такое тройная точка на этой диаграмме?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ III "ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ"

1. В чем заключается закон Кулона?
2. Что такое вектор напряженности электрического поля? Сформулируйте принципы суперпозиции для вектора E ? Что такое силовая линия вектора E ?

3. Как вычислить вектор E , созданный системой точечных зарядов? Непрерывным распределением заряда?
4. В чем заключается теорема Остроградского-Гаусса для вектора E в вакууме? Доказательство теоремы?
5. Как применяется теорема Остроградского-Гаусса для определения вектора E , созданного непрерывным распределением зарядов (бесконечно длинная нить, бесконечно большая заряженная плоскость и др.)?
6. Работа поля по перемещению точечного заряда q' в поле, созданном точечным зарядом q ?
7. Что такое разность потенциалов? Связь ее с вектором E ? Как вычислить потенциал поля, созданный дискретным распределением точечных зарядов? Непрерывным распределением зарядом?
8. Что Вы знаете об электростатическом поле в проводниках? Где локализованы электрические заряды в проводнике? Докажите, что заряженный проводник - эквипотенциальный объем.
9. Чему равно электрическое поле у поверхности проводника? Его направление?
10. Что такое конденсатор? Емкость конденсатора? Как вычислить и чему равна емкость плоского, цилиндрического, сферического конденсатора?
11. Чему равна энергия заряженного конденсатора (получите это выражение)? Где локализована энергия заряженного конденсатора? Получите выражение для объемной плотности энергии электрического поля?
12. Что такое диэлектрик? Электрический диполь, электрический момент диполя?
13. Что происходит с электрическим диполем в однородном электрическом поле? В неоднородном поле?
14. Что такое вектор поляризации? Диэлектрическая восприимчивость?
15. Что такое вектор электрического смещения (индукции) D ? Что такое диэлектрическая проницаемость изотропного диэлектрика?
16. Как изменяется емкость конденсатора при заполнении его диэлектриком? Почему?
17. Что такое сегнетоэлектрик? Петля гистерезиса? Сегнетоэлектрик как элемент памяти?
18. В чем заключается прямой пьезоэффект? Обратный? Применение пьезоэффекта в гидроакустике.
19. Сформулируйте законы электростатики в диэлектрике: закон Кулона, напряженность электрического поля, разность потенциалов, теорема Гаусса (для вектора)); объемная плотность энергии?
20. Что такое электрический ток? Сила тока? Плотность тока?

21. Сформулируйте закон Ома для однородной цепи в интегральной форме, в дифференциальной?
22. Как сопротивление проводника зависит от температуры? В чем заключается явление сверхпроводимости?
23. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца: а) в интегральной форме; б) в дифференциальной форме.
24. Что такое электродвижущая сила? Запишите закон Ома для участка цепи с источником.
25. В чем заключается I правило Кирхгофа (закон сохранения заряда)?
26. В чем заключается II правило Кирхгофа? Сформулируйте правило знаков для напряжений и ЭДС при составлении уравнений Кирхгофа для замкнутых контуров.
27. Полупроводники - собственная и примесная проводимость полупроводников p - и n -типа (акцепторы и доноры).
28. Что такое p - n переход? Как возникает контактное поле в области p - n перехода? Принцип действия полупроводникового диода.
29. В чем заключается закон Био-Савара-Лапласа? Что такое напряженность и индукция магнитного поля? Принцип суперпозиции для векторов B , H и i
30. Как вычислить поле в центре кругового витка с током, используя закон Био-Савара-Лапласа и принцип суперпозиции?
31. В чем заключается теорема о циркуляции вектора H
32. Как применяется теорема о циркуляции вектора H для вычисления поля прямого проводника с током? Поля полого и сплошного цилиндра стоком? Поля коаксиального кабеля?
33. Как ведет себя проводник с током в магнитном поле (сила Ампера); заряд, движущийся в магнитном поле (сила Лоренца)? Контур с током в магнитном поле?
34. Что такое Ампер (единица силы тока)? Дайте полное определение.
35. в чем заключается явление электромагнитной индукции Фарадея? Чему равна индуцированная ЭДС?
36. В чем заключается правило Ленца?
37. Принцип действия генератора переменного тока?
38. В чем заключается явление самоиндукции? Что такое индуктивность? Вычислите индуктивность тороида? Длинного соленоида?
39. Чему равна энергия магнитного поля? Объемная плотность энергии магнитного поля?
40. Что называют магнетиком? В чем заключается диа- и парамагнетизм? Ферромагнетизм?
41. Что такое магнитный момент рамки с током? Что такое вектор намагничивания (J)? Что такое магнитная восприимчивость (χ)? Что такое магнитная проницаемость?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ IV "ОПТИКА"

1. Запишите уравнения Максвелла и объясните их физическую суть. Какой физический смысл имеет электродинамическая постоянная?
2. Какова структура плоской электромагнитной волны?
3. Запишите формулу тонкой линзы. Что называется aberrацией линз?
4. В чем заключается явление интерференции волн?
5. При каких условиях наблюдается интерференция световых волн?
6. Почему порядок интерференции в опыте с параллельной пластиной наибольший при нормальном падении лучей на нее?
7. Запишите связь между оптической разностью хода и разностью фаз двух лучей.
8. В чем состоит разница между явлениями интерференции и дифракции? В чем заключается их единство?
9. Запишите и объясните физический смысл для синфазности колебаний, условие усиления и ослабления интенсивности света при интерференции.
10. Какие основные методы существуют для получения интерференционных картин?
11. В опыте Юнга ширина между щелями равна a , длина волны равна λ . Определить максимально возможное число интерференционных полос, если размеры экрана неограниченны ($a = 1 \text{ мм}$, $\lambda = 5000 \text{ \AA}$).
12. В чем состоит разница между полосами равного наклона и равной толщины? Приведите примеры.
13. Сделайте вывод формулы для преломляющего угла бипризмы Френеля.
14. Что понимают под порядком интерференции?
15. Как устроен многолучевой интерферометр Фабри-Перо? Каковы области его применения?
16. В чем заключается явление дифракции световых волн?
17. Объясните, в чем состоит метод Френеля. Что такое зонная пластинка?
18. Что называют дифракцией Фраунгофера?
19. Каковы спектральные характеристики дифракционных решеток?
20. Приведите виды поляризации световых волн.
21. Поляризационные приборы: призма Николя, дихроизм.
22. Формула Брюстера. Полное внутреннее отражение. Волоконная оптика.
23. Распространение света в проводящих средах. Основы металлооптики.
24. Распространение света в анизотропных средах. Тензор диэлектрической проницаемости. Двойное лучепреломление.
25. Какое излучение называют тепловым? Что такое абсолютно черное тело? Можно ли Солнце назвать абсолютно черным телом?
26. Элементарная квантовая теория теплового излучения. Коэффициенты Эйнштейна и связь между ними.

27. Лазеры. Принципиальная схема. Условие стационарной генерации. Способы модуляции добротности. Моды.
28. Твердотельный лазер на рубине. Четырехуровневые схемы ОКГ.
29. Газовый лазер на смеси He-Ne. Объясните механизм создания инверсной заселенности энергетических состояний.
30. В чем состоят основные положения нелинейной оптики?
31. Приведите примеры кристаллических материалов, применяемых в нелинейной оптике.
32. Опишите механизм генерации второй гармоники. В чем состоит условие фазового синхронизма?
33. Самовоздействие света в нелинейной среде.
34. Каковы физические основы голографии?
35. В чем заключается эффект Доплера в оптике (продольный и поперечный)?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ V " ФИЗИКА АТОМА "

Развитие атомистических представлений об излучении

1. Тепловое равновесное излучение. Испускательная и поглощательная способности тела. Абсолютно черное тело. Законы теплового излучения: законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и Вина. Формула Рэлея-Джинса. "Ультрафиолетовая катастрофа".
2. Гипотеза квантов энергии. Формула Планка и следствия, вытекающие из нее. Внешний фотоэффект. Законы фотоэффекта.
3. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и его экспериментальная проверка. Внутренний фотоэффект.
4. Фотоны, их энергия, масса и импульс. Эффект Комптона. Природа электромагнитного излучения.

Волновые свойства частиц

5. Корпускулярно-волновая двойственность свойств электромагнитного излучения.
6. Гипотеза де Бройля о двойственной корпускулярно-волновой природе частиц вещества и ее подтверждение. (Опыт Девиссона и Джермера).
7. Свойства волн де Бройля.
8. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Строение атома и теория Бора

9. Спектральные серии атома водорода. Атомные спектры и их закономерности. Постоянная Ридберга. Обобщенная формула Бальмера. Спектральные термы. Комбинационный принцип Риза.
10. Модель атома Томсона и ее неприменимость для описания линейчатых оптических спектров.
11. Ядерная модель атома (модель Резерфорда). Опыты Резерфорда по рассеянию альфа- частиц. Формула Резерфорда. Планетарная модель атома, ее проверка и ее недостатки.

12. Квантовые постулаты Бора и их экспериментальное подтверждение. (Опыт Франка и Герца).
13. Элементарная боровская теория атома водорода. Теория строения водородоподобных атомов по Бору. Учет движения ядра в теории Бора.
14. Магнитные свойства атома в теории Бора. Недостатки теории Бора.

Физические основы квантовой механики

15. Основные положения квантовой механики. Операторы в квантовой механике (Волновая функция, ее нормировка, средние значения, операторы импульса и энергии).
16. Операторы важнейших физических величин : оператор координаты, оператор импульса, оператор вектора импульса, оператор момента импульса, оператор квадрата момента импульса, оператор проекции момента импульса, оператор кинетической энергии, оператор потенциальной энергии, оператор полной энергии.
17. Волновое уравнение Шредингера. Временное и стационарное уравнения Шредингера.
18. Движение свободной частицы в одномерной потенциальной яме. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме. Гармонический осциллятор в квантовой механике.
19. Прохождение частиц через прямоугольный потенциальный барьер. Коэффициенты отражения и прозрачности. Туннельный эффект.
20. Квантово-механическое описание атома водорода: уравнение Шредингера, энергия, квантовые числа, энергетический спектр.
21. Электрон в водородоподобном атоме. $1s$ – состояние электрона в атоме водорода.
22. Энергетический спектр электрона. Квантовые числа: главное, орбитальное и магнитное орбитальное.

Орбитальный, спиновый и полный механический и магнитный моменты электрона в атоме

23. Орбитальный момент количества движения, магнитный орбитальный момент. Спин электрона. Опыт Штерна и Герлаха.
24. Нормальное и возбужденные состояния атома водорода.
25. Снятие вырождения состояний в атоме водорода: снятие вырождения состояний по магнитному квантовому числу, снятие вырождений по орбитальному квантовому числу.
26. Собственный момент количества движения электрона (спин), магнитный спиновый момент. Спиновое и магнитное спиновое квантовые числа.
27. Полный механический момент электрона, полный и эффективный магнитные моменты. Внутреннее и магнитное внутреннее квантовые числа. Фактор Ланде.
28. Спин - орбитальное взаимодействие. Тонкая структура спектра.

Структура и спектры сложных атомов

29. Определение энергетических состояний электронов в сложных атомах. Сложение моментов и типы связи электронов в атоме.
30. Застройка электронных оболочек в атоме. Принцип Паули. Периодическая система элементов Менделеева. Правило Хунда. Оптические спектры сложных атомов.
31. Энергетические уровни и оптический спектр атома во внешнем постоянном Магнитном поле. (Нормальный и аномальный эффект Зеемана, эффект Пашена- Бака).

Молекулярные спектры

32. Элементарные сведения о строении молекул. Энергия молекулы. Особенности молекулярных спектров.
33. Квантование колебательных и вращательных уровней молекул. Спектры поглощения и комбинационного рассеяния света.

Рентгеновское излучение.

34. Рентгеновское излучение. Открытие рентгеновских лучей. Рентгеновские спектры. Закон Мозли.
35. Дифракция и интерференционное отражение рентгеновских лучей. Уравнение Лауэ. Условие Вульфа-Брэгга. Вынужденное излучение. Элементы физики лазеров.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ VI

"ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ"

1. Каковы порядки величин в ядерной физике (радиус ядра, радиус действия ядерных сил, радиус нуклона)?
2. Какова зависимость радиуса ядра от массового числа?
3. Плотность распределения заряда в ядре. Характер движения нуклонов в ядре.
4. Формфактор ядра. Сдвигается ли первый минимум формфактора с ростом массового числа ядра? В чём причина резкого уменьшения формфактора с ростом переданного импульса?
5. Оболочечная структура ядра. Магические числа.
6. Особенности движения нуклонов в самосогласованном потенциале.
7. Почему для зондирования атомных ядер используются электроны? Какую энергию должны иметь электроны?
8. Как изменится дифференциальное сечение рассеяния релятивистских электронов на ядре ${}^8_{16}\text{O}$, если предположить, что весь заряд этого ядра сосредоточен в одной точке?
9. Спины и четности основных состояний ядер.
10. Оценить энергетическое расстояние между соседними осцилляторными оболочками в ядрах с $A=40$ и $A=200$.
11. Определить спин и четность основных состояний изотопов циркония с $A = 86 - 94$.
12. Явление радиоактивности. Определение и основные характеристики.

13. Основной закон радиоактивного распада. Активность препарата.
14. Какие существуют способы определения периода полураспада изотопов?
15. Чем отличается определение периода полураспада долгоживущих изотопов от короткоживущих?
16. Показать, что средняя продолжительность жизни радиоактивного ядра обратно пропорционально постоянной радиоактивного распада для этого ядра.
17. Решить систему уравнений законов сохранения энергии и импульса для распада положительного л;+-мезона.
18. Определение ядерной реакции. Экзотермические и эндотермические реакции.
19. Порог реакции. Вывод формулы для пороговой энергии.
20. Законы сохранения в ядерных реакциях.
21. Формула Брейта-Вигнера. Чем объясняется резкое увеличение сечения резонансной реакции при малых энергиях резонанса.
22. Реакции через составное ядро (время реакции, сечение реакции, угловое распределение продуктов реакции, количество участвующих в реакции нуклонов, в каком месте ядра-мишени происходит резонанс).
23. Прямые реакции (время реакции, сечение реакции, угловое распределение продуктов реакции, количество участвующих в реакции нуклонов, в каком месте ядра-мишени происходит резонанс).
24. Определение и основные особенности альфа-распада. Энергетический спектр альфа-частиц. Закон Гейгера-Нэттола. Одночастичная модель альфа-распада
25. Особенности пробега альфа-частиц в поглотителе, кривая прохождения, средний пробег и его графическое определение.
26. Основные процессы взаимодействия альфа-частиц с веществом, разброс пробегов альфа-частиц в поглотителе, причины страгглинга.
27. Показать, что основная часть энергии, выделяемая при альфа-распаде ядер, уносится альфа-частицей.
28. Сколько альфа-частиц за 1 сек. испускает 1 г препарата $^{238}\text{92U}$, если его период полураспада равен $4,5 \cdot 10^9$ лет.
29. Бета-распад, его особенности. Три типа бета-распада. Простые и сложные распады.
30. Энергетический спектр бета-распада, разрешённые и запрещённые распады.
31. Влияние заряда ядра на форму энергетического бета-спектра.
32. Теория бета-распада.
33. Процессы взаимодействия бета-частиц с веществом. Особенности прохождения электронов через фольги.
34. Рассчитать максимальную энергию электронов B -распада ^{15}P .

35. Определить энергию отдачи ядра лития, образующегося в основном состоянии в результате К-захвата из ядра ${}^7_3\text{Li}$.
36. Определить энергию отдачи ядра ${}^{22}_{11}\text{Na}$, образующегося в основном состоянии из ядра ${}^{22}_{10}\text{Ne}$ в результате К-захвата.
37. Электрон с энергией 1 МэВ имеет пробег в алюминии, равный 1.5 мм . Оценить величину его пробега в воздухе и воде.
38. Что такое космические лучи?
39. Состав космических лучей. Мягкая и жесткая компоненты космических лучей.
40. Угловое распределение жесткой компоненты космических лучей на уровне моря.

7.2. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.

Общий результат выводится как интегральная оценка, складывающаяся из текущего контроля - 50% и промежуточного контроля - 50%.

Текущий контроль по дисциплине включает:

- посещение занятий и наличие конспекта - 15 баллов
- получение допуска к выполнению работы - 20 баллов.
- выполнение работы и отчета к ней - 25 баллов.
- защита лабораторной работы - 40 баллов

Промежуточный контроль по дисциплине включает:

- устный опрос - 60 баллов,
- защита текущей работы работы - 30 баллов,
- таблица результатов - 10 баллов.

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который: 1) выполнил все предусмотренные программой курса лабораторные работы; 2) глубоко, осмысленно усвоил программный материал в полном объеме, излагал его на лабораторных занятиях и зачете на высоком научном уровне, изучил основную и дополнительную рекомендуемую литературу; 3) при ответе допускал отдельные неточности в освещении второстепенных вопросов, но легко устранял их после замечания преподавателя; 4) отчитался по всем изученным темам на лабораторных занятиях.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который: 1) имеет существенные задолженности по выполнению и защите лабораторных работ; 2) имеет существенные пробелы в знании учебного материала, не может раскрыть основных теоретических положений и понятий; 2) не освоил работу с лабораторными установками и измерительными приборами; 3) не отчитался по темам, рассмотренным на лабораторных занятиях.

(от 51 и выше - зачет).

Требования к зачету

В конце каждого из семестров изучения дисциплины студент должен получить зачет по соответствующему разделу курса по результатам работы в лаборатории. Для получения зачета студенту необходимо выполнить экспериментальную часть, выполнить обработку полученных результатов, сдать отчеты по всем лабораторным работам и сдать устные и электронные допуски к лабораторным работам.

8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.

а) адрес сайта курса (образовательный портал ДГУ).

1. Курбанисмаилов В.С. Специальный физический практикум по ядерной физике. <http://edu.dgu.ru/course/view.php?id=873>
2. Гаджиев С.М. Оптика. Часть I. Методическое пособие.
3. Гаджиев С.М. Оптика. Часть II. Методическое пособие.
4. Магомедов М.А. Методы математического моделирования. Методическое пособие.
5. Магомедов М.А. Молекулярная физика. Часть 1. Методическое пособие.
6. Магомедов М.А. Молекулярная физика. Часть 2. Методическое пособие.

Раздел I. МЕХАНИКА

а) основная литература:

1. Стрелков, Сергей Павлович. Механика: учебник / Стрелков, Сергей Павлович. - Изд. 4-е, стер. - СПб. [и др.] : Лань, 2005. - 559 с. : ил. ; 22 см. - (Лучшие классические учебники. Физика) (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 5-8114-0622-3 : 410-30.
2. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А.. -Механика. АCADEMA. М.; 1997, 2011 (Университетский курс общей физики).
3. Матвеев, Алексей Николаевич. Механика и теория относительности : учеб. пособие / Матвеев, Алексей Николаевич. - Изд. 4-е, стер. - СПб. [и др.] : Лань, 2009. - 324,[12] с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0965-5 : 390-06.
4. Хайкин, Семён Эммануилович. Физические основы механики : учеб. пособие / Хайкин, Семён Эммануилович. - Изд. 3-е, стер. - СПб. [и др.] : Лань, 2008. - 754,[14] с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0895-5 : 489-94.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. СПб.; «Лань», 2006.
6. Общий физический практикум. Механика. Под редакцией А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселёва. М.; Изд. Моск. Университета, 1991.
7. Механика. Общий физический практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Исатаев [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Алматы: Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 2014. — 210 с. — 978-601-04-0462-5. — Режим

доступа: <http://www.iprbookshop.ru/58710.html> (дата обращения: 07.09.2022)

8. Барсуков В.И. Физика. Механика [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям / В.И. Барсуков, О.С. Дмитриев. — Электрон. текстовые данные. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 248 с. — 978-5-8265-1441-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/63918.html> (дата обращения: 07.09.2022))
9. Повзнер А.А. Физика. Базовый курс. Часть 1 [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.А. Повзнер, А.Г. Андреева, К.А. Шумихина. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 168 с. — 978-5-7996-1701-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/68406.html> (дата обращения: 07.09.2022)
10. Зюзин А.В. Физика. Механика [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / А.В. Зюзин, С.Б. Московский, В.Е. Туров. — Электрон. текстовые данные. — М. : Академический Проект, 2015. — 436 с. — 978-5-8291-1745-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/36623.html> (дата обращения: 07.09.2022))

б) дополнительная литература:

1. Зисман, Гирш Абрамович. Курс общей физики : в 3-х т.: учеб. пособие. Т.1 : Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны / Зисман, Гирш Абрамович, О. М. Тодес. - 7-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2007. - 339 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Допущено МО РФ. - ISBN 978-5-8114-0752-1 : 371-36.
2. Иродов, Игорь Евгеньевич. Механика: основные законы / Иродов, Игорь Евгеньевич. - 8-е изд., стер. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. - 309 с. - Рекомендовано МО РФ. - ISBN 5-94774-413-9 : 80-85.
3. Савельев, Игорь Владимирович. Курс общей физики : в 3-х т. Т.1 : Механика. Молекулярная физика / Савельев, Игорь Владимирович. - 10-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2008. - 432 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Допущено МО РФ. - ISBN 978-5-8114-0629-6 : 350-02.
4. Бондарев, Борис Владимирович. Курс общей физики : [в 3-х кн.: учеб. пособие]. Кн.1 : Механика / Бондарев, Борис Владимирович, Н. П. Калашников. - Изд. 2-е, стер. - М. : Высш. шк., 2005. - 351,[1] с. - Рекомендовано МО РФ. - ISBN 5-06-004603-6 : 280-50.
5. Фриш, Сергей Эдуардович. Курс общей физики : учебник: в 3-х т. Т.1 : Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны / Фриш, Сергей Эдуардович, А. В. Тиморева. - Изд. 12-е, стер. -

- СПб. [и др.] : Лань, 2007. - 470 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике) (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0662-3 (Общий) : 330-00.
6. Зюзин А.В. Физика. Механика [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / А.В. Зюзин, С.Б. Московский, В.Е. Туров. — Электрон. текстовые данные. — М. : Академический Проект, 2015. — 436 с. — 978-5-8291-1745-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/36623.htm> (дата обращения: 07.09.2022))

Раздел II. Молекулярная физика

а) основная литература:

1. Кикоин, Абрам Константинович. Молекулярная физика : учеб. пособие / Кикоин, Абрам Константинович, И. К. Кикоин. - Изд. 3-е, стер. - СПб. [и др.] : Лань, 2008, 2007. - 480 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике) (Учебники для вузов. Специальная литература). - Допущено МО РФ. - ISBN 978-5-8114-0737-8 : 330-00.
2. Матвеев, Алексей Николаевич. Молекулярная физика : учеб. пособие / Матвеев, Алексей Николаевич. - 4- е изд., стер. - СПб;М;Краснодар : Лань, 2010. - 671-88.
3. Сивухин, Дмитрий Васильевич. Общий курс физики : Учеб. пособие для физ. специальностей вузов: В 5- ти т. Т.2 : Термодинамика и молекулярная физика / Сивухин, Дмитрий Васильевич. - 4-е изд., стер. - М. : ФИЗМАТЛИТ; МФТИ, 2003. - 575 с. : ил. - ISBN 5-9221-0226-5 : 239-00.
4. Краткий курс общей физики [Электронный ресурс]: учебное пособие/ И.А. Старостина [и др.].- Электрон. текстовые данные.- Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2014.- 376 с.- Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/63716.html>.- ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 07.09.2022)
5. Никеров В.А. Физика для вузов. Механика и молекулярная физика [Электронный ресурс] : учебник / В.А. Никеров. — Электрон. текстовые данные. — М. : Дашков и К, 2015. — 136 с. — 978-5-394-00691-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/14630.html> (дата обращения: 07.09.2022))
6. Ташлыкова-Бушкевич И.И. Физика. Часть 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] : учебник / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Вышэйшая школа, 2014. — 304 с. — 978-985-06-

2505-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/35562.html> (дата обращения: 07.09.2022)

7. Елканова Т.М. Практикум по молекулярной физике [Электронный ресурс]: учебное пособие / Т.М. Елканова. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. — 146 с. — 978-5-4486-0201-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/72811.html> (дата обращения: 07.09.2022))

б) дополнительная литература:

1. Савельев, Игорь Владимирович. Курс общей физики : в 5 кн. Кн.3 : Молекулярная физика и термодинамика / Савельев, Игорь Владимирович. - М. : Астрель: АСТ, 2005. - 208 с. : ил. - ISBN 5-17-008962-7 (АСТ) : 150-00.
2. Савельев, Игорь Владимирович. Курс общей физики : в 3-х т. Т.1 : Механика. Молекулярная физика / Савельев, Игорь Владимирович. - 10-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2008. - 432 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Допущено МО РФ. - ISBN 978-5-8114-0629-6 : 350-02.
3. Физический практикум /Под ред. проф. В.И. Ивероновой – М.: Наука, 1967.
4. Магомедов Х.А. Учебное пособие по выполнению лабораторных работ по молекулярной физике. Часть 1, часть 2, 2004г.
5. Магомедов Х.А. Методическое пособие по выполнению лабораторных работ по молекулярной физике, часть 1, часть 2, 2003г.
6. Механика и молекулярная физика [Электронный ресурс] : практикум / И.А. Лыков [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 104 с. — 978-5-7996-1667-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66554.html> (дата обращения: 07.09.2022))

Раздел III. Электричество и магнетизм

а) Основная литература:

1. Калашников, Сергей Григорьевич. Электричество : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов] / Калашников, Сергей Григорьевич. - 6-е изд., стер. - М. : Физматлит, 2004. - 624 с. : ил. ; 22 см. - Предм. указ.: с. 621-624. - Допущено МО РФ. - ISBN 5- 9221-0312-1 : 298-54.
2. Матвеев, Алексей Николаевич. Электричество и магнетизм : учеб. пособие / Матвеев, Алексей Николаевич ; 3-е изд., стер. - СПб; М ;Краснодар : Лань, 2010. - 671-88.
3. Сивухин, Дмитрий Васильевич. Общий курс физики : [В 5 т.: учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. Оптика / Сивухин, Дмитрий Васильевич ; Т.3. - 3-е изд., стер. - М.; Долгопрудный : Физматлит;

- Изд-во МФТИ, 2005. - 791 с. : ил. ; 22 см. - Рекомендовано МО РФ. - ISBN 5-9221-0228-1 : 262-02.
4. Козлов В.И. "Общий физический практикум" изд. МГУ, 2009г.
 5. Электромагнетизм : учеб.-метод. пособие по курсу общ. физики / [сост.: В.С. Курбанисмаилов, М.А. Гираев]; Минобрнауки России, Дагест. гос. ун-т. - Махачкала : Изд-во ДГУ, 2013. - 149 с. - 97-00.
 6. Мешков И.Н. Электромагнитное поле. Часть 1. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] / И.Н. Мешков, Б.В. Чириков. — Электрон. текстовые данные. — Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2014. — 544 с. — 978-5-93972-979-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28923.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
 7. Экономова Л.Н. Физика. Темы 1-4. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] : сборник тестов и задач / Л.Н. Экономова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский Дом МИСиС, 2015. — 132 с. — 978-5-87623-877-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/56604.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
 8. Елканова Т.М. Практикум по курсу «Электричество и магнетизм» [Электронный ресурс] : учебное пособие / Т.М. Елканова. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2017. — 255 с. — 978-5-4486-0148-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/71578.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
 9. Латышенко К.П. Технические измерения и приборы. Часть I [Электронный ресурс] : учебное пособие / К.П. Латышенко. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Вузовское образование, 2013. — 480 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20403.html> (дата обращения: 07.09.2022)).

б) Дополнительная литература:

1. Савельев, Игорь Владимирович. Курс физики : учеб. пособие: [в 3-х т.]. Т.2 : Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика / Савельев, Игорь Владимирович. - 4-е изд., стер. - СПб.и др. : Лань, 2008. - 467 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Допущено НМС. - ISBN 978-5-8114-0686-9 : 350-02.
2. Гираев М.А., Курбанисмаилов В.С. Электромагнетизм. Махачкала, 2010.

3. Дациев М.И. Рабочие программы и опорный конспект по курсу "Электричество и магнетизм" Махачкала 1999г.
4. Дациев М.И. Гираев М.А. Методические указания к лабораторным работам по электричеству" Махачкала 1998г.
5. Гусейханов М.К., Исаев М.А., Гуйдалаева Т.А. Электричество и магнетизм /Методические указания к лабораторным работам по электричеству. Махачкала 2011 132 с.
6. Электричество и магнетизм : рабочие программы и опорный конспект / [сост.: М.К. Гусейханов, У.Г.-Г. Магомедова]; Минобрнауки России, Дагест. гос. ун-т. - Махачкала : Изд-во ДГУ, 2013. - 94 с. - 64-00.
7. **Калашников, Николай Павлович.** Физика: Интернет-тестирование базовых знаний : [учеб. пособие] / Калашников, Николай Павлович, Н. М. Кожевников. - СПб. [и др.]: Лань, 2009. - 149,[11] с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0925-9 : 142-56. (26 экз).

Раздел IV. ОПТИКА

а) Основная литература

1. Сивухин, Дмитрий Васильевич. Общий курс физики : [В 5 т.: учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. Оптика / Сивухин, Дмитрий Васильевич; Т.4. - 3-е изд., стер. - М.; Долгопрудный : Физматлит; Изд-во МФТИ, 2005. - 791 с. : ил.; 22 см. - Рекомендовано МО РФ. - ISBN 5-9221-0228-1: 262-02.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие для вузов. 6-е изд.,- М.: Физматлит, 2003,--848 с.
3. Матвеев А.Н. . Оптика. М.; Высшая школа, 1985.
4. Калитеевский, Николай Иванович. Волновая оптика : учеб. пособие для вузов / Калитеевский, Николай Иванович. - 5-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2008. - 466 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0666-1: 348-04. (31 экз).
5. Оптика. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / Л.С. Витюкова [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 224 с. — 978-5-7996-1674-8. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66179.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
6. Горячев Б.В. Практические занятия по общей физике. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Горячев Б.В., Могильницкий С.Б.- Электрон. текстовые данные.- Томск: Томский политехнический

- университет, 2014.- 91 с.- Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34698.html>. - ЭБС «IPRbooks». (дата обращения: 07.09.2022)).
7. Оптика (виртуальные модели) [Электронный ресурс] : методические указания к лабораторным работам для студентов всех направлений подготовки, реализуемых НИУ МГСУ /.- Электрон. текстовые данные. - М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2015. — 25 с. — 978-5-7264- 1125-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/36138.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
8. Михайлов В.К. Волны. Оптика. Атомная физика. Молекулярная физика [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Михайлов В.К., Панфилова М.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2016.— 144 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/62614.html>. — ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 07.09.2022)).
9. Мещерякова Н.Е. Физика. Оптика [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.Е. Мещерякова. — Электрон. текстовые данные. — Волгоград: Волгоградский институт бизнеса, Вузовское образование, 2009. — 70 с. — 2227- 8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/11358.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
10. Горячев Б.В. Практические занятия по общей физике. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2014. — 91 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34698.html> (дата обращения: 07.09.2022)).

б) Дополнительная литература:

1. Фриш, Сергей Эдуардович. Курс общей физики : учебник: в 3-х т. Т.3 : Оптика. Атомная физика / Фриш, Сергей Эдуардович, А. В. Тиморева. - Изд. 9-е, стер. - СПб. [и др.] : Лань, 2007. - 648 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике) (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0662-3 (Общий) : 330-00.
2. Савельев, Игорь Владимирович. Курс общей физики : в 3-х т.: учебник. Т.2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / Савельев, Игорь Владимирович. - 10-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2008. - 496 с. : ил. -

(Учебники для вузов. Специальная литература). - Рекомендовано МО РФ. - ISBN 978-5-8114-0631-9 : 379-94.

3. Ивлиев, Андрей Дмитриевич. Физика : [учеб. пособие] / Ивлиев, Андрей Дмитриевич. - Изд. 2-е, испр. - СПб. [и др.] : Лань, 2009. - 671 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0760-6 : 517-44. (8 экз).

Раздел Y. ФИЗИКА АТОМА

а) основная литература:

1. Матвеев А.Н. Атомная физика: Оникс. Мир и Образование, 2007.
2. Савельев И.В. Курс общей физики книга 5. Квантовая физика. Атомная физика. М.: Лань 2006. 368 с.
3. Шпольский Э.В. Атомная физика Т.1. Введение в атомную физику. М. Лань. 2010. 560 с.
4. Шпольский Э.В. Основы квантовой механики и строение электронной оболочки атома. М.: Лань. 2010. 448 с.
5. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Изд-во АСТ, 2004. Т.5. – 368 с
6. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика /Д.В. Сивухин.– М.: Физматлит, 2002. Т.5. – 784 с.
7. Шпольский Э.В. Атомная физика / Э.В. Шпольский. – М.: Наука, 1984. Т.2. – 447 с.
8. Попов А.М., Тихонова О.В. Лекции по атомной физике, М.: Физ. фак. МГУ, 2007
9. Матвеев А.Н. Атомная физика, М.: Высшая школа, 1989
10. Сборник задач по атомной физике. М: Физфак МГУ, 2010 (под редакцией С.С. Красильникова, А.М. Попова, О.В. Тихоновой).
11. Гуляев А.В., Красильников С.С., Попов А.М., Тихонова О.В., Харин В.Ю. Сто одиннадцать задач по атомной физике, М.: МГУ, 2012.
12. Сборник вопросов и задач по общей физике. Раздел 3. Оптика. Раздел 4. Квантовая физика [Электронный ресурс]/ Н.В. Соина [и др.].- Электрон. текстовые данные.- М.: Прометей, 2013.- 194 с.- Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/24021.html>. - ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 07.09.2022)).
13. Физика атома : Лаб. практикум /Алексеев В. П. — РИО Яросл. гос. ун-та , 2004 — 83 с. Источник: Российская государственная библиотека (РГБ)
14. Матышев А.А. Атомная физика. Том 1 [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.А. Матышев. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2014. — 531 с. — 978-5-7422-4209-3. — Режим

доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43939.html> (дата обращения: 07.09.2022)).

15. Матышев А.А. Атомная физика. Том 2 [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.А. Матышев. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2014. — 344 с. — 978-5-7422-4210-9. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43940.html> (дата обращения: 07.09.2022).
16. Оптика. Атомная физика [Электронный ресурс] : лабораторный практикум / М.А. Беджанян [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: СевероКавказский федеральный университет, 2015. — 123 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/63219.html> (дата обращения: 07.09.2022).

б) дополнительная литература:

1. Лорд Л., Лубуров Д. Практическая спектроскопия, М.: Наука, 1950.
2. Калашников С.Г. Электричество. Высшая школа, 1976.
3. Мутаева Г.И., Эфендиев А.З. Электронная база тестовых заданий для проверки приобретенных знаний. Махачкала 2009. 500 заданий.
4. Мутаева Г.И., Эфендиев А.З. Тестовые задания по физике. Учебное пособие. Махачкала издательство ДГУ. 2009. 34 с.
5. Физический практикум по атомной физике. Учебно-методическое пособие, Махачкала: ИПЦ ДГУ. 2013. 96 с.
6. Иродов И.Е. Сборник задач по атомной физике и ядерной физике /И.Е. Иродов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 215 с.
7. Кислов А.Н. Атомная физика: учебное пособие / А.Н. Кислов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 139 с
8. Борн М. Атомная физика, М.: Мир, 1965
9. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике, т.3,8,9 М.: Мир, 1967
10. Фано У., Фано Л. Физика атомов и молекул, М.: Наука, 1980
11. Милантьев В.П. Атомная физика, М.: Из-во Университета дружбы народов, 1999.
12. Милантьев В.П. Физика атома и атомных явлений. Издательство: Абрис, 2012. 399 с.
13. Физика атомного ядра [Электронный ресурс] : учебное пособие / . — Электрон. текстовые данные. - Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет, Золотой колос, 2014.- 129 с. - 2227-8397. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/64795.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
14. Специальные методы измерения физических величин [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Федоров [и др.]. - Электрон. текстовые данные. - СПб. : Университет ИТМО, 2014. - 130 с. - 2227-

8397. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/68146.html> (дата обращения: 07.09.2022)).

Раздел VI. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

а) основная литература:

1. Мухин, Константин Никифорович. Экспериментальная ядерная физика: учебник: [в 3-х т.]. Т.2 : Физика ядерных реакций / Мухин, Константин Никифорович. - 6-е изд., испр. и доп. - СПб. и др. : Лань, 2008. - 318 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0740-8 : 345-40.
2. Мухин, Константин Никифорович. Экспериментальная ядерная физика : учебник: [в 3-х т.]. Т.3 : Физика элементарных частиц / Мухин, Константин Никифорович. - 6-е изд., испр. и доп. - СПб. и др. : Лань, 2008. - 412 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0741-5 : 386-32.
3. Широков, Юрий Михайлович. Ядерная физика : [учеб. пособие для физ. спец. вузов] / Широков, Юрий Михайлович, Н. П. Юдин. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1980. - 727 с. : ил. ; 22 см. - (Общий курс физики). - 1-80.
4. Ракобольская, Ирина Вячеславовна . Ядерная физика : учебное пособие / Ракобольская, Ирина Вячеславовна . - 2-е изд., доп. и перераб. - М., 1981. - 280 с. - 0-95.
5. Кузнецов С.И. Курс физики с примерами решения задач. Часть III. Геометрическая и волновая оптика. Элементы атомной и ядерной физики. Основы физики элементарных частиц [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Кузнецов. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2015. — 302 с. — 978-5-4387-0428-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34672.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
6. Капуткин Д.Е. Физика. Оптика. Атомная и ядерная физика. Часть 3 [Электронный ресурс] : учебное пособие для практических занятий / Д.Е. Капуткин, В.В. Пташинский, Ю.А. Рахштадт. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский Дом МИСиС, 2014. — 103 с. — 978-5-87623-742-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/56599.html> (дата обращения: 07.09.2022)).
7. Михайлов М.А. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Часть 1 [Электронный ресурс] : учебное пособие / М.А. Михайлов. — Электрон. текстовые данные. — М. : Прометей, 2011. — 94 с. — 978-5-4263-0048-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/8306.html> (дата обращения: 07.09.2022)).

8. Михайлов М.А. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Часть 2. Элементарные частицы [Электронный ресурс]: учебное пособие / М.А. Михайлов. — Электрон. текстовые данные. — М.: Прометей, 2013. - 28 с. - 978-5-7042-2471-6. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/58212.html> (дата обращения: 07.09.2022)).

б) дополнительная литература:

1. Савельев, Игорь Владимирович. Курс физики : учеб. пособие: [в 3-х т.]. Т.3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / Савельев, Игорь Владимирович. - 2-е изд., стер. - СПб. [и др.] : Лань, 2006. - 302 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Допущено НМС. - ISBN 5-8114-0687-8 : 277-86.
2. Курс общей физики: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим, естественнонаучным и педагогическим направлениям и специальностям / Г. А. Зисман, О. М. Тодес Оптика. Физика атомов и молекул. Физика атомного ядра и микрочастиц. 2007. - 498 с. Источник: Российская государственная библиотека (РГБ).
3. Савельев, Игорь Владимирович. Курс общей физики: в 3-х т. Т.3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / Савельев, Игорь Владимирович. - 9-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2008. - 317 с.: ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Допущено МО РФ. - ISBN 978-5-8114-0632-6 : 320-10.
4. Физика атомного ядра [Электронный ресурс] : учебное пособие /. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет, Золотой колос, 2014. — 129 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/64795.html> (дата обращения: 07.09.2022)).

9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины:

1. Электронно-библиотечная система (ЭБС) IPRbooks (www.iprbookshop.ru). Лицензионный договор № 6984/20 на электронно-библиотечную систему IPRbooks от 02.10.2020 г. Срок действия договора со 02.10.2020 г. по 02.10.2021 г.
2. Moodle [Специальный физический практикум по ядерной физике]: система виртуального обучения: [база данных] / Даг. гос. ун-т. —

Махачкала, г. – Доступ из сети ДГУ или, после регистрации из сети ун-та, из любой точки, имеющей доступ в интернет. – URL: <http://moodle.dgu.ru/> (дата обращения: 27.09.2021).

3. Электронно-библиотечная система (ЭБС) «Университетская библиотека онлайн»: www.biblioclub.ru. Договор об оказании информационных услуг № 131-09/2010 от 01.10.2020г. Срок действия договора с 01.10.2020 до 30.09.2021 г. 537 наименований.
4. Электронно-библиотечная система «ЭБС ЛАНЬ <https://e.lanbook.com/>. Договор №СЭБ НВ-278 на электронно-библиотечную систему ЛАНЬ от 20.10.2020 г. Срок действия договора со 20.10.2020 г. по 31.12.2023г.
5. Научная электронная библиотека <http://elibrary.ru>. Лицензионное соглашение № 844 от 01.08.2014 г. Срок действия соглашения с 01.08.2014 г. без ограничения срока.
6. Национальная электронная библиотека <https://нэб.рф/>. Договор №101/НЭБ/101/НЭБ/1597 о предоставлении доступа к Национальной электронной библиотеке от 1 августа 2016 г. Срок действия договора с 01.08.2016 г. без ограничения срока. Договор может пролонгироваться неограниченное количество раз, если ни одна из сторон не желает его расторгнуть.
7. **Web of Science:** Web of Science Core Collection базы данных Clarivate. Срок действия до 31.01.2021 г. Письмо РФФИ от 07.07.2020 г. № 692 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных Clarivate в 2020 г. webofknowledge.com
8. **Scopus.** Scopus издательства Elsevier V.V. Письмо РФФИ от 19.10.2020 г. № 1189 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию базы данных Scopus издательства Elsevier V.V. в 2022 г. <https://www.scopus.com>
9. **Международное издательство Springer Nature.** Коллекция журналов, книг и баз данных издательства Springer Nature. Письмо РФФИ от 17.07.2020 г. № 743 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных издательства Springer Nature в 2022 г. на условиях национальной подписки <https://link.springer.com/>
10. **Журналы American Physical Society.** Базы данных APS (American Physical Society). Письмо РФФИ от 10.11.2020 г. № 1265 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных American Physical Society в 2022 г. <http://journals.aps.org/about>
11. **Журналы Royal Society of Chemistry.** База данных RSC DATABASE издательства Royal Society of Chemistry Письмо РФФИ от 20.10.2020 г. № 1196 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных Royal Society of Chemistry в 2022 г. <http://pubs.rsc.org/>
12. **Университетская информационная система РОССИЯ** <https://uisrussia.msu.ru/>

10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

Подготовка к физическому практикуму

Для лабораторных занятий по дисциплине «Общий физический практикум» у студента должна быть отдельная тетрадь. При подготовке к лабораторному занятию студент должен проработать теоретический материал, относящийся к теме занятия. При этом необходимо выяснить физический смысл всех величин, встречающихся в конспекте по данной работе. Должен составить конспект, ответить письменно на все контрольные вопросы. Должен знать установку, выполнение работы и ожидаемые результаты.

Организация самостоятельной работы

Рабочей программой дисциплины «Общий физический практикум» предусмотрена самостоятельная работа студентов. Самостоятельная работа предполагает: чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины; подготовку к практическим занятиям; работу с Интернет-источниками; выполнение тестовых и индивидуальных заданий, подготовку к сдаче экзаменов.

Планирование времени на самостоятельную работу, необходимого на изучение настоящей дисциплины, студентам лучше всего осуществлять на весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников, представленных в рабочей программе дисциплины. По каждой из тем для самостоятельного изучения, приведенных в рабочей программе дисциплины, следует сначала прочитать рекомендованную литературу и, при необходимости, составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме и для освоения последующих разделов курса. Для расширения знаний по дисциплине рекомендуется использовать Интернет-ресурсы, материалы сайта физического факультета ДГУ и обучающих программ, предложенных преподавателем.

11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем.

Учебная и научная литература по курсу. Видеозаписи, связанные с программой курса, компьютерные демонстрации, технические возможности для их просмотра и прослушивания. Свободный доступ в Интернет, наличие компьютерных программ общего назначения.

Операционные системы: семейства Windows (не ниже Windows XP).
Adobe Acrobat, Microsoft PowerPoint, WinDjView .

№ п/п	Аудиторное занятие	Содержание	Образовательная технология	Метод обучения	Активный метод обучения, способ реализации
1	Лабораторная работа физического практикума	Оценка погрешности измерений	Технология дифференцированного обучения	Формирование умений и навыков - репродуктивный метод	Индивидуальное выполнение под контролем преподавателя лабораторной работы по инструкции
2	Лабораторная работа физического практикума	Оценка погрешности измерений	Технология дифференцированного обучения	Формирование умений и навыков - репродуктивный метод	Индивидуальное выполнение под контролем преподавателя лабораторной работы по инструкции
3	Лабораторная работа физического практикума	Методы линейных измерений	Технология дифференцированного обучения	Формирование умений и навыков - репродуктивный метод	Индивидуальное выполнение под контролем преподавателя лабораторной работы по инструкции
4	Лабораторная работа физического практикума	компьютерное моделирование с применением расчетно-вычислительных и проектно-графических методик	Технология дифференцированного обучения	Формирование умений и навыков - репродуктивный метод	Индивидуальное выполнение под контролем преподавателя лабораторной работы по инструкции
5	Лабораторная работа физического практикума	компьютерное моделирование с применением расчетно-вычислительных и проектно-графических методик	Технология дифференцированного и развивающего обучения. Совершенствование знаний и формирование умений и навыков - проблемно-поисковый метод	Формирование умений и навыков - репродуктивный метод	Индивидуальное выполнение поисковой лабораторной работы с выбором наиболее оптимального способа решения поставленной задачи; компьютерное моделирование с применением расчетно-вычислительных и проектно-

					графических методик
--	--	--	--	--	---------------------

12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине:

- закрепление теоретического материала и приобретение практических навыков использования аппаратуры для проверки физических законов обеспечивается лабораториями физического практикума: механика – 2 лаб.; молекулярная физика – 2 лаб.; электричество и магнетизм – 2 лаб.; оптика – 2 лаб.; физика атома – 1 лаб.; физики атомного ядра и элементарных частиц – 1 лаб.;
- при проведении занятий используются компьютерные классы, оснащенные современной компьютерной техникой;
- при изложении теоретического материала используется лекционные залы (4 шт.), оснащенные мультимедиа проекционным оборудованием и интерактивными досками;
- комплект мультимедийных слайд-лекций по всем разделам дисциплины;
- комплект анимированных интерактивных компьютерных демонстраций по ряду разделов дисциплины.

ЗАДАЧИ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА НА ПРИМЕРЕ РАЗДЕЛА III – ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Цель **физического практикума** – помочь студентам (учащимся) в выполнении задач практической физики (физического практикума) по электромагнетизму.

Практическая физика, как неотъемлемая часть курса общей физики, играет главную роль в ознакомлении студентов, (учащихся) с экспериментальными основами фундаментальных физических законов и явлений, методами изучения физики.

Задачи физического практикума позволяют:

1. Проиллюстрировать теоретические положения.
2. Познакомится с приборами.
3. Приобрести опыт в проведении экспериментов.
4. Учитывать возможность присутствия ошибок и принимать меры для их устранения.
5. Анализировать результаты эксперимента и делать правильные выводы.

В соответствие с этим, в пособии сформулированы описания к лабораторным задачам по электричеству и магнетизму.

Все задачи практикума, содержат три раздела: краткая теория исследуемого явления (со ссылкой на программные литературные источники), описание экспериментальной установки и описание отдельных упражнений с указанием формы представляемого отчета.

Студент, получивший допуск к выполнению лабораторной задачи должен:

- а) иметь элементарные сведения об измерениях;
- б) уметь оценивать точность окончательного результата;
- в) вести запись измерений и расчетов аккуратно, ясно и кратко;
- г) по необходимости, представить их в виде графиков.

Выполнение любых лабораторных задач, в рамках физического практикума, чего-либо стоят, если будут соблюдаться практически все перечисленные выше условия!

2.1. Организация и методика проведения физического практикума

Выполнение лабораторных задач **физического практикума**, как и любого другого лабораторного задания, складывается из предварительной подготовки, проведения лабораторного эксперимента и составления отчета по результатам работы.

Лабораторные задания выполняются студентами согласно семестровому графику, поэтому каждый студент знает сроки и последовательность их выполнения в течение семестра и имеет возможность подготовиться к ним

заранее. Подготовка должна проводиться в определенной последовательности. Прежде всего, нужно ознакомиться с описанием работы, изучить ее теоретическое обоснование, обратив особое внимание на вывод расчетных формул. Для более полного уяснения некоторых вопросов теории следует обратиться к рекомендованной литературе в конце описания выполняемой работы. Затем составляется конспект задачи, который кроме теоретических сведений содержит данные об используемых приборах, схеме экспериментальной установки, о порядке выполнения работы. Готовность к выполнению задания проверяется при ответе на контрольные вопросы, задаваемые преподавателем или помещенные в конце описания.

Выполнение лабораторных работ начинается с знакомства с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности в данной лаборатории.

2.2. Основные методические требования к выполнению практических задач, например, по электромагнетизму

1. При сборке схемы следить за прочные соединения монтажных проводов с клеммами.

2. Подключать приборы к источнику электрического тока только после проверки собранной схемы преподавателем.

3. В случае каких-либо пересоединений проводников, перед подключением к источнику тока, схема должна быть снова проверены преподавателем.

4. Запрещается оставлять без присмотра схемы и приборы под напряжением.

5. В случае выхода из строя прибора необходимо немедленно отсоединить схему от источника питания и сообщить об этом преподавателю.

6. Сборку и разборку электрических схем, подключение дополнительных приборов, их частичное отключение или замену производить только при включенном источнике питания.

Результаты измерений записываются в таблицу. Полученные экспериментальные данные и результаты предварительного расчета искомой физической величины предъявляются преподавателю, который дает им оценку.

В случае хорошей оценки работа считается выполненной.

После выполнения работы студент составляет отчет и сдает его преподавателю в день выполнения работы или не позже следующего занятия. Отчет должен содержать обработку результатов эксперимента, включая расчет погрешностей измерений. Окончательный результат представляется в виде записи измеряемой величины с её абсолютной погрешностью.

В некоторых работах результаты измерений должны быть представлены в виде графиков.

2. Указания по оформлению задач физического практикума.

Правильно оформленная лабораторная задача – это отчет, который должен состоять из трех частей.

Первая часть отчета должна содержать:

1. Полное название задачи практикума и ее номер.
2. Цель работы.
3. Принадлежности для выполнения работы.
4. Теоретическая часть, выполняемой работы, с основными расчетными формулами.
5. Рисунок схемы, чертежа. На чертеже нужно привести обозначения и названия величин, встречающихся в задаче.

Во второй части отчета содержатся результаты измерений. При этом рекомендуем:

- а) результаты эксперимента занести в таблицу;
- б) каждый столбец (или строка) таблицы должны включать как название, так и обозначение измеряемой величины, с указанием единиц ее измерения;
- в) таблиц следует чертить аккуратно и по линейке;
- г) после окончания измерений проводятся расчеты.

В третьей части отчета содержатся все итоговые результаты эксперимента и необходимые расчеты, анализ результатов эксперимента и соответствующие выводы.

Если результаты каких-либо прямых или косвенных экспериментов можно получить из других опытов, то рекомендуется провести сопоставление итоговых данных всех выполненных экспериментальных результатов. Рекомендуется проанализировать достоинства и недостатки примененного метода измерений.

В заключение в выводах можно отметить относительную погрешность результатов измерений.

В условиях студенческого практикума на начальном этапе обучения, как правило, не нужно вычислять оценки параметров зависимости какими-либо сложными методами. В этом случае экспериментальные результаты удобно представить в виде графиков:

1. Графики выполняются на миллиметровой бумаге с помощью карандаша.
2. В качестве осей координат удобно использовать прямоугольную систему координат.
3. В начале нужно выбрать масштаб по осям координат.
4. На осях координат наносят метки и около осей координат необходимо написать названия величин, которые отложены по ним, их обозначение и единицы измерения.
5. Кривые на графике должны занимать все поле чертежа.
6. Не следует соединять соседние экспериментальные точки на графике отрезками прямой и получить, таким образом, ломаную линию. Линии необходимо проводить гладкие, без резких изломов или усредненные кривые.

7. Готовые графики подклеиваются в журнал или тетрадь, и делается подпись под графиком, разьясняя изображенный график.

Итак, **выполняющий** задачу физического практикума **помни!**

- Не знаешь теории – не приступай к выполнению задачи.
 - Четко представь себе цель работы – она часто совпадает с ее названием.
 - Спланируй ход действия.
 - Тщательно ознакомься с электроизмерительными приборами.
 - Береги приборы и принадлежности.
 - Следи, чтобы на рабочем месте всегда был порядок.
 - Соблюдай технику безопасности – собрав установку или электрическую цепь, не включай ее без проверки и разрешения преподавателя.
 - Подготовь таблицу для записи результатов измерений.
 - Исходя из реальных условий выполнения задачи физического практикума, оцени ожидаемые результаты.
 - Выключи установку.
 - Приведи в порядок рабочее место.
 - На основе данных наблюдений, измерений и вычислений сделай вывод.
 - Составь отчет о выполненной работе.
- Береги электрическую энергию!

2.3. Электроизмерительные приборы

Наиболее часто используемыми электроизмерительными приборами являются амперметры, вольтметры, гальванометры и реостаты. По обозначениям на шкале прибора можно определить ряд их важнейших характеристик:

- чувствительность и цену деления;
- погрешность прибора;
- класс точности;
- верхний предел измеряемой величины;
- возможность работы на постоянном или переменном токе;
- принцип действия прибора и т. д.

а) Принципы измерения электрических величин

Электрические величины измеряются по различным их проявлениям и воздействиям:

механическими – на рамку с током в магнитном поле действует вращающий момент;

химическими – количество протекшего электричества может быть измерено по массе выделившегося на электродах вещества;

тепловыми – длина проводника, по которому течет ток, изменяется вследствие его нагревания и т. д.

б) Чувствительность и цена деления измерительных приборов

Основными характеристиками любого электроизмерительного прибора являются *чувствительность S , цена деления C и класс точности*.

Чувствительностью S электроизмерительного прибора называется отношение линейного и углового перемещения указателя $d\lambda$ к изменению величины dx вызвавшему это перемещение: $S=d\lambda/dx$. Размерность чувствительности зависит от наименования измеряемой величины, например $S=$ дел/А, дел/Ом, дел/Кл, дел/В и т. д.

Чувствительность измерительного прибора показывает, скольким делениям шкалы прибора соответствует одна единица измеряемой величины.

Величина, обратная чувствительности, называют **ценой деления прибора $C=1/S$** . Цена деления определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение на одно деление, её размерность зависит от наименования измеряемой величины, например, $[C] =$ А/дел, Ом/дел, и т.д.

В общем случае цена деления представляет собой разность значений измеряемой величины для двух соседних меток. Цена деления зависит от верхнего и нижнего пределов измерения приборов и от числа делений шкалы. Например, если шкала прибора, рассчитанного на измерения постоянного тока в пределах 0 – 300 А, имеет 60 делений этого прибора, то $C = \frac{300\text{мА}}{60\text{дел}} = 5 \frac{\text{мА}}{\text{дел}}$, а чувствительность $S = 0,2 \frac{\text{дел}}{\text{мА}}$).

в) Погрешности. Класс точности

Важнейшей характеристикой каждого измерительного прибора является его погрешность. В качестве действительного значения измеряемой величины принимается величина, измеренная образцовым прибором. Разность между показателями прибора λ и действительным значением измеряемой величины λ_0 называется абсолютной погрешностью: $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$.

Точность измерения прибора, как правило, характеризуется относительной погрешностью ε , которая представляет собой отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженной в процентах:

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} 100\% .$$

Точность электроизмерительных приборов не может быть однозначно характеризована абсолютной или относительной погрешностью измерения. Одна абсолютная погрешность ничего не говорит о его точности, а относительная погрешность зависит от значения измеряемой величины, т.е. измеряемая величина различна для разных участков шкалы прибора. Поэтому для характеристики электроизмерительных приборов используется приведенная погрешность. Она равна отношению абсолютной погрешности прибора к максимальному значению измеряемой физической величины $\lambda_{пр}$, которое можно измерить данным прибором при отклонении его на всю

шкалу: $\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{np}}$ Приведенная погрешность есть величина постоянная для данного прибора.

Для того чтобы относительная погрешность измерения была не очень большой, любой электроизмерительный прибор с непосредственным отсчетом необходимо использовать так, чтобы в процессе измерений отклонение указателя было в пределах последней трети шкалы.

Точность электроизмерительных приборов является главнейшей их характеристикой и лежит в основе деления приборов на классы. По степени точности электроизмерительные приборы делятся на восемь классов: 0.05; 0.1; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 4.0. Показатель класса указывает величину приведенной погрешности прибора в процентах. Класс прибора обычно указывается на его шкале.

2.4. Принцип действия электроизмерительных приборов

В зависимости от принципа действия измерительные приборы делятся на системы: магнитоэлектрическую, электродинамическую, тепловую, термоэлектрическую, индукционную, электростатическую и другие. На практике наибольшее распространение получили приборы первых трех систем. Остановимся более подробно на принципах их действия.

а) Приборы магнитоэлектрической системы

В приборах этой системы перемещение подвижной части вызывается силами взаимодействия постоянного магнита с катушкой, по которой проходит ток. Достоинства приборов магнитоэлектрической системы это их высокая чувствительность, большая точность и равномерность шкалы. Внешние поля слабо влияют на показания приборов этой системы, так как рамка находится в почти замкнутом пространстве и в сильном поле собственного магнита. К недостаткам таких приборов следует отнести недостаточную устойчивость к перегрузкам и невозможность измерения переменных токов. Последний недостаток устраняется введением в схему прибора выпрямительного устройства.

Приборы магнитоэлектрической системы, позволяющие измерять силу тока порядка $10^{-6} - 10^{-12}$ А, получили название *гальванометров*. Различают стрелочные гальванометры, устройство которых аналогично любому амперметру магнитоэлектрической системы (цена деления порядка 10^{-6} А/дел и ниже), и более чувствительные гальванометры со световым или теневым указателем (зеркальные гальванометры).

Зеркальные гальванометры при электрических измерениях используется чаще всего как «нуль - индикаторы», т.е. приборы, позволяющие установить отсутствие тока в цепи.

б) Приборы электромагнитной системы

В приборах этой системы поворот подвижной части с указательной стрелкой вызывается взаимодействием магнитного поля неподвижной

катушки, по которой проходит измеряемый ток, с железным сердечником к которому жестко на этой оси укреплена стрелка.

Достоинствами приборов электромагнитной системы являются простота их конструкции, механическая прочность, стойкость к перегрузкам.

Недостатки приборов электромагнитной системы – это неравномерность шкалы, невысокая точность (вследствие явления гистерезиса в железном сердечнике) и чувствительность внешним магнитным полям.

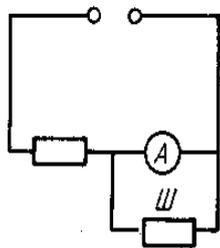
в) Приборы электродинамической системы

Приборы этой системы служат для измерения силы тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и переменного токов. Принцип действия этих приборов основан на взаимодействии магнитных полей постоянного и переменного токов.

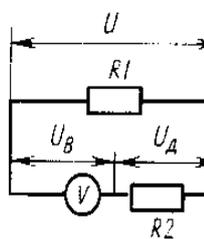
К недостаткам приборов электродинамической системы нужно отнести большую чувствительность к перегрузкам, большое собственное потребление энергии, влияние энергии, влияние внешних магнитных полей на показания прибора.

г) Шунты, добавочные сопротивления и их применения

Шунтом называется сопротивление, подключаемое параллельно амперметру (рис. 1а), вследствие чего через амперметр проходит только часть измеряемого тока.



а)



б)

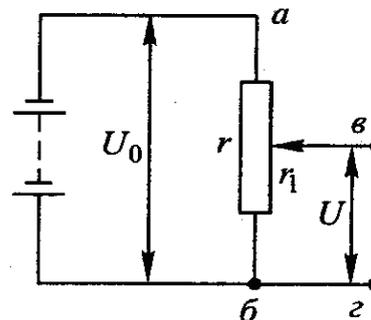


Рис.2.

Рис.1.

Например, если необходимо амперметром измерить ток в n – раз больший максимально возможного для этого прибора, то надо включить шунт сопротивления $R_{ш}$, удовлетворяющим равенству: $R_{ш} = R_a / (n - 1)$, где

$n = \frac{I}{I_a}$, I - сила тока в цепи, (I_a - сила тока проходящего через амперметр); R_a

– сопротивление амперметра.

Шунты используются для расширения пределов измерения амперметров. При изготовлении амперметров шунт часто монтируется внутри прибора.

Добавочным сопротивлением называется устройства, применяемые для расширения пределов измерения вольтметров. Они представляют собой строго определенные сопротивления R_g , включаемые последовательно с

вольтметром (см. рис. 1б). Если, например, вольтметром надо измерить напряжение в n - раз более чем допускается прибором, то к нему необходимо подключить последовательно добавочное сопротивление $R_g = R_v(n - 1)$,

где R_v – сопротивление вольтметра; $n = \frac{U}{U_v} = \frac{R}{R_v}$, Здесь U - полное подводимое напряжение; U_v - падение напряжения на вольтметре; R – общее сопротивление, $R = R_g + R_v$.

Как и шунт амперметра, добавочное сопротивление часто монтируется внутри прибора и может быть многосекционным, что позволяет изменять пределы измерения вольтметра.

Каждый источник тока создает на приборе, присоединенном к его полюсам, определенное напряжение. Это напряжение может оказаться больше того, которое необходимо для нормальной работы. В таких случаях возникает необходимость уменьшить напряжение, подводимое к прибору. Это можно сделать при помощи реостата, используемого в качестве делителя напряжения. Для этого реостат включают в цепь по схеме, показанной на рис.2, где нижние концы реостата присоединяют к полюсам источника тока, а прибор – к одному из концов реостата и к ползунку. Реостат, включенный по такой схеме, называется *потенциометром*.

Потенциометр применяется, например, для регулировки громкости звучания звуковоспроизводящих устройствах.

д) Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

Каждый электроизмерительный прибор рассчитан на определенные условия, в соответствии с которым им можно пользоваться: на определенный ток (переменный или постоянный); имеет определенный класс точности, принцип действия, назначение и т.д. Эти характеристики составляет основу паспортных данных прибора и должны указываться на шкалах или панелях приборов.

Наиболее употребительные обозначения, приводимые ниже, наносятся на электроизмерительные приборы:

2.5. Методология обработки результатов измерений

а) Виды и методы измерений

Согласно определению измерением является нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

По способу нахождения численного значения искомой физической величины различают измерения четырех видов: прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямые измерения. При прямых измерениях искомое значение величины A находят непосредственно из опытных данных—прямым

сравнением измеряемой величины с мерами или с помощью измерительного прибора, проградуированного в единицах измерения.

Косвенные измерения. При косвенных измерениях искомое значение величины A находят с помощью вычислений на основании известной функциональной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям параметра x_i , $A=f(x_i)$.

Функциональная зависимость $f(x)$ называется формулой (или уравнением) связи, а величины x_i – измеряемыми аргументами, например,

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

Совокупные и совместные измерения. Такие измерения позволяют определить искомые значения x_i , не поддающиеся непосредственному наблюдению по результатам измерения значений других величин y_i которые являются их функциями:

$$y_i = \varphi(x_i). \quad (1)$$

После проведения прямых измерений значений величины y_i результаты этих измерений представляются в систему уравнений (1), решение которой позволяет найти искомые значения одноименных (при совокупных) или не одноименных (при совместных) величин x_i .

При совокупных измерениях непосредственно измеряют значения различных сочетаний одноименных величин, каждое из которых в отдельности измерить невозможно.

Погрешности измерений. Погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

По способу выражения погрешности измерений делят на абсолютные и относительные.

Абсолютная погрешность измерения Δ_x выражается в единицах измеряемой величины X и определяется формулой «измеренное минус истинное»:

$$\Delta_x = x - X, \quad (2),$$

где x – значение, полученное при измерении; X – истинное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность измерения δ_x равна отношению абсолютной погрешности Δ_x к истинному значению измеряемой величины X и выражается в долях единицы

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{X}, \quad (3)$$

или в процентах

$$\delta_x \% = \frac{\Delta_x}{X} 100\%. \quad (4)$$

Абсолютная погрешность удобна для характеристики результата измерения, так как дает возможность сразу определить в его числовом значении достоверные и недостоверные разряды.

Например, если при измерении электрического тока получен результат 5,243 А с абсолютной погрешностью 0,01 А, то цифра 3 в результате измерения является недостоверной.

Для сравнения метрологических характеристик нескольких значительно отличающихся результатов абсолютная погрешность неудобна. В этом случае вычисление относительных погрешностей дает возможность легче сопоставить достоверность этих двух результатов.

Величина численно равная обратному модулю относительной погрешности $1/\delta_x$ – называется *точностью измерения* и представляет собой качество измерения, отражающее близость полученного измеренного значения к истинному значению измеряемой величины.

б) Обработка результатов измерений

Прежде всего, из совокупности данных измерений следует исключить результаты наблюдений, содержащие явно выраженные грубые погрешности и поэтому заметно отличающиеся от остальных. Если полной уверенности в наличии грубой погрешности нет, такой результат следует оставить в выборке, а затем проверить правомерность его отнесения к ней (с помощью соответствующих статистических критериев).

Статистическая обработка выборок выполняется в следующей последовательности:

1. Исключить (или уменьшить) составляющие погрешности из результатов наблюдений.

2. Проверить соответствие экспериментального закона распределения теоретическому распределению, аналитическим или графоаналитическим способами.

3. Вычислить наиболее вероятное значение \bar{X} искомой величины; среднеарифметическое значение, которое определяется по формуле

$$4. \quad \bar{X} = \sum_n x_i / n. \quad (5)$$

5. Вычислить среднеквадратичное отклонение $S_{\bar{x}}$ результата измерения.

6. Вычислить доверительные границы погрешности измерений.

7. Записать результат измерения.

в) Форма представления результатов измерений

Результат измерения обычно представляется в форме

$X = A \pm \Delta A$, где A – наиболее вероятное значение результата измерения ($A \approx X$); ΔA – доверительная граница погрешности измерения.

В окончательной записи результата измерения доверительную границу ΔA принято выражать, числом с одной значащей цифрой (если первая

значащая цифра равна 1, то указывают и вторую цифру). При выполнении промежуточных расчетов целесообразно оставлять в выражении еще одну значащую цифру.

Правила округления:

1. Отбрасываемые значащие цифры заменяются нулями, но только в показательной форме (например, $732 \approx 7 \cdot 10^2$), а после запятой полностью отбрасываются ($7.32 \approx 7$).

2. Если первая из отбрасываемых цифр меньше 5, то оставляемые цифры не изменяются ($2.3 \approx 2$).

3. Если первая из отбрасываемых цифр больше 5 или равна 5, и последующие цифры не нули, то последняя цифра результата увеличивается на единицу ($4,51 \approx 5$).

4. Если первая из отбрасываемых цифр равна 5 с последующими нулями и последняя из оставляемых цифр четная, то она остается без изменений, а если нечетная, то увеличивается на единицу ($4,5 \approx 4$; $7,5 \approx 8$).

Округление результата измерения A основывается на порядке погрешности ΔA :

– числовое значение A должно оканчиваться десятичным знаком того же разряда, которым оканчивается и значение ΔA (например, $25,3 \pm 0,04$ или $32 \cdot 10^3 \pm 2 \cdot 10^3$).

Линейная регрессия (метод наименьших квадратов, МНК)

Если имеется совокупность экспериментально полученных значений x_i и y_i причем известен характер функциональной связи между величинами X и Y , то обработка таких результатов измерений сводится к вычислению параметров функции, наилучшим образом отображающей данную экспериментальную зависимость (такая функция называется уравнением регрессии). Этот метод удобен для обработки экспериментальных функциональных зависимостей при линейной связи между X и Y (см. рис. 3а):

$$Y = aX + b. \quad (6)$$

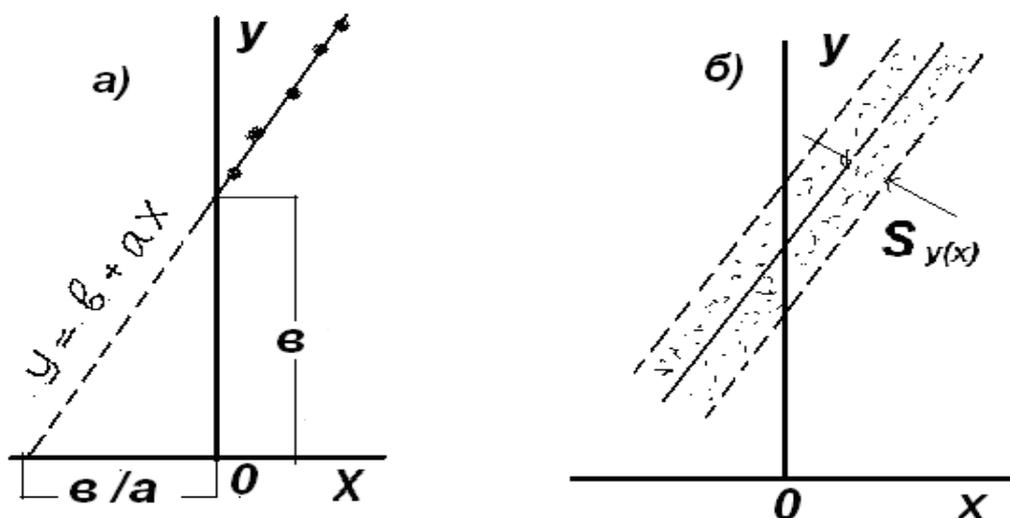


Рис. 3.

Уравнение (6) носит название *уравнение линейной регрессии*.

В результате обработки серии пар экспериментальных величин x_i и y_i вычисляются коэффициенты линейной регрессии a и b

$$a = \left(\sum_n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_n x_i \sum_n y_i \right) / \left[\sum_n x_i^2 - \left(\sum_n x_i \right)^2 / n \right], \quad (7)$$

$$b = \left(\sum_n y_i - a \sum_n x_i \right) / n, \quad (8)$$

Для определения погрешностей можно вычислить среднеквадратичные отклонения оценок величин a и b , но лучше рассчитывать среднеквадратичное отклонение точек $x_i; y_i$ от уравнения регрессии – прямой $Y=aX+b$:

$$S = \sqrt{\sum_n (ax_i + b - y_i)^2 / [(n-1) * (a^2 + 1)]}. \quad (9)$$

Для определения ширины полосы, характеризующей погрешность линейной регрессии по обе стороны от прямой (см. рис. 96 б)), $Y = aX + b$ следует отложить значения $\pm S_{y(x)}$,

где
$$S_{y(x)} = S / \sqrt{n}. \quad (10)$$

Линейная регрессия – почти универсальный прием обработки экспериментальных зависимостей. Иллюстрацией типичных случаев применения линейной регрессии в физическом практикуме служат такие задачи как, например, изучение колебательных процессов, проверка законов Ома, явление термоэлектронной эмиссии и работа выпрямителей (контактных и вакуумных), проверка закона Ома в электрических цепях и другие.

г) Графический подход к обработке измерений

В экспериментальной физике графиками пользуются для разных целей. Во-первых, графики строят, чтобы определить некоторые величины – обычно наклон или отрезок, отсекаемый на оси ординат, прямой, изображающей зависимость между двумя переменными. Хотя в элементарных курсах практической физики упор часто делают именно на это, на самом деле здесь роль графика сравнительно невелика. Ведь при методе наименьших квадратов или методе парных точек наклон прямой определяют, конечно, не по графикам, как таковым, а по исходным числовым данным. Непосредственно же по графику определить наклон можно только в том случае, если провести через точки на глаз наилучшую прямую. Это довольно грубый метод. Его не следует сбрасывать со счета, но он пригоден лишь тогда, когда мы проверяем результат, полученный более точным методом, или когда наклон не очень существен для окончательного результата.

Во-вторых, и это, пожалуй, самое важное, графиками пользуются для наглядности. Глядя на цифры, приведенные в любой таблице, трудно сказать, где пропорциональность начинает нарушаться.

Другое дело, когда те же данные представлены, графически

(см. рис. 4). В графическом случае сразу видна точка, в которой нарушается пропорциональность.

Графики позволяют также более наглядно проводить сравнение экспериментальных данных с теоретической кривой. Нанося результаты измерений на график, очень удобно следить за тем, как идет эксперимент.

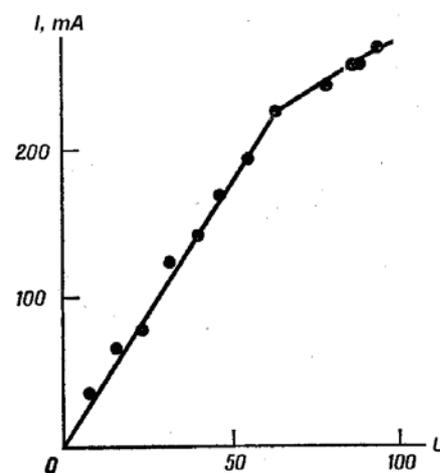


Рис.4.

В-третьих, графиками пользуются в экспериментальной работе, чтобы установить эмпирическое соотношение между двумя величинами. Например, градуируя термопару по какому-либо образцовому прибору, мы определяем поправку как функцию показаний термопары, рис. 98 а)

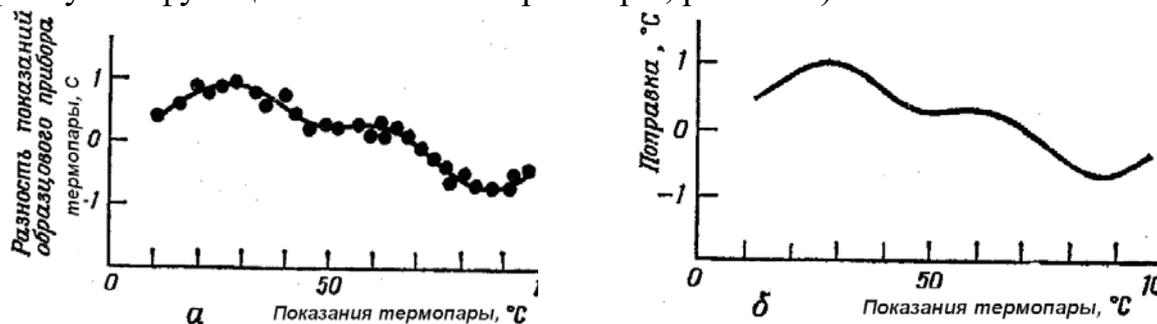


Рис. 5.

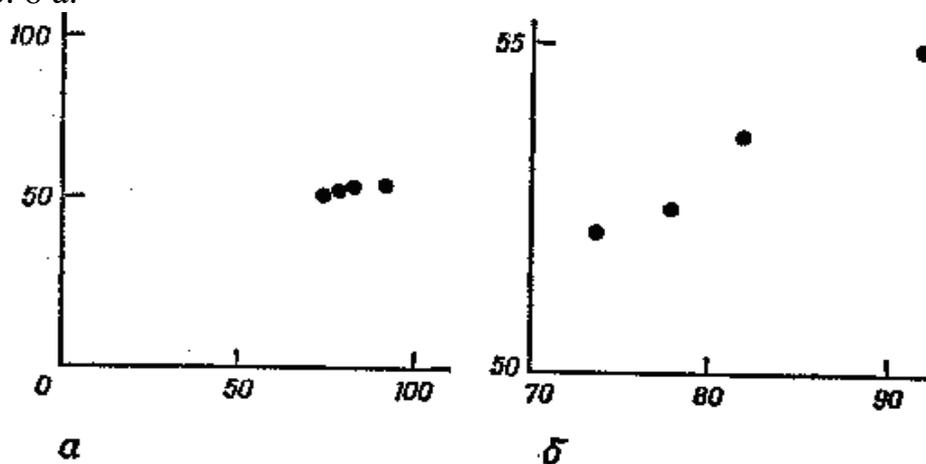
На графике через полученные точки проводим плавную или усредненную кривую (рис.5 б), которой и пользуемся для введения поправки в показания термопары. То же самое можно было бы сделать, составив таблицу поправок. Таблица, вообще говоря, удобнее в работе, чем график, но иногда ее бывает труднее составить.

В физике на графиках принято по горизонтальной оси откладывать независимую переменную, т.е. величину, значения которой задает сам экспериментатор, а по вертикальной оси — ту величину, которую он при этом определяет. Другими словами, по горизонтали откладывается *причина*, а по вертикали — *следствие*.

Как правило, графики строят на миллиметровой бумаге.

На миллиметровой бумаге должен быть выбран масштаб. При выборе масштаба нужно исходить из следующих соображений:

- Экспериментальные точки не должны сливаться друг с другом, как это видно на рис. 6 а.



а — неудачный выбор масштаба для графического представления результатов; **б** — те же данные в увеличенном масштабе.

Рис. 6.

Из рис.6 а) довольно трудно извлечь полезную информацию. Поэтому лучше выбрать такой масштаб, чтобы расположить точки с разумным интервалом, как на рис. 6 б). Но при этом рекомендуем иметь в виду и другие правила.

- Масштаб должен быть простым. Проще всего, если единице измеренной величины (или 10; 100; 0,1 единицы и т.д.) соответствует 1см. Можно также выбрать такой масштаб, чтобы 1см соответствовал 2 или 5 единицам. Других масштабов следует избегать просто потому, что иначе при нанесении точек на график придется производить арифметические подсчеты.

- Иногда приходится выбирать масштаб из теоретических соображений. Так, если нас интересует, в какой мере результаты, представленные на рис.6, удовлетворяют соотношению $y = mx$, то на нашем графике зависимости y от x обязательно должно быть начало координат. Для таких целей график на рис.6 не годится.

- Как делать надписи на осях координат графика и указывать их на осях, показано на рисунках 4, 7 а и б.

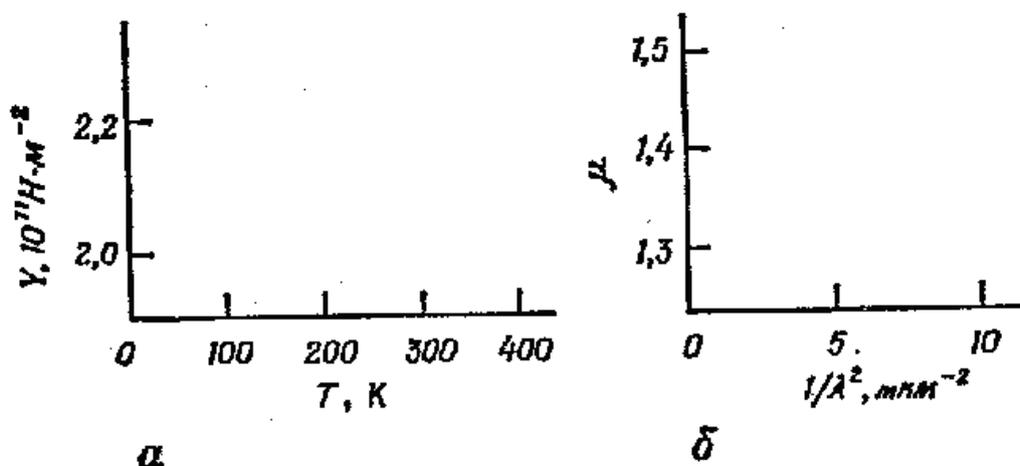


Рис.7. Примеры, показывающие, как делать надписи вдоль осей графика и как указывать единицы измерения.

На осях координат следует указывать название или символ величины (или то и другое). Единицы измерений нужно указывать тем же способом, что и в таблицах, а именно десятичный множитель относить к единице измерения.

д) Как строить графики?

Графики делают в основном для того, чтобы наглядно представить результаты эксперимента, и поэтому они должны быть предельно ясными. Ниже мы дадим ряд общих советов по вычерчиванию графиков. Пользоваться ими нужно с учетом особенностей каждого конкретного случая:

1. Когда на графике для сравнения с экспериментальными данными проводят теоретическую кривую, то точки, по которым ее проводят, выбирают по своему усмотрению. Наносить их желательно без нажима, лучше всего карандашом, чтобы при необходимости можно было стереть. Экспериментальные же данные следует отмечать жирными, хорошо выделяющимися точками (см. рис.8).

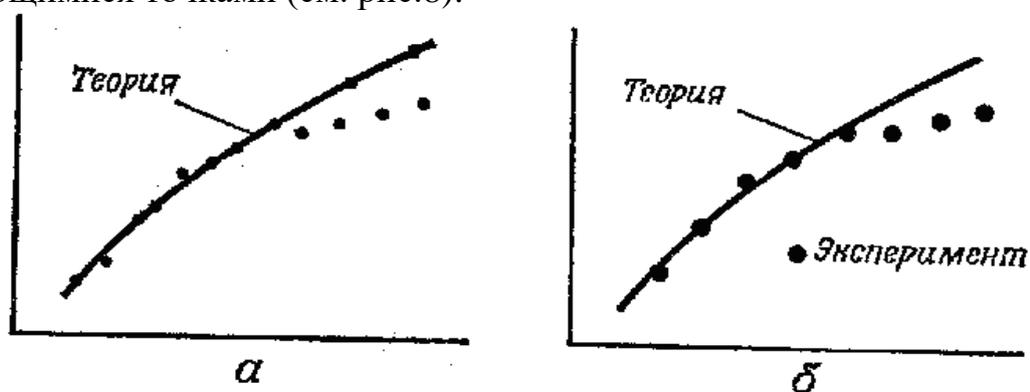


Рис.8.

a – пример неудачного графика, на котором экспериментальные точки очень мелкие и не отличаются от расчетных точек, по которым проведена теоретическая кривая;
б – расчетные точки не видны, а экспериментальные точки четко выделяются.

2. Полезно иногда через экспериментальные точки проводить «наилучшую» плавную кривую. Обратите внимание на слово *плавную*. Начинаящие нередко соединяют экспериментальные точки просто ломаной линией, как изображено на рис. 9, а. Но тем самым как бы указывается, что соотношение между двумя величинами носит скачкообразный характер, а это, вообще говоря, весьма маловероятно. Скорее следует ожидать, что данное соотношение описывается какой-либо плавной кривой (рис. 9, б).

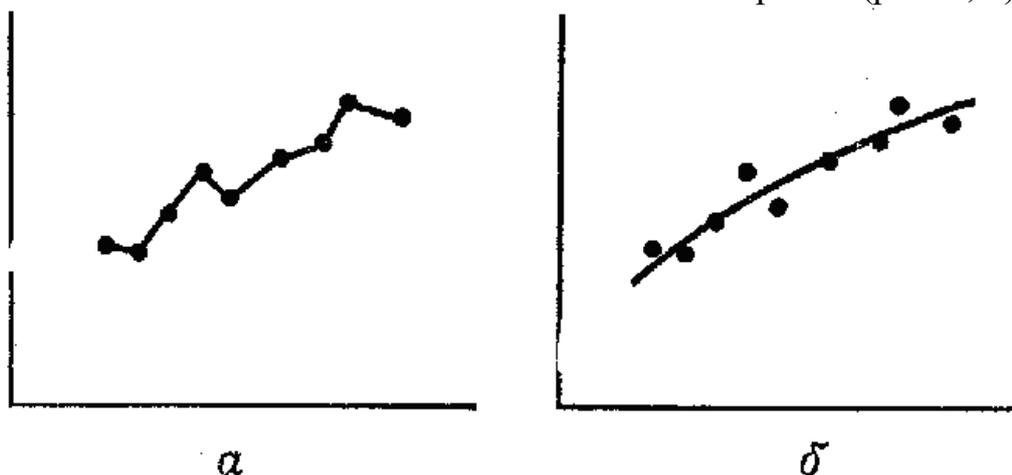


Рис. 9.

Соединять точки ломаной прямой (как на графике а) нельзя, ибо это означало бы, что при изменении одной величины другая изменяется резкими скачками. При тех же экспериментальных данных более вероятно, что зависимость плавная, подобно кривой на графике б).

Если на графике имеется расчетная кривая, то «плавную» кривую через экспериментальные точки лучше не проводить. Такая кривая, может быть, не совсем соответствует фактическим данным, и тогда она будет мешать прямому сравнению эксперимента с теорией.

3. Чтобы различать экспериментальные данные, относящиеся к разным условиям или разным веществам, можно пользоваться разными значками, например темными или светлыми кружками, крестиками или точками разного цвета. Но при этом нужно знать меру: если график начинает выглядеть загроможденным, то лучше для той группы данных построить отдельный график.

Разные значки удобнее всего, пожалуй, в тех случаях, когда нужно показать, что результаты почти не зависят от условий эксперимента или исследуемого вещества.

4. Размечать деления на осях координат и наносить на график экспериментальные точки лучше всего сначала карандашом. Вдруг вы решите изменить масштаб или окажется, что какая-либо точка случайно поставлена неверно. Если с масштабом и расположением точек все в порядке, то нетрудно обвести все тушью или чернилами и сделать жирные

экспериментальные точки. В результате вам удастся избежать переделок и лишних затрат графической бумаги.

5. Ошибку в экспериментальном значении можно указать следующим образом:



Поскольку нанесение таких значков – дополнительный труд и приводит к усложнению графика, это следует делать лишь в том случае, если информация об ошибках действительно нужна.

Когда от ошибок может зависеть значимость отклонения экспериментальных данных от теоретической кривой, (см. рис.10) то в этом случае ошибки необходимо указывать.

График, на котором указаны ошибки, помогает выяснить расхождение между теорией и экспериментом.

Ошибки обычно указывают и еще в одном случае – когда они неодинаковы для разных экспериментальных точек.

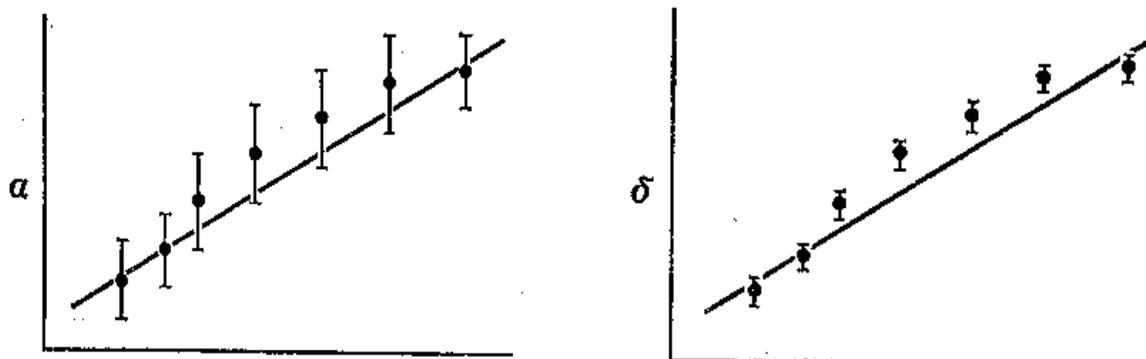


Рис.10. Отклонения экспериментальных точек от прямой линии на обоих графиках одинаковы, но в случае *a*, отклонение вряд ли значимо, а в случае *б* – значимо.

Выбор наиболее показательной зависимости

Допустим, что мы проводим эксперимент, цель которого – проверить справедливость соотношения $y=x$. Полученные нами пары значений x и y показывают, что данное равенство приблизительно выполняется. Чтобы представить результаты графически, мы можем построить график зависимости y от x *a*) на рис.11. Но гораздо более показательным был бы график зависимости разности $y - x$ от x , ибо эта разность мала по сравнению с величиной y и мы могли бы тогда выбрать более крупный масштаб (см. рис. 11, б). На первом из графиков отклонения от равенства $y=x$ слабо заметны, а на втором они отчетливо видны.

Аналогичный метод применим и при проверке соотношения y и mx . График зависимости y от x полезен тем, что дает общее представление о ее характере, а). Более показательным при проверке данного соотношения будет график зависимости y/x от x . В этом случае нам не потребуется, чтобы на

графике обязательно было начало координат, как в а), и мы можем выбрать область изменения величин y/x и y так, как нам удобно, б).

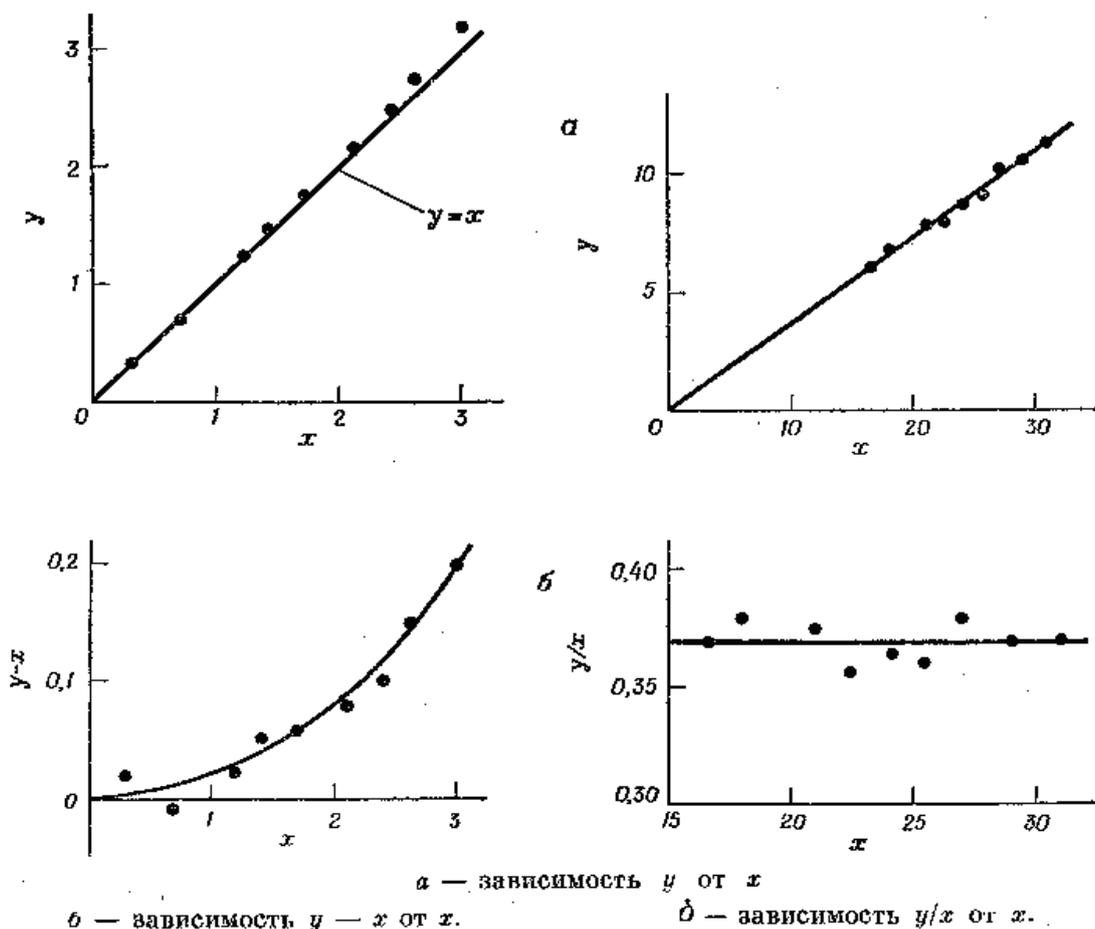


Рис.11.

2.6. Записи данных и вычисления

В каждом эксперименте очень важно сразу же записать все проделанное. Запись должна быть ясной и экономной. Записи должны быть такими, чтобы сами были в состоянии без особого труда понять их спустя некоторое время.

Как вести запись: в одной рабочей тетради или на листках с последующим переписыванием. Преимущество рабочих тетрадей в том, что всегда известно — только в ней и надо все искать, нет разрозненных листков, которые могут затеряться. Главный недостаток рабочей тетради — это то, что в любом эксперименте, даже не очень сложном, от одного измерения часто приходят к другому, а затем обратно, и запись каждого из них оказывается разрозненной.

Преимущество отдельных листков в том, что записи, посвященные одному и тому же вопросу, всегда можно собрать воедино независимо от других, их разделяющих. Такие листы можно собрать (например, в скоросшивателе) в любом количестве и в любом порядке. Очевидно, что сочетание рабочей тетради с отдельными листками даст преимущества того или другого способа. При этом очень полезно пронумеровать все листки или страницы рабочей тетради.

Запись измерений.

Важная задача практической физики состоит в том, чтобы научиться к четкой и эффективной записи. Прежде всего, для этого нужно научиться записывать непосредственно измеряемые величины – все результаты измерений следует записывать немедленно и без какой-либо обработки. Из этого правила нет исключения. Не проводите никаких предварительных расчетов, даже самые простые, прежде чем не запишете результаты измерений – это показания прибора в делениях шкалы и предел измерений на приборе. При проведении и записи измерений хорошо проверите то, что записали, взглянув еще раз на прибор. Все записи надо датировать!

У многих студентов есть одна плохая привычка записывать результаты измерений, наблюдений на клочке бумаги или в черновой тетради, затем переписывать их в чистовую тетрадь, а оригинал выбрасывать. Против этого можно выдвинуть три возражения: а) это приводит к большой потере времени; б) при переписывании возможны ошибки; в) практически невозможно избежать отбора данных.

Последнее замечание особенно важно, ибо там возможно будут «не показательные» результаты измерений или другие неудобные записи. В записи важна не красота, а ясность!

Все первичные данные измерений надо сохранить!

Схемы.

Значение схем в записях эксперимента и в отчетах об эксперименте вряд ли можно переоценить. Дополненная несколькими словами схема часто оказывается самым простым и самым хорошим способом объяснения идеи эксперимента, описания установки и введения обозначений. Схема не должна быть художественным или фотографически точным изображением установки. Она должна быть как можно проще. На схеме должно быть указано только то, что имеет отношение к эксперименту. Иногда схема, искажая масштаб, может выявить ту или иную особенность установки.

Древняя китайская пословица гласит: «Один рисунок лучше тысячи слов».

Таблицы.

Старайтесь всегда записывать результаты измерений в виде таблиц. Такая запись компактнее и проще для чтения. Значения одной и той же величины лучше всего записывать в вертикальный столбик. В начале каждого столбца напишите название или символ соответствующей величины и укажите единицу измерения. При этом удобно придать единице измерения такой десятичный множитель, чтобы записываемые значения были заключены в интервале примерно от 0.1 до 10^3 . На практике чаще это делается в таком виде: E , 10^6 В/м или $E \cdot 10^6$, В/м. Второй способ менее практичен, удобно пользоваться первым способом.

В таблицах следует избегать повторов и исправлений. Привычка к исправлению – враг ясности.

Схемы и таблицы – это две формы записи, которые позволяют добиться большой ясности.

Вычисления.

Цель эксперимента – получить некоторую числовую величину, и поэтому точность при вычислениях так же важно, как и при измерениях. В вычислениях жестко следите, чтобы все числовые значения были приемлемы по порядку, а все величины были в одной системе измерений. Иногда бытует ложное представление, что числовые выкладки – это тривиально и не очень важное дело. Считаем, что неспособность к ним есть отсутствие математического прозрения или таланта.

О вычислениях ошибок измерений и приближения в числах говорили выше.

Задача 1. ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель задачи: ознакомление с одним из способов изучения характеристик электростатических полей, основанном на математическом моделировании, на примере поля с осевой симметрией (радио-телекабели).

Принадлежности: источник питания, планшет с электродами, микроамперметр, зонд, магазин сопротивления на 10^4 Ом.

При конструировании электронных ламп, электронных линз и других приборов требуется знание распределения электрического поля в пространстве, заключенном между электродами произвольной формы. Теоретический расчет этих полей возможен только для самых простых конфигураций полей, а в общем случае он практически не выполним. Поэтому сложные электрические поля исследуются экспериментально, методом их моделирования. В основе моделирования всех физических явлений лежит взаимодействие между телами или частицами, участвующими в этих явлениях. Согласно представлениям современной физики всякое взаимодействие передается через некоторое поле. Электрические заряды взаимодействуют через электрические поля, которое они создают в пространстве вокруг себя.

Электрическое поле может существовать и в вакууме и в средах. В последнем случае взаимодействие между телами уменьшается на величину диэлектрической проницаемости среды. Сила взаимодействия между зарядами определяется законом Кулона, а эта сила, отнесенная к единице одного из взаимодействующих зарядов, называют напряженностью поля. Напряженность поля удобно графически изображать с помощью силовых линий, где под линией напряженности принимается линия касательная, к которой в каждой точке совпадает по направлению с вектором напряженности. Картина силовых линий взаимодействия двух заряженных тел приведена на рис. 1 (см. настоящее издание, § 2, части 1).

Вектор напряженности электрического поля E – это силовая характеристика электрического поля.

В качестве скалярной характеристики поля используют потенциал. Под потенциалом понимается работа, затрачиваемая на перемещение единичного положительного заряда из бесконечности в данную точку. Потенциал φ – энергетическая характеристика поля. Поскольку одно и тоже электрическое поле можно характеризовать двумя физическими понятиями (величинами), то они, очевидно, связаны между собой выражением

$$\Delta\varphi = -(\vec{E} \cdot \Delta\vec{l}) = -|\vec{E}| \cdot |\Delta\vec{l}| \cdot \cos\alpha,$$

из которого следует, что разность потенциалов между двумя близкими точками, соединенными вектором $\Delta\vec{l}$, составляющий угол α с напряженностью поля E . Отметим, что силовые линии напряженности поля E

и эквипотенциальные линии (линии равного потенциала) взаимно перпендикулярны.

Для математического моделирования электростатического поля широко используют тот факт, что электрическое поле стационарного тока слабо проводящей жидкости или твердой среды является потенциальным. Это позволяет использовать электрическое поле стационарного тока в слабо проводящей среде для моделирования электростатического поля заряженных тел в вакууме.

При моделировании используют электроды, взаимное расположение которых должно быть таким же, как и в моделируемом приборе. На электроды подается напряжение, равное или пропорциональное тому, что и в моделируемом приборе. При соблюдении этих условий электрическое поле между электродами будет иметь ту же конфигурацию, что и моделируемое поле, отличаясь от него лишь значением напряженности поля.

Если между электродами поместить слабо проводящую среду, то картина электрического поля в общем случае, изменится. Однако при соблюдении некоторых условий, таких изменений можно избежать:

1) если электропроводность среды мала (мал и ток, протекающий через среду);

2) электропроводность электродов, напротив, велика. Это позволяет пренебречь падением напряжения в их объеме, а значит считать, что поверхность электродов является эквипотенциальной поверхностью. Ход силовых линий при этом аналогичен ходу силовых линий в диэлектрической среде, в вакууме. При таком моделировании силовым линиям электростатического поля соответствует линии тока, а поверхностям равного потенциала - поверхности равного напряжения. Преимущество этого моделирования состоит в том, что измерение поля в слабо проводящей среде можно выполнить значительно проще, чем в непроводящей. Эта простота вызвана тем, что в токопроводящей среде обычно измеряется потенциал, а не напряженность поля. Для таких измерений используют зонды (электроды), вводимые в поле. Зонд представляет собой проводник, хорошо изолированный по всей длине, кроме конца. Для измерения разности потенциалов между двумя точками в токопроводящей среде необходимо прикоснуться зондами к этим точкам и измерить напряжение вольтметром, подключенным к ним. Таким методом в токопроводящей среде можно наметить линии равного потенциала. Линии тока при этом будут ортогональны линиям равного потенциала и соответствуют силовым линиям напряженности моделируемого электростатического поля.

В настоящей работе моделируется распределение потенциала электростатического поля внутри *цилиндрического конденсатора* (такой же характер имеет распределение потенциала электростатического поля бесконечной равномерно заряженной нити, в теле-радиокабелях). Поле моделируется с помощью влажного песка, в котором плотно прижаты два

коаксиальных цилиндрических электрода. Для такой модели зависимость напряженности и потенциала поля от расстояния r от оси системы можно рассчитать следующим образом. Плотность тока на расстоянии r от оси системы $j(r)$ находим из условия непрерывности $J_{(r)} = I / (2\pi r d)$, где I - полный ток, проходящий по влажному песку; d - толщина слоя влажного песка. Тогда для напряженности поля на расстоянии r получаем

$$E_{(r)} = J_{(r)} / \sigma \quad \text{или} \quad E(r) = I / (2\pi r d \sigma),$$

где σ - электрическая проводимость влажного песка.

Экспериментальная установка в данной работе собрана таким образом, что на опыте измеряется разность потенциалов между наружным электродом, потенциал которого принимается равным нулю и потенциалом в данной точке поля. Теоретически эту разность потенциалов можно рассчитать, воспользовавшись связью между напряженностью поля и потенциалом

$$E = - \text{grad } \varphi.$$

В полярной системе координат для цилиндрического конденсатора это равенство принимает вид:

$$E_{(r)} = - d\varphi / dr = - dU_{(r)} / dr, \quad (1)$$

отсюда для потенциала получим

$$U_{(r)} = - \int_{r_n}^r E_{(r)} dr = \frac{I}{2\pi d \sigma} \ln \frac{r_H}{r}, \quad (2)$$

где r_n - радиус наружного электрода.

Полученные выражения для $E(r)$ и $U(r)$ можно переписать в виде, удобном для опытной проверки, если вместо величин σ , J и d внести величины r_n , $r_{вн}$ и U_0 , легко измеряемые в эксперименте ($r_{вн}$ - радиус внутреннего электрода, U_0 - разность потенциалов между наружным и внутренним электродами). Тогда

$$U_0 = U_{(r_{вн})} = \frac{I}{2\pi \sigma d} \ln \frac{r_H}{r_{вн}}, \quad (3)$$

$$U_{(r)} = \frac{U_0}{\ln \frac{r_H}{r_{вн}}} \ln \frac{r_H}{r}, \quad (4)$$

$$E_{(r)} = \frac{U_0}{\ln(r_H / r_{вн})} \frac{1}{r}. \quad (5)$$

Содержание настоящей работы состоит, таким образом, в определении опытным путем зависимостей $U = U(r)$ и $E = E(r)$ и сравнении полученных результатов с этими же зависимостями, найденными теоретически и выраженными формулами (4) и (5). Формулу (3) используется для определения σ .

Описание экспериментальной установки.

Электрическая схема установки для моделирования распределения потенциала и напряженности электрического поля, обладающего осевой симметрией, приведена на рис.1, где 1 - наружный электрод радиуса r_n ; 2 - увлажненный песок; 3 - центральный электрод радиуса $r_{вн}$; 4 - зонд – электрод; 5 - микроамперметр и R_q - дополнительное сопротивление к микроамперметру. Электрическая схема питается от источника питания (6) постоянным регулируемым стабилизированным напряжением в пределах $0 \div 9$ В. Описанная схема позволяет проводить измерения напряжения между наружным электродом 1 и какой-либо точкой А проводящей среды 2. Измерительным прибором является микроамперметр, который из-за наличия большого дополнительного сопротивления $R_q = 100$ кОм работает в режиме вольтметра. Подключение измерительной цепи, благодаря большому дополнительному сопротивлению R_q по сравнению с сопротивлением участка токопроводящей среды между точкой А и наружным электродом, не вносит заметных искажений в силу тока на этом участке и следовательно, в падение напряжения $U(r)$ между точкой А и наружным электродом

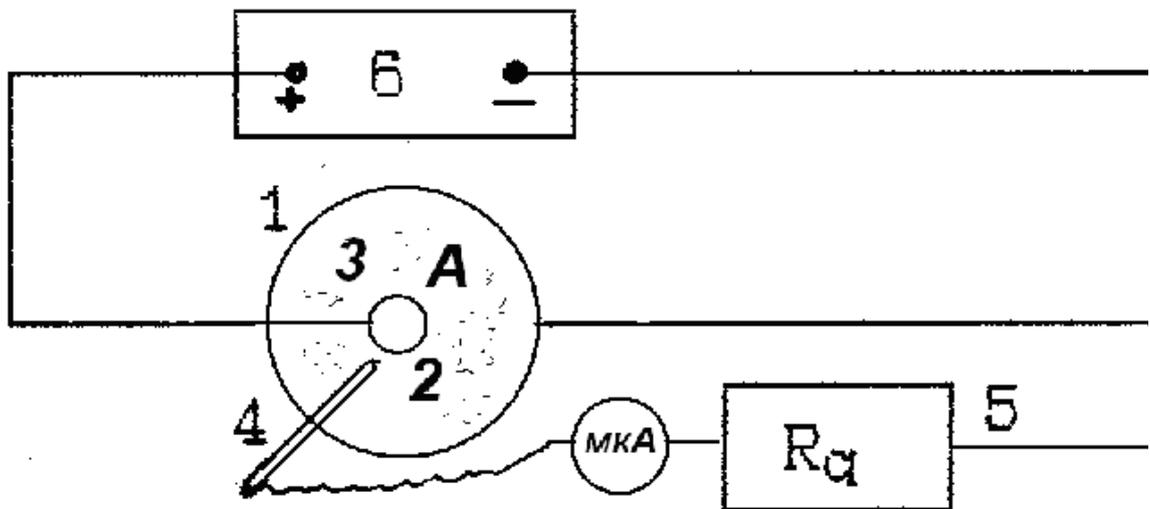


Рис. 1.

Если пренебречь сопротивлением зоны контакта между зондом и проводящей средой, а также внутренним сопротивлением микроамперметра по сравнению с величиной R_q , то ток, протекающий через микроамперметр $I(r) = U(r) / R_q$, где r - расстояние от оси модели до изучаемой точки А. Зная силу тока $I(r)$, проходящего через микроамперметр, найдем

$$U(r) = I(r) \cdot R_q. \quad (6)$$

Для более точного определения $I_{(r)}$ измерения проводят несколько раз для точек А, лежащих в разных направлениях (рис.2), но на одинаковом расстоянии от оси

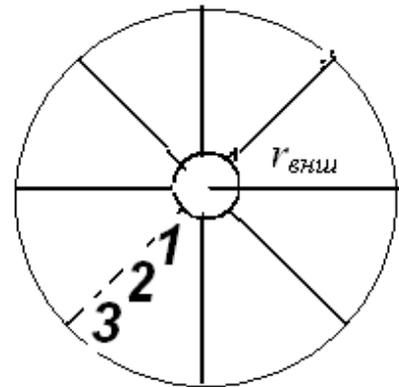


Рис.2.

модели, (рис.2). После этого находят его среднее значение

$$\langle I_{(r)} \rangle = \frac{1}{n} \sum I_{I(r)}, \quad (7)$$

с помощью которого окончательно получаем

$$U_{(r)} = \langle I_{(r)} \rangle \cdot R_q, \quad (8).$$

Описываемая установка позволяет изменять r от 1.6 см (внутренний радиус электрода) до 12 см (наружный радиус электрода, $r_{внш}$) с шагом равным 1 см

Значение R_q порядка 50 – 100 кОм.

По рассчитанным из опытных данных значениям $U_{(r)}$ далее находим зависимость напряженности поля в данной точке токопроводящей среды от расстояния r . Для этого воспользуемся зависимостью между $U(r)$ и $E(r)$:

$$E_{(r)} = \frac{U_{(r)} - U_{(r+l)}}{r}, \quad (9)$$

где $U(r+l)$ - напряжение на расстоянии $r+0,01$ м (r измерено в м). В данной работе напряжение $U(r)$ измеряется в точках, отстоящих на расстоянии $\Delta r=0.01$ м друг от друга. Напряженность поля в этих точках можно определить, если воспользоваться имеющимися данными для $U(r)$, в единицах вольт/метр, если U выражено в В.

Порядок выполнения работы :

1. Пользуясь описанием, ознакомиться с установкой.
2. Подготовить установку к работе. Для этого поставить ручку потенциометра, регулирующего напряжение на выходе источника тока в крайне левое положение и подключить с помощью проводников установку к выходным гнездам выпрямителям, соблюдая полярность.
3. Включить "СЕТЬ".
4. Коснуться зондом 4 внутреннего электрода и вращением ручки потенциометра регулятора выхода источника тока б добиться того, чтобы стрелка микроамперметра отклонилась на всю шкалу прибора (при

необходимости, нужно менять пределы регулировки напряжения). Обозначим через I_o максимальный ток. Очевидно $U_o = I_o R_q$.

5. Выбрать на токопроводящей среде какой-либо произвольный луч (радиус). Установить зонд последовательно в точки луча с радиальными координатами 1, 2, 3,...см, и записать соответствующие показания микроамперметра $I(r)$ во второй столбец таблицы 1. (форма таблицы приведена в конце задачи).

Примечание. При измерении тока зонд необходимо ставить не на сам луч, а рядом с ним. Прижим зонда к среде должен быть достаточным для обеспечения хорошего контакта, о чем можно судить по достижению максимального значения тока в данной точке.

6. Повторить измерения, описанные в п.5, на всех лучах. Полученные значения $I_2(r)$, $I_3(r)$, $I_4(r)$,... записать в таблицу.1.

7. Выключить источник постоянного тока. Убрать зонд. Измерить с помощью линейки радиусы внутреннего $r_{вн}$ и наружного $r_{н}$ электродов и записать значения R_q .

Обработка результатов и измерений.

1. Вычислить значения U_o ($U_o = I_o R_q$). По формуле (3) оценить σ .

2. Рассчитать:

а) для каждого значения r (1,2,3,...см.) среднее значение тока $I(r)$ по формуле (7);

б) экспериментальное значение разности потенциалов $\langle U_{эксн}(r) \rangle = \langle I(r) \rangle / R_q$

в) теоретическое значение разности потенциалов $U_{теор}(r)$ по формуле (4). Занести полученные результаты в таблицу 1.

3. Рассчитать по формуле (9) значение $E_{эксн}(r)$ для $r = 2,3,4,...$ см. Записать результат в таблицу 2.

4. По формуле (5) найти теоретическое значение $E_{теор}(r)$ для тех же значений r , что и в п.3, и также внести их в таблицу 2.

5. Пользуясь **данными таблиц 1 и 2 построить графики** зависимости $E_{теор}$ и $U_{теор}$ от r и на этих графиках в разных значках нанести результаты эксперимента ($E_{эксн}$, $U_{эксн}$ от r).

6. Оценить среднее относительное отклонение экспериментальных данных от теоретических кривых (в % по отношению к максимальным значениям U и E).

При проведении экспериментов по измерению радиальных токов через увлажненный (не сильно) песок необходимо следить за постоянством выходного напряжения источника тока. По необходимости его нужно отрегулировать с помощью ручек регулирования на источнике тока.

Форма оформления таблиц приведена ниже.

Таблица 1

Радиус, см	Ток $I(r)$, мкА					Ср. ток	$U(r)$, В	
	Лучи						Экспер.зн ач. $U(r)$	Теор. значение
	1	2	3	4	5	$\langle I(r) \rangle, A$	$\langle I(r) \rangle R_q$	
R_1								
R_2								

Таблица 2

Радиус R, см.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_{\text{эксп}}, В/м$									
$E_{\text{теор}}, В/м$									

Дополнительное задание: продумать выполнение этой работы для плоскопараллельных или других форм электродов.

Литература

1. С.Г. Калашников. Электричество. М.: Наука. 2004. С.11- 63.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. М.: Наука, 1977. §§.5, 6, 18, 19, 40,41,46,47.
3. И.В. Савельев. Курс общей физики. М.: Наука, 1977, Т.2, §§ 5,8, 12-14,31,32.
4. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики. М.:2007,Т.2. гл. XIV. §§ 120 -138.
5. Настоящее учебное пособие, часть 1.§2. С.10, §§2,3. С.10, С.31.

Задача 2. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Цель задачи: изучение закона Ома для участков цепи, содержащих и не содержащих ЭДС, а также для замкнутой цепи.

Определение внутреннего сопротивления амперметра.

Принадлежности: выпрямитель постоянного тока типа ВС-4, аккумуляторная батарея, нормальный элемент, гальванометр с нулем в середине шкалы, реостаты, реохорд.

Согласно закону Ома отношение разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ на концах проводника (напряжение) к силе тока I в этом проводнике есть величина постоянная, называемая его электрическим *сопротивлением*, R :

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{I} = \frac{U}{I} = const = R, \quad (1)$$

Соотношение (1) называют законом Ома для участка цепи.

Более общим, чем рассмотренный случай является участок цепи с сопротивлением, содержащим ЭДС (рис.1).

В этом случае вместо (1) имеет место соотношение:

$$\pm |I| \cdot R_{1,2} = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm |\varepsilon_n|, \quad (2)$$

где $R_{1,2}$ - сопротивление участка цепи между точками 1 и 2, равное в данном случае сумме сопротивления резистора R и внутреннего сопротивления r источника ЭДС - ε_n на участке 1-2

Соотношение (2) называют законом Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.

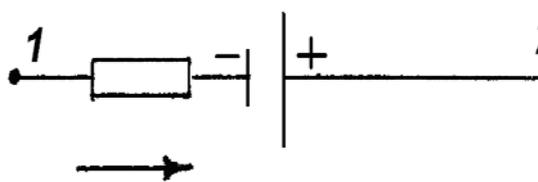


Рис.1.



Правила выбора знаков здесь следующие:

прежде всего, выбирают произвольное направление обхода источника ЭДС, например, слева направо. Если при этом направление обхода совпадает с направлением тока, то слева в формуле (2) ставят знак (+), и соответственно, если источник ЭДС обходят (внутри) от "-" к "+", то ЭДС берут со знаком "+".

Если же направление тока противоположное направлению обхода источника ЭДС ставят знак (-) и, соответственно, если источник внутри обходят от "+" к "-", то I и ε берут со знаком "-".

Если направление тока неизвестно, то оно выбирается предположительно. В этом случае, вычисленные токи окажутся положительными, если предположение было верным, в противном случае вычисленные токи окажутся отрицательными.

Упражнение 1.

Измерение внутреннего сопротивления амперметра.

В работе предлагается измерить внутреннее сопротивление амперметров исходя из верности закона Ома в проводниках первого рода

Порядок выполнения.

1. Соберите электрическую схему, приведенную на рис.2.

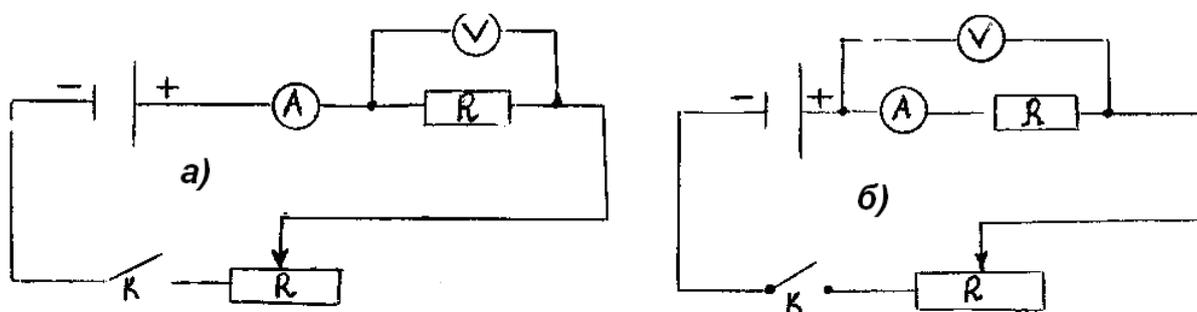


Рис.2.

Обратите внимание, в чем состоит различие схем на рис.2 а) и б)!

2. Сначала по схеме а) измерьте зависимость силы тока через амперметр от разности потенциалов (по показаниям амперметра и вольтметра). Шаг изменения напряжения выбрать по предельным возможностям приборов.

3. Повторить эти же измерения по схеме б) на рис.2. Полученные данные занести в таблицу 1 с учетом единой системы измерений.

4. На одной и той же миллиметровой бумаге построить графики I от U для обоих измерений.

5. По линейной зависимости I от U (выполнение закона Ома) найти тангенс угла наклона для 1 и 2 линий, $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R}$.

$(\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{1}{R_1}$ и $\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{R_2})$. Из этих выражений найдите R_1 и R_2 . Очевидно, что разность $R_2 - R_1$ и есть внутреннее сопротивление амперметра, $R_{\text{внутр}}$.

Упражнение 2.

Измерение электродвижущей силы.

Если "обычный" вольтметр (отклонение стрелки которого обусловлено током, проходящим по подвижной системе прибора, например, по рамке или катушке) присоединить к полюсам

источника тока, то даже при разомкнутой внешней цепи (рис.3) показание вольтметра не будет равно ЭДС ε источника тока. Вольтметр указывает только на разность

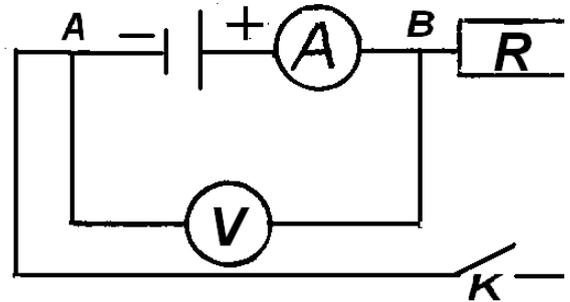


Рис.3.

потенциалов $\varepsilon - \varphi_A, \varphi_B$ в тех точках схемы к которым присоединен вольтметр, в данном случае полюсов A и B источника тока (падениями потенциала в соединенных проводах пренебрегаем ввиду их малости):

$$\varphi_A - \varphi_B = IR_B, \quad (3)$$

где R_B - сопротивление вольтметра. Присоединение вольтметра к полюсам источника создает замкнутую цепь, в которой течет ток

На основании закона Ома для участка цепи можно написать:

$$\varphi_B - \varphi_A = \varepsilon - Ir, \quad (4)$$

где Ir - падение потенциала в источнике тока, r - его внутреннее сопротивление.

Из выражения (4) следует, что показания вольтметра ($\varphi_B - \varphi_A$) всегда меньше ЭДС ε . Показание вольтметра тем ближе к ЭДС, чем меньше сила тока в приборе и соответственно через, источник тока. Для не очень точных измерений ЭДС можно использовать вольтметр с достаточно большим сопротивлением R_B . Для более точных измерений ЭДС с помощью (4) нужно измерить еще и силу тока I_B . Это усложняет процесс измерения ЭДС.

Упражнение 3.

Измерение ЭДС методом компенсации.

Возможен другой путь измерения ЭДС. Из выражения (4) следует, что ЭДС источника тока равна разности потенциалов его полюсов только при отсутствии тока в источнике. Этого можно добиться, если ток, создаваемый данным источником скомпенсировать током, создаваемым другим источником. Эта идея и реализуется в так называемом *методе компенсации* (см. приложение, п.2.)

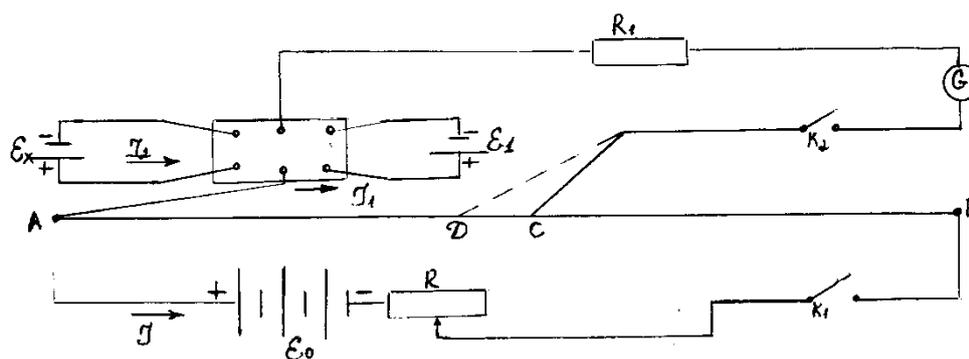


Рис.4.

Компенсационный метод измерения электродвижущей силы источника тока можно изучить при помощи установки, схема которой дана на рис.4. На этом рисунке ε_0 - источник постоянного напряжения (выпрямитель или аккумулятор на 5 – 6 В), ε_x - исследуемый гальванический элемент или элементы, AB - реохорд с линейкой и подвижным контактом $D...C$, G - гальванометр с нулем по середине, R - сопротивление порядка 10^5 Ом, K_1, K_2 - ключи. Источники ε_0 и ε_x (или ε_n) включены навстречу друг другу, причем $|\varepsilon_0| > |\varepsilon_x|$.

Замыкая кратковременно ключи K_1 и K_2 , перемещая движок по реохорду AB , можно найти такое его положение C , при котором тока в гальванометре не будет. Можно показать, пользуясь правилами Кирхгоффа, что в этом случае справедливо следующее соотношение:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 \frac{R_{AC}}{R_{AB} + r_0}. \quad (5)$$

Формула (5) неудобна для нахождения ЭДС, так как требует знания r_0 . Эту трудность обходят следующим образом. Если источник заменить другим источником с ЭДС ε_n , то при компенсации для него будет справедливо, аналогичное (4) соотношение:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 \frac{R_{AC}}{R_{AB} + r_0}. \quad (6)$$

Компенсация в этом случае наступает при другом положении движка - C' . Из (5) и (6) получаем

$$\varepsilon = \varepsilon_n \frac{R_{AC}}{R_{AC}} = \varepsilon_n \frac{l}{l_1}. \quad (7)$$

Здесь учтено, что вследствие однородности струны AB , сопротивления частей AC и AD пропорциональны l и l_1 .

Во избежание ошибок при измерении следует учесть, что длины l и l_1 , отсчитывают от точки A , которая на схеме является общей точкой одноименных полюсов источников ε и ε_0 .

В работе в качестве источника ε_n берется нормальный элемент Вестона, ЭДС ε_n которого очень стабильна и известна с высокой точностью ($\varepsilon_n = 1,01853 \text{ В}$).

Нормальный элемент Вестона - это эталон ЭДС. Применяется только для градуировки соответствующей измерительной установки. Максимальная допустимая сила тока в нормальном элементе мала – всего несколько микроампер. Поэтому нормальный элемент можно использовать только при условии защиты его от перегрузки сопротивлением порядка $10^5 - 10^6 \text{ Ом}$.

Порядок выполнения работы

1. Соберите схему установки согласно рисунку 4, взяв в качестве источника ЭДС нормальный элемент. Затем измерить ЭДС каждого из двух предложенных источников (ε_1 и ε_2). Для этого в схему компенсации в качестве источника ЭДС включите исследуемый элемент ε_x ; результаты измерений и вычислений запишите в таблицу 2. В каждом случае получайте состояние компенсации не менее 4 - 5 раз.

2. Оцените погрешность измерения ЭДС.

3. Измерьте аналогичным образом ЭДС батареи, составленной из последовательно соединенных источников ε_1 и ε_2 . Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

4. Сравните результаты с результатами упражнения 2.

Форма оформления таблиц.

Таблица 1

$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$\text{tg}\alpha_1$	$\text{tg}\alpha_2$	R_1	R_2	$R_{\text{ампер}} = R_2 - R_1$

Таблица 2

Упр. 2 $\varepsilon_1, \text{ В}$	Компенсационный метод, $\varepsilon_2, \text{ В}$	$\varepsilon_2 - \varepsilon_1, \text{ В}$

Литература

1. Калашников С.Г. Электричество. М., 1977. гл.7.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М., 1977. Т.3, № 43,45,96.
3. Савельев М.В. Курс общей физики. М., 1978. Т.2, № 33,35,37.
4. Фриш Э.С., Тиморева А.В. Курс общей физики. М.: 2007. Т.2. §§ 158, 164, 167. С.135, 155, 167.
5. Настоящее пособие §7. С.51. Приложение 1 (компенсационный метод).

Задача 3. ТОК В ВАКУУМЕ. ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВАКУУМНОГО ДИОДА

Цель задачи: Исследование вольтамперной характеристики, тока термоэлектронной эмиссии вакуумного диода, определение удельного заряда электрона и контактной разности потенциалов.

Принадлежности: Вакуумный диод (радиолампа типа 2Ц2С), источник тока - выпрямитель на 250 – 300 В, многопредельный микроампервольтметр, реостаты на 10 Ом, и 10^3 Ом, амперметр на 1.5 А, вольтметр.

Вакуум (от лат. *vacuum* – пустота) – состояние газа при давлении меньше атмосферного. Остаточный газ в лампе не проводит электрический ток. Для возникновения тока в такой среде нужен источник свободных носителей заряда – электронов. В вакуумных лампах в качестве источника электронов используют

нагреваемый электрод – катод. Вакуумный диод (два электрода) представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух до давления порядка 10^{-6} мм.рт.ст., в который впаяны

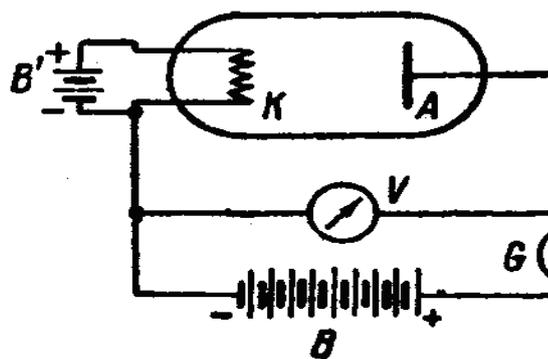


Рис.1.

два электрода: катод - К и анод – А, выполненный из металла обычно в форме цилиндра (см. рис.1). В электрической цепи *катод диода соединяют с отрицательным*, а *анод – с положительным полюсами источника тока*.

При обычных температурах, имеющиеся в металле свободные электроны удерживаются внутри металла. Это означает, что на границе металл-вакуум существует потенциальный барьер, мешающий электронам покидать металл. Наличие этого барьера объясняется тем, что при выходе электронов в вакуум на них действуют силы электрического притяжения со стороны металла, в котором благодаря выходу электрона произошло перераспределение свободных зарядов. Под действием этих сил, электрон, если его кинетическая энергия недостаточна, возвращается в металл. Кроме того, электроны, временно вышедшие из металла в вакуум, создают над катодом электрическое поле (*отрицательный пространственный заряд*), также препятствующее дальнейшему выходу электронов из металла.

Таким образом, электрическое поле, действующее на каждый электрон вышедший из электрода, складывается из внешнего поля, создаваемого

разностью потенциалов между электродами (катод-анод), и поля, создаваемого всеми вышедшими электронами, образующими пространственный заряд над катодом.

В результате, при малых разностях потенциалов между анодом и катодом (анодное напряжение), из-за пространственного заряда, анодный ток I_a , обусловленный выходом электронов из катода (эмиссия электронов), может быть значительно меньше ожидаемого значения. Этот ток постепенно увеличивается при повышении анодного напряжения. Увеличение анодного тока при малых анодных напряжениях связано с тем, что анод притягивает электроны из области пространственного заряда вблизи катода.

Если накаливать катод лампы и постепенно увеличивать анодное напряжение, анодный ток будет увеличиваться, пока не достигнет насыщения. Насыщение анодного тока наступает тогда, когда все электроны, испускаемые катодом в единицу времени, попадают на анод, т.е. при дальнейшем увеличении анодного напряжения анодный ток уже не может увеличиваться. Нагревание способствует выходу электронов из катода – термоэлектронная эмиссия. Таким образом, величина тока насыщения определяется термоэлектронной эмиссией электронов из катода. При увеличении тока накала, а следовательно, и температуры катода, ток насыщения возрастает ($I_1 < I_2 < I_3$ при $T_1 < T_2 < T_3$).

График вольтамперной характеристики (ВАХ) для вакуумного диода, при разных температурах накала катода, приведена на рис. 2.

Теоретическое рассмотрение зависимости анодного тока I_a от

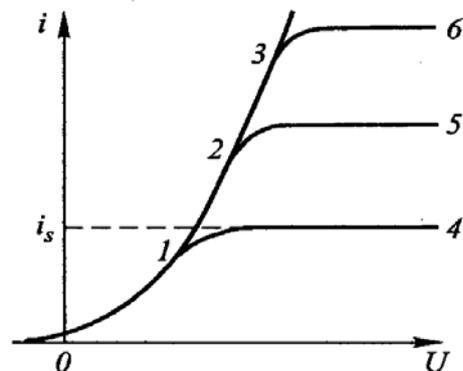


Рис.2.

величины анодного напряжения U_a в вакуумном диоде ниже выполнено при следующих допущениях:

1) начальные скорости электронов, эмитируемых катодом, настолько малы, что можно считать их равными нулю (при анодных напряжениях в десятки вольт это допущение оправдано);

2) анодный ток далек от насыщения;

3) пространственный заряд создает такое распределение потенциала непосредственно у поверхности катода, напряженность электрического поля которого равна нулю дает для зависимости I_a от U_a (для «средней части» ВАХ) выражение:

$$I_a = K \cdot U_a^{3/2}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, заряда и массы электрона; e/m – удельный заряд электрона ($\frac{q}{m} = 1.176 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$); r_a – радиус анода; l – длина катода; β – коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода (при отношении радиусов r_a/r_k больше 10 – β близок к единице).

В случае коаксиальных цилиндрических электродов

$$K = \frac{\varepsilon_0 2\sqrt{2}}{9} \cdot \sqrt{e/m} \cdot l / r_a \beta^2. \quad (2)$$

Выражение (1) называют **законом трех вторых** или **уравнением Богуславского-Ленгмюра** (вывод уравнения Богуславского – Ленгмюра дается в приложении 4).

Равенство (2) позволяет рассчитать удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \left[9 r_a \beta^2 k / 2\sqrt{2} \varepsilon_0 \right]^2. \quad (3)$$

На практике наблюдается отклонение от закона трех вторых. Наиболее существенными факторами, приводящими к отклонениям от закона трех вторых, являются:

1) наличие начальных скоростей электронов, эмитированных катодом (из-за этого изменяется характер распределения потенциала между катодом и анодом);

2) влияние контактной разности потенциалов между катодом и анодом (это влияние наиболее заметно при малых анодных напряжениях);

3) неэквипотенциальность катода. В случае катодов прямого накала потенциал нити не постоянен и разность потенциалов между анодом и различными участками катода оказывается разной;

4) асимметрия системы электродов, из-за некоаксиальности катода и анода;

5) наличие остаточного газа в лампе. Из-за этого при достаточно высоких анодных напряжениях происходит ионизация газа – положительные ионы нейтрализуют действие отрицательного пространственного заряда и анодный ток возрастает значительно быстрее, чем следует из закона трех вторых.

Кроме того, при снятии вольтамперных характеристик вакуумного диода при различных токах накала получается семейство характеристик, несколько различных даже при низких анодных напряжениях. Это связано с тем, что при изменении температуры катода контактная разность потенциалов между катодом и анодом и начальные скорости электронов изменяются.

При больших потенциалах наблюдается отклонение анодного тока от закона трех вторых. Анодный ток переходит в ток насыщения, что очевидно будет означать, что все термоэмитированные из катода электроны доходят до анода. Величина тока насыщения зависит от температуры (см. рис. 2).

Упражнение 1.

Снятие вольтамперной характеристики вакуумного диода и определение удельного заряда электрона.

Схема установки для проведения измерений представлена на рис.3.

В задаче используется один из типов вакуумного диода типа 2Ц2С-лампа с подогревным оксидным катодом. Оксидный катод отличается той особенностью, что у него не наблюдается резко выраженного насыщения анодного тока, как у катодов из чистых металлов. Анодное напряжение на лампу подается от выпрямителя. Величина напряжения регулируется потенциометром и измеряется вольтметром. Анодный ток лампы измеряется миллиамперметром. Ток накала регулируется реостатом и измеряется амперметром.

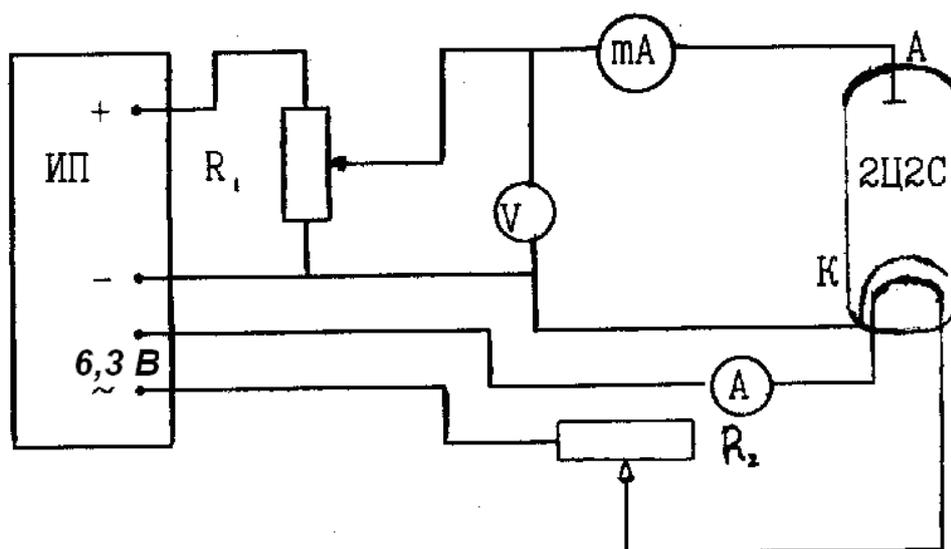


Рис.3. Электрическая схема для снятия ВАХ вакуумного диода.

Данные радиолампы типа 2Ц2С: длина катода $l = 0.9$ см, радиус анода $r_a = 0.95$ см, отношение радиусов анода и катода приблизительно равно 10, так что $\beta = 0.98$.

Для выполнения упражнения:

- 1) соберите схему для проведения измерений согласно рис.3;
- 2) изучите зависимость анодного тока от анодного напряжения, изменяя его от 0 до 300В при различных токах накала (например, от 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,75 А), постройте соответствующие вольтамперные характеристики;
- 3) постройте графики зависимости анодного тока от анодного напряжения в степени три вторых; при построении этого графика рекомендуется использовать экспериментальные данные, относящиеся к

меньшим температурам катода (но в области, где закон трех вторых еще выполняется);

4) определите угловой коэффициент, полученной прямой и рассчитайте по нему величину удельного заряда электрона в СИ, используя формулу (4).

Упражнение 2.

Изучение распределения термоэлектронов по скоростям и определение контактной разности потенциалов.

Для изучения распределения термоэлектронов по скоростям в настоящей работе используется метод задерживающего потенциала. Его суть заключается в том, что если на анод вакуумной лампы с накаливаемым катодом подавать отрицательное напряжение, препятствующее попаданию электронов на анод, то попадать на анод будут лишь те электроны, энергия которых больше работы сил электрического поля. Измеряя анодный ток при изменении величины отрицательного анодного напряжения, можно непосредственно исследовать распределения термоэлектронов по энергиям или по скоростям.

Расчет распределения термоэлектронов по скоростям согласно классической статистике приводит к выражению:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right), \quad (5)$$

где I_0 - сила тока при нулевой разности потенциалов между катодом и анодом, U - величина отрицательного анодного напряжения. Экспериментальную проверку формулы (5) удобно осуществить построением графика зависимости $\ln I$ от величины анодного напряжения. Этот график

является прямой линией, угловой коэффициент которой равен $\operatorname{tg} \alpha = \frac{q}{kT}$

$$\ln I = \operatorname{const} - \frac{e}{kT} U. \quad (6)$$

Определив угловой коэффициент прямой, можно рассчитать температуру, соответствующую состоянию электронного газа. Опыт показывает, что при термоэлектронной эмиссии электронный газ находится

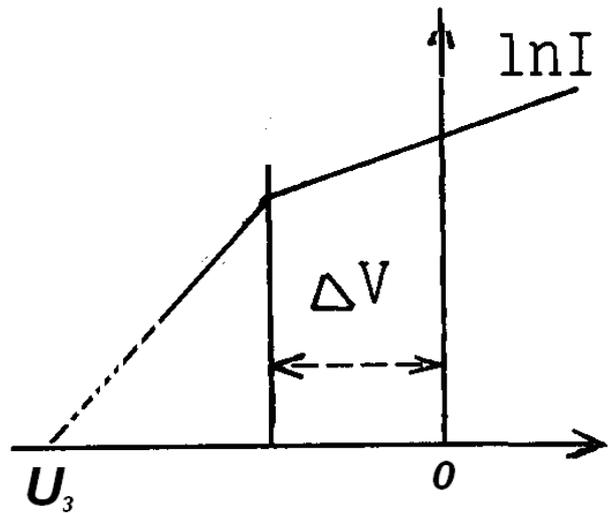


Рис.4.

в тепловом равновесии с катодом, так что тем самым определяется температура катода. Кроме того, если учесть, что анод и катод лампы сделаны из разных материалов, то между ними имеется **контактная разность потенциалов**, изменяющаяся при изменении температуры катода. Контактная разность потенциалов алгебраически складывается с приложенным извне напряжением. Знак и величину ее можно определить непосредственно по графикам, построенным в соответствии с формулой (6). На рис.4 показан примерный график зависимости $\ln I$ от U , иллюстрирующая определение контактной разности потенциалов ΔV между анодом и катодом путем экстраполяции обеих частей графика прямыми линиями до пересечения между собой. Участок прямой между осью ординат и точкой пересечения соответствует контактной разности потенциала.

После определения контактной разности потенциалов можно построить график зависимости анодного тока от величины отрицательного анодного напряжения. Такой график показывает, какое число электронов обладает энергиями, большими определенной величины, соответствующей задерживающему анодному напряжению (речь идет не о полной энергии электронов, а об энергии, связанной с движением его от катода к аноду). *Задерживающий потенциал определяется экстраполяцией прямой линии на рис.4 в точке ее пересечения с осью абсцисс.* От величины задерживающего напряжения легко перейти к соответствующей составляющей скорости электронов, воспользовавшись известным соотношением

$$\frac{mv^2}{2} = eU_{\zeta}. \quad (7)$$

Упражнение выполняется на установке, приведенной на рис.3. Для его выполнения анодный ток лампы измеряется многопредельным микроамперметром, так как величина тока изменяется в широких пределах.

Такой микроамперметр обладает заметным внутренним сопротивлением. Поэтому при расчете величины отрицательного напряжения на аноде лампы следует учитывать падение напряжения на микроамперметре, вычитая его из показаний вольтметра. Внутреннее сопротивление микроамперметра, различное при разных пределах измерения, указывается на приборе (в других случаях указывается падение напряжения на приборе при отклонении стрелки).

Ток накала катода регулируется реостатом и измеряется амперметром.

Для выполнения упражнения:

1) соберите схему для проведения измерений анодного тока от анодного напряжения, согласно рис.3. При этом нужно изменить полярность потенциала на аноде и катоде. Изменение полярности анодного напряжения осуществляется переключением проводов, соединяющих катод лампы и микроамперметр с вольтметром;

2) изучите зависимость анодного тока от задерживающего напряжения, изменяя U от -1,0 до +1,50 В, при различных токах накала (например, 1,4; 1,5; 1,6; 2,0 А);

3) по полученным данным постройте график зависимости $\ln I$ от U ; определите по ним величину и знак контактной разности потенциалов между катодом и анодом при указанных выше токах накала;

4) рассчитайте по графикам значение температуры катода (по тангенсу угла наклона ($\operatorname{tg} \alpha = q/kT$));

5) постройте графики зависимости относительного числа электронов, имеющих скорость (в направлении от катода к аноду) больше определенной величины по формуле (7).

Упражнение 3.

Изучение явления термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электрона

Чтобы электрон мог покинуть металл, он должен обладать некоторой энергией $q\phi$, характерной для каждого металла. Величина дополнительной энергии (разность $W_{вне} - W_{внутри}$), которую необходимо сообщить наиболее быстрым электронам при абсолютном нуле, чтобы они могли покинуть металл (при соответствующем направлении их скорости), называется **работой выхода электрона** – $q\phi$. Величина работы выхода определяет высоту потенциального барьера для электронов на границе металл-вакуум и является характерной для каждого металла. При повышении температуры увеличивается скорость хаотического движения электронов в металле. При этом число электронов, способных покинуть металл, резко возрастает. Расчет плотности тока j_n при термоэлектронной эмиссии, в котором используется квантовая статистика Ферми-Дирака, приводит к выражению

$$j_H = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right), \quad (8)$$

где A - постоянная величина, k - постоянная Больцмана. Выражение, соответствующее формуле (8), носит название **уравнения термоэлектронной эмиссии** (формула Ричардсона - Дешмена). Благодаря экспоненциальному множителю, плотность термоэлектронного тока чрезвычайно сильно зависит от работы выхода и температуры катода. Логарифмируя уравнение (8), получаем:

$$\ln(j_H/T^2) = const - \frac{e\phi}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (9)$$

Такой вид уравнения термоэлектронной эмиссии наиболее удобен для его экспериментальной проверки и определения работы выхода. График зависимости $\ln(j_H/T^2)$ от $1/T$ по формуле (9) получается прямая линия, угловой коэффициент которой равен $e\phi/k$. Определив его, рассчитывают работу выхода. Этот метод определения работы выхода называется **методом Ричардсона**.

Для выполнения упражнения необходимо:

- 1) собрать схему для проведения измерений, согласно рис.3;
- 2) изучить зависимость анодного тока от анодного напряжения при токах накала 1,4; 1,5; 1,6; 1,75 А и построить соответствующие графики, иллюстрирующие получение тока насыщения при разных токах накала;
- 3) построить график зависимости $\ln(j/T^2)$ от $1/T$ и рассчитать по нему значение работы выхода электрона из катода (данные о температуре катода следует брать из упражнения 2).

Используя значения I_H , полученные в упражнении 1 при различных значениях тока накала, постройте график зависимости $\ln I_H/T^2$ от $1/T$. По графику, как тангенс угла наклона соответствующей прямой, рассчитайте значение работы выхода.

Литература

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука. 2004. С.11- 63.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука, 1977. С.101 – 159. §§.5, 6, 18, 19, 40,41,46,47.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1977. Т.2. С.74–75.
4. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. М.:2007. Т.2. гл. XV1. § 172. С.193.
5. Настоящее пособие, часть 1. §10. Приложение 4.

Задача 4.
ИЗУЧЕНИЕ ТОКА В ГАЗАХ. ВОЛЬТАМПЕРНАЯ
ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЛАМПЫ

Цель работы: изучение электрических токов в газах и знакомство с принципом работы газоразрядной лампы в качестве генератора релаксационных колебаний.

Принадлежности: источник питания до 300 В, стабилитрон типа СГ, вольтметр, амперметр, осциллограф, звуковой генератор, реостат, амперметр и вольтметр.

Газ в нормальном состоянии не проводит электрический ток. Для того чтобы газ проводил электрический ток в нем нужно создавать свободные носители заряда (электроны и ионы). Процесс создания свободных носителей заряда в газах называют *ионизацией*, а внешний агент, вызывающий ионизацию называют *ионизатором*. Элементарный акт ионизации состоит в том, что в газах нейтральный атом или молекулу переводят в ионизированное состояние, т.е. процесс ионизации связан с затратой энергии. При этом роль внешних ионизаторов могут играть:

1. бомбардировка газа потоком быстро движущихся заряженных частиц (например, α , β излучение);
2. бомбардировка газа потоком заряженных частиц, ускоренных электрическим полем;
3. нагревание газа;
4. химическая реакция;
5. освещение газа светом коротких волн, в том числе и рентгеновским излучением;
6. действие космических лучей.

В ионизованном газе все ионы участвуют в тепловом движении молекул газа. Ионы противоположных знаков рано или поздно испытывают столкновение и при этом нейтрализуют друг друга. Этот процесс постоянного самоуничтожения ионов называется *рекомбинацией* (молизация). Таким образом, в газах одновременно присутствует два динамических процесса – ионизация и рекомбинация. Общее уравнение динамики обоих процессов (уравнение непрерывности) имеет вид

$$\frac{dn}{dt} = g - \alpha n^2, \quad (1)$$

где $\frac{dn}{dt}$ – скорость изменения числа частиц в 1см^3 , g – скорость генерации (зарождения) числа частиц в 1см^3 (определяется мощностью ионизатора) и αn^2 – скорость рекомбинации в 1см^3 , α – коэффициент рекомбинации. В равновесном состоянии, очевидно, что

$$\frac{dn}{dt} = 0, \quad g = \alpha n^2,$$

т.е. темп генерации ионов равно темпу рекомбинации.

В электрическом поле в газах наблюдается направленное движение свободных зарядов, т.е. в газах появляется ток. Появление тока в газах носит название *газовый разряд*. Для газов различают несамостоятельный и самостоятельный разряд. Несамостоятельным называют разряд, который прекращается после прекращения действия ионизатора. Самостоятельный – это когда ток в газах поддерживается и после прекращения действия ионизатора, за счет внутренних процессов.

Для несамостоятельных газовых разрядов зависимость плотности тока от напряженности поля E имеет вид

$$\vec{J} = ne(\mathcal{G}_+ + \mathcal{G}_-)\vec{E}, \quad (2)$$

где v – скорость ионов, E – напряженность поля, n – число ионов в единице объема. Зависимость тока от напряжения для газоразрядной лампы не подчиняется закону Ома и характеризуется рядом особенностей. При малых напряжениях лампа не пропускает тока ("не горит") вовсе. Ток в лампе возникает только в том случае, если разность потенциалов на ее электродах достигает "напряжения зажигания" U_1 . При этом скачком устанавливается конечная сила тока I_1 и при дальнейшем увеличении напряжения возрастает по закону, близкому к линейному. Если теперь уменьшать напряжение на горячей лампе, то при напряжении, равном U_1 лампа еще не гаснет, и сила тока продолжает уменьшаться. Лампа перестает пропускать ток лишь при "напряжении гашения" U_2 , что существенно меньше U_1 . Сила тока при этом скачком падает от значения I_2 ($I_2 < I_1$) до нуля как это видно из рис.1, где приведена типичная вольтамперная характеристика несамостоятельного газового разряда.

У реальной лампы зависимость $I(U)$ является не вполне линейной: вольтамперные характеристики, при возрастании и при убывании

напряжения, также обычно не полностью совпадают. Эти отличия носят, впрочем,

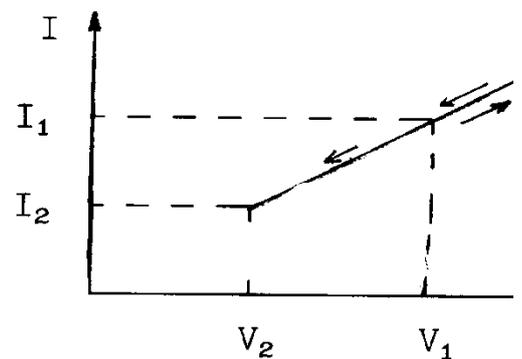


Рис.1.

второстепенный характер и для наших целей оказываются не существенными.

Упражнение 1.

Вольтамперная характеристика стабилитрона.

Для получения вольтамперной характеристики газоразрядного диода необходимо:

1. Собрать схему, изображенную на рис.2, где в качестве газоразрядного диода используется стабилитрон СГ-2.

Стабилитрон – это *газонаполненный диод* с не подогреваемым катодом. Чтобы предохранить стабилитрон от перегорания, последовательно с лампой включено добавочное сопротивление $R \sim 5 \text{ кОм}$. (это сопротивление в схеме остается при всех измерениях).

2. При выполнении упражнения нужно возможно точно определить потенциалы зажигания и гашения $U_{заж} = U_1$ и $U_{гаш} = U_2$ и соответствующие им токи I_1 и I_2 . После этого выполнение упражнения связано с изменением значения напряжения между катодом и анодом (шагом 5 В) сначала в прямом направлении до $150 \div 300 \text{ В}$, а затем в обратном направлении до гашения лампы.

3. Построить графики $I(U)$ для стабилитрона

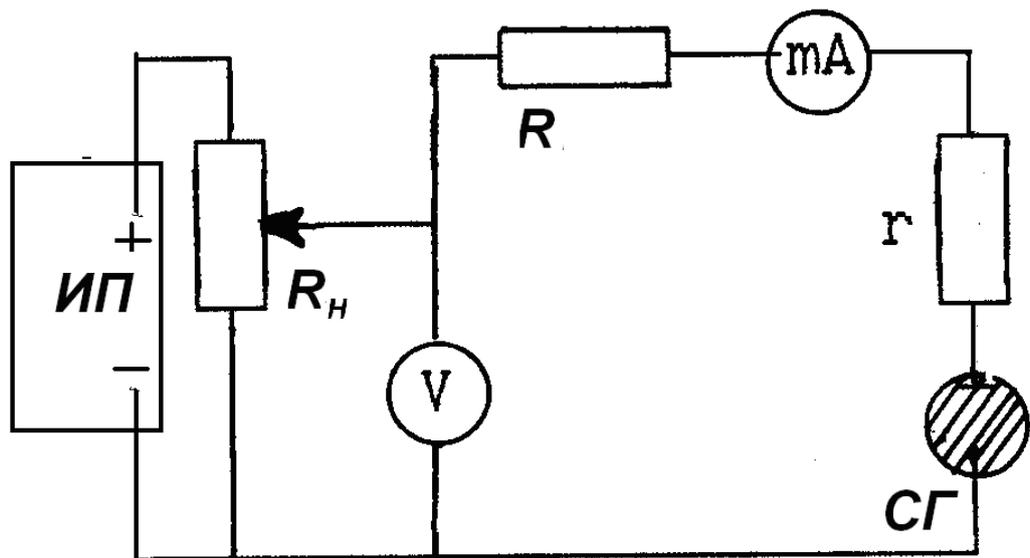


Рис.2. Схема установки для снятия вольтамперной характеристики стабилитрона.

4. Из полученного графика, по углу наклона статической вольтамперной характеристики находим внутреннее сопротивление r_i газоразрядной лампы (

$$r_{\text{внут}} = \frac{\Delta U}{\Delta I});$$

5. Получить динамическую вольтамперную характеристику газоразрядной лампы при 3-х различных внешних нагрузках R . Нагрузку R изменяют с помощью потенциометра на схеме.

6. По точке пересечения I от U в точке $I = 0$ найти ϵ .

Упражнение 2.

Изучение работы релаксационного генератора.

Для получения релаксационных колебаний в цепи с газоразрядной лампой собирают схему изображенную на рис. 3.

Кроме стабилитрона в схему включен и конденсатор с емкостью C , примерно 5000 пФ.

В электрической цепи, содержащей конденсатор и сопротивление (без самоиндукции), разряд конденсатора через сопротивление представляет собой аperiodический процесс. Однако разряду можно придать и периодический характер, возобновляя заряд конденсатора через постоянные промежутки времени. Колебания в этом случае являются совокупностью двух аperiodических процессов - процесса зарядки конденсатора и процесса его разрядки. Такие колебания называются релаксационными. Роль "ключа", обеспечивающего попеременную зарядку и разрядку конденсатора, в этом случае играет газоразрядный диод.

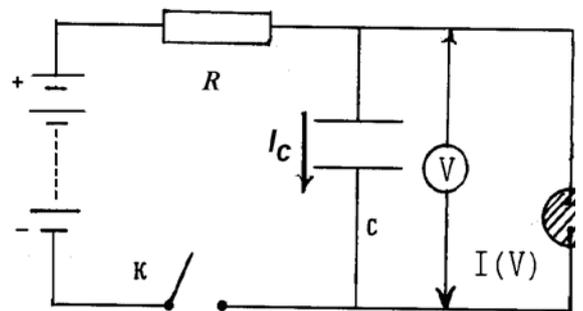


Рис.3.

Рассмотрим схему установки, изображенную на рис.3. Пусть напряжение на источнике ε больше напряжения зажигания U_1 . В обозначениях принятых на схеме, уравнение тока в цепи имеет вид

$$I_c + I(U) = (\varepsilon - U)/R \quad \text{или} \quad C \frac{dU}{dt} + I(U) = \frac{\varepsilon - U}{R}. \quad (1)$$

В условиях, когда $U = const$, т.е. $\frac{dU}{dt} = 0$, из (1) получим уравнение для нагрузочной прямой

$$I_{cn} = (\varepsilon - U)/R. \quad (2)$$

Выражение (2) - графически представлен на рис. 4. При разных R , графики имеют вид прямых, пересекающихся в точке $J = 0, U = E$. Стационарный режим схемы определяется путем совместного решения уравнения (2) и уравнения $I = I(U)$, определяющую вольтамперную характеристику лампы. На рис. 4 решение дается точкой пересечения вольтамперных характеристик лампы и "нагрузочной" прямой. Кроме того, из рис.4 следует, что такая точка имеется только при малых R .

Случай, когда $R = R_k = (\varepsilon - V_2)/I_2$ является критическим.

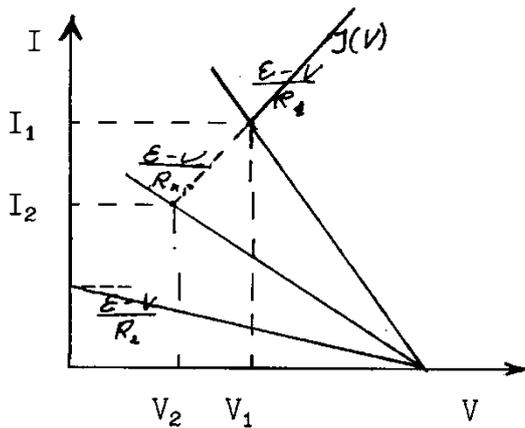


Рис. 4. Определение стационарного режима.

Пусть в начале опыта ключ K разомкнут и $U = 0$. Замкнем ключ K . Конденсатор C начинает заряжаться через сопротивление R , напряжение U увеличивается. Как только оно достигнет "напряжения зажигания" U_1 , лампа открывается – лампа начинает проводить ток, причем прохождение тока через лампу сопровождается разрядкой конденсатора, а значит источник тока (батарея), будучи включенный через сопротивление R , не может поддерживать необходимую для горения лампы величину тока.

Во время горения лампы конденсатор разряжается и напряжение на нем падает. Когда оно достигает "напряжения гашения" U_2 лампа

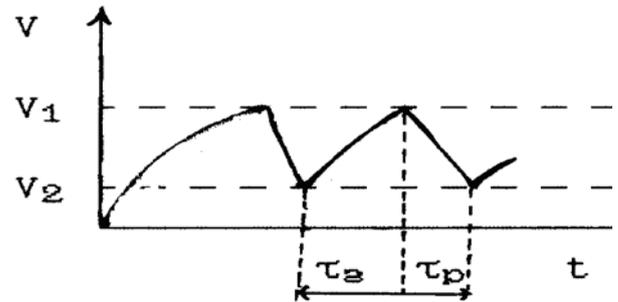


Рис.5. Осциллограмма релаксационных колебаний.

запирается, т.е. лампа перестает проводить ток, и конденсатор вновь начинает заряжаться. Форма кривой напряжения на конденсаторе изображена на рис.5. Амплитуда колебаний равна $U_1 - U_2$. Условие самовозбуждения при этом имеет вид

$$R > R_k = (\varepsilon - V_2) / I_2. \quad (3)$$

Вычислим период релаксационных колебаний. Полное время колебаний τ состоит из суммы времени зарядки τ_3 и времени разрядки - τ_p . Обычно сопротивление нагрузки R выбирают существенно большим, чем внутреннее сопротивление лампы. В этом случае, период $T = \tau_3$. Во время зарядки конденсатора лампа не горит, т.е. $I(U) = 0$ и уравнение (1) приобретает вид

$$R \cdot C \frac{dV}{dt} = \varepsilon - V. \quad (4)$$

Будем отсчитывать время с момента затухания лампы, так что при $U = U_2$, имеем

$$V = \varepsilon - (\varepsilon - V_2) \cdot \exp(-t/RC). \quad (5)$$

В момент зажигания $t = \tau$, $U = U_1$. Поэтому имеем

$$V_1 = \varepsilon - (\varepsilon - V_2) \exp(\tau_3/RC). \quad (6)$$

Из (5) и (6) нетрудно найти

$$T = \tau_3 = RC \cdot \ln(\varepsilon - V_2)/(\varepsilon - V_1). \quad (7)$$

Развитая выше теория является приближенной. Следует иметь в виду, что мы полностью пренебрегали паразитными емкостями и паразитными самоиндукциями схемы. Изложенная теория справедлива в тех случаях, когда в схеме установлена достаточно большая емкость C и когда период колебаний существенно больше времен развития разряда и деионизации (практически 10^{-5} с.).

Порядок выполнения упражнения:

1. Собрать электрическую схему, приведенную на рис. 6.
2. Включить развертку осциллографа и изменяя величину нагрузочного сопротивления R , найти режим, в котором возникают релаксационные колебания. Определить $R_{кр}$ и сравнить полученное значение $R_{кр}$ с величиной, рассчитанной по формуле (3).

3. Изменяя значение R_0 убедиться в том, что условие самовозбуждения в широких пределах не зависит от величины сопротивления.

Зарисовать на кальку картину колебаний, возникающих на осциллографе. Сопротивление измеряется с помощью омметра.

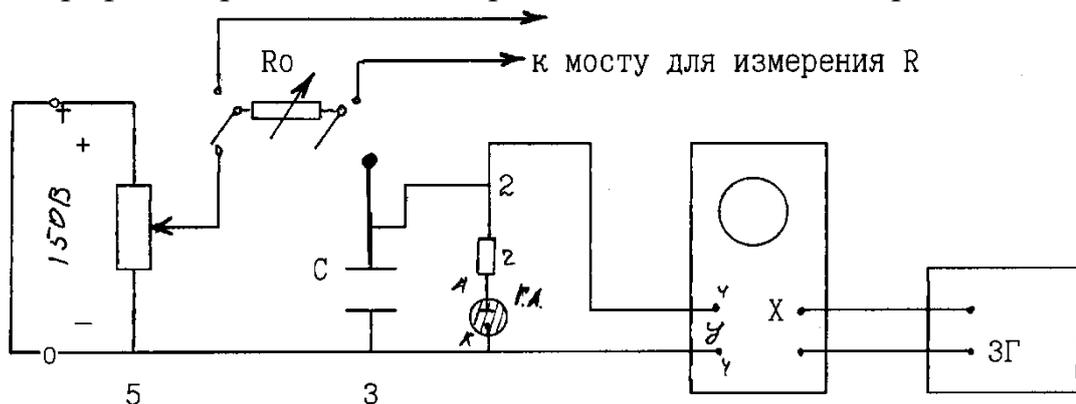


Рис. 6. Схема для наблюдения релаксационных колебаний и определения их частот.

Для определения частоты (периода) колебаний необходимо включить генератор развертки осциллографа и подать на горизонтальный усилитель напряжение с звукового генератора. При этом на экране получается фигура

Лиссажу, соответствующая отношению частот 1:1 (в отличие от гармонических колебаний, при релаксационных колебаниях фигура Лиссажу не имеет, формы правильного эллипса).

Сравните измеренное значение периода релаксационных колебаний с величиной периода, рассчитанной по формуле (7) и пользуясь значением ε , найденным в упражнении 1.

Оцените погрешность, возникшую от пренебрежения временем разрядки τ_p .

Измерения проделать для различных сопротивлений R_o .

По осциллограмме оценить значения τ_p и τ_3 (см. рис.5) при различных значениях R_o .

Литература

1. Калашников С.Г. Электричество. - М., 1977г., 216, 74, с. 166, 169, 170, 74.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. - М., 1977г. Т.3, гл. VIII. §§. 109, 111, 134. § 134. С. 476 – 498, 600.
3. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. М.:2007. Т.2. §§ 182 – 184. С. 222 - 235.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. - М., 1978. Т.2, С. 80- 83.
5. Настоящее учебное пособие, часть 1. § 12. С.97.

Задача 5.

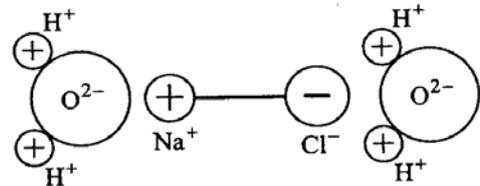
ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА В ПРОВОДНИКАХ ВТОРОГО РОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: проверка выполняемости закона Ома в проводниках второго рода. Определение заряда электрона по данным для числа Фарадея.

Принадлежности: источник постоянного тока, амперметр, вольтметр, медные электроды, соль CuSO_4 , дистиллированная вода, весы с разновесками, электролизер.

Процесс распада молекулы на отдельные ионы называется *электролитической диссоциацией*. Этот процесс можно представить следующим образом. Около каждого иона, из которых состоит молекула растворенного вещества, ориентируются полярные молекулы растворителя. К положительному иону молекулы растворенного вещества притягиваются отрицательные полюсы молекул растворителя, при этом они будут отталкивать другой ион этой молекулы. Процесс облепления иона молекулами растворителя называется

сольватацией (для воды - гидратация), как это показано на рисунке справа.



Согласно закону Кулона сила взаимодействия между ионами молекулы ослабляется в ϵ раз, (где, ϵ - диэлектрическая проницаемость растворителя). При этом энергия теплового движения в растворе оказывается достаточной для того, чтобы отделить ионов молекулы друг от друга. После распада молекулы ионы остаются в сольватных оболочках и продолжают участвовать в теплом движении в среде.

Вещества, молекулы которых в растворе или в расплаве распадаются на ионы, называются проводниками второго рода. К проводникам второго рода (электролитам) относятся водные растворы солей, кислот и оснований, а также расплавленные соли. Электрический ток в электролитах обусловлен движением ионов под действием внешнего электрического поля. Поэтому проводимость электролитов, в отличие от электронной проводимости металлов, принято называть *ионной*.

Прохождение постоянного электрического тока через электролиты сопровождается выделением составных частей этих веществ на электродах. Это явление называется *электролизом*.

Если внести в электролит два электрода (металлических или угольных), соединенных с полюсами источника постоянного тока, то под действием электрических сил ионы в растворе придут в направленное движение. К аноду будут двигаться отрицательные ионы - *анионы*, а к катоду -

положительные ионы - **катионы**. Достигнув электродов, ионы разряжаются: анионы отдают аноду избыточные электроны, напротив, катионы восстанавливаются на катоде. Поскольку заряд одного иона равен $q \cdot z$, где q - заряд электрона, z - валентность иона, т.е. число электронов, отданных или приобретенных при диссоциации каждым атомом, то заряд, отдаваемый ионами электроду, будет равен

$$Q = n z q. \quad (1)$$

Здесь n - число ионов.

С другой стороны, масса вещества, выделяющегося на электроде при электролизе, равна

$$M = n m, \quad (2)$$

где m - масса одного иона.

Из формул (1) и (2) находим M равной

$$M = \frac{m}{z q} Q. \quad (3)$$

Если учесть, что в одной грамм - молекуле (A) любого вещества (т.е. в массе вещества выраженной в граммах, равной его молекулярному весу), содержится одинаковое число атомов

$$N_0 = 6.023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \text{ (число Авогадро), то масса иона} \\ m = A / N_0. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в (3), получим для M

$$M = \frac{A}{N_0 z q} Q = k Q, \quad (5)$$

$$k = A / (N_0 z q), \quad (6)$$

где k - постоянная для каждого вещества, называемая электрохимическим эквивалентом.

Из выражения (5), носящего название **первый закон Фарадея**, следует, что масса M , выделяющаяся на электроде вещества при электролизе, пропорциональна заряду Q , прошедшему через электролит. Учитывая, что величина заряда Q равна произведению силы тока I на время его прохождения ($Q = I \cdot t$), для M можно записать:

$$M = \frac{A}{N_0 e z} \cdot I \cdot t = \frac{A}{z F} \cdot I \cdot t. \quad (7)$$

Здесь A/z - химический эквивалент, $F = q \cdot N_0$ - число Фарадея. Выражение (7) носит название **второй закон Фарадея** для электролиза.

Для того, чтобы на электроде выделилось количество вещества, равного химическому эквиваленту $M = A/z$, через электролит надо пропустить заряд $Q = F$. Следовательно, число Фарадея F численно равно величине заряда Q , при прохождении которого через электролит выделяется один грамм - эквивалент вещества - A/z , т.е.

$$F = \frac{A}{zk} = qN_0. \quad (8)$$

Так как заряд эквивалентного иона численно равен заряду электрона, то для вычисления заряда электрона может быть использована формула

$$q = \frac{A}{zkN_0} = \frac{F}{N_0}. \quad (9)$$

Упражнение 1.

Проверка закона Ома в проводниках второго рода.

Электролиты, подобно другим проводникам, оказывают некоторое сопротивление прохождению через них электрического тока. Сопротивление электролита прямо пропорционально межэлектродному расстоянию L и обратно пропорционально поперечному сечению его S :

$$R = \rho \frac{L}{S}. \quad (10)$$

Коэффициент пропорциональности ρ , называемое его удельным сопротивлением зависит от природы раствора (проводника), концентрации и температуры. Сопротивление электролитов, как и проводников первого рода, при обычных условиях не зависит от приложенного извне напряжения (это правило нарушается при больших напряжениях - *эффект Вина* или в переменных токах высокой частоты - эффект Дебая - Фолькенгагена) и для них справедлив закон Ома

$$I = \Lambda U, \quad (11)$$

где коэффициент пропорциональности Λ - величина, обратная сопротивлению проводника $\Lambda = 1/R$ и измеряется в обратных омах (Ом^{-1}). Из уравнений (10) и (11) для падения напряжения в электролите получаем:

$$U = \frac{I L}{\sigma S}, \quad (12)$$

где $\sigma = 1/\rho$ удельная электропроводность или электропроводность кубика вещества с длиной ребра в 1 см.; размерность ее $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. Далее, если иметь в виду плотность тока, т.е. ток, отнесенный к единице поперечного сечения проводника $j = I/S$, то падение напряжения в электролите будет равно

$$U = jL / \sigma. \quad (13)$$

Таким образом, падение напряжения в электролите пропорционально плотности тока j , расстоянию между электродами L и обратно пропорционально удельной электропроводности σ . Величина σ определяется природой, концентрацией раствора и его температурой.

Чаще всего закон Ома в форме выражения (13) применяют для подсчета падения напряжения в электролите при известной удельной электропроводности и заданной плотности тока. При очень малых плотностях тока (13) может быть использовано также и для приближенного определения электропроводности (без учета сопротивления границы раздела

электрод - электролит, где из - за электродной поляризации закон Ома не выполняется).

Выполнения работы

1. Собрать схему, приведенную на рис.1: где 1 - источник постоянного тока (ИП), 2 - электролизер (Э), представляющий собой стеклянный сосуд с медными электродами (катод - К,

анод - А в виде пластинок с одинаковыми площадями S),

3 - амперметр на 5 А,

4 - вольтметр постоянного тока

10 В, 5 - реостат.

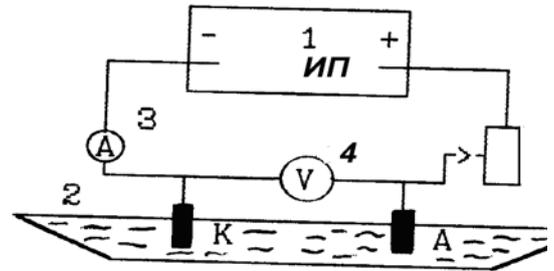


Рис.1.

В электролизер заливают 0.1 М CuSO_4 - децинормальный раствор сернокислой меди. 0.1М раствор CuSO^+ готовят растворением 16 г. медного купороса в 1 литре дистиллированной воды.

а. Определение удельного сопротивления электролита.

В начале электроды параллельно закрепляют неподвижно на некотором расстоянии друг от друга (например, на расстоянии L равного примерно на 5 см. За время опыта это расстояние не меняют). Постепенно, изменяя ток между электродами, снимают вольтамперную характеристику (ВАХ), т.е. измеряют падение напряжения при изменении тока I . Полученные результаты изображают графически в виде зависимости U от I (при $L = \text{const}$). Затем по тангенсу угла наклона графика определяют ориентировочно значение σ . При этом необходимо учесть, что $\text{tg}\alpha = \Delta U / \Delta j = L / \sigma$.

После этого электроды устанавливаются таким образом, чтобы расстояние между ними было 2 см., затем включают ток и спустя несколько минут записывают показания вольтметра. Далее увеличивают расстояние между электродами последовательно через каждый 1- 2 см до 15 - 17 см, поддерживая с помощью реостата, **величину тока постоянной** и записывают показания вольтметра. Как и в предыдущем опыте, строят график зависимости U от L , но уже при $I = \text{const}$. Тангенс угла наклона вычерченной кривой приближенно равен $\text{tg}\alpha = I / (S\sigma)$. При известной плотности тока ($j = I/S$) это позволяет определить электропроводность раствора. Обязательно определите площадь только погруженной части электрода.

Упражнение 2.

Изучение концентрационной зависимости электропроводности проводников второго рода

Это упражнение позволяет обнаружить зависимость удельной электропроводности раствора при изменении его концентрации.

Электрический ток в электролитах имеет много сходных черт с током в металлах. В электролитах, как уже отмечали выше свободные носители в виде анионов и катионов образуются в результате электролитической диссоциации. Образующиеся носители зарядов участвуют в электропроводности раствора. Полная плотность тока, обусловленная дрейфом катионов и анионов равна

$$j = j_+ + j_- = n_+ q v_+ + n_- q v_- = n \alpha q (v_+ + v_-), \quad (14)$$

где α - коэффициент диссоциации, n - число молекул в единице объема, v_+ , v_- - дрейфовая скорость катионов и анионов, соответственно. Дрейфовая скорость ионов связана с электрическим полем через их подвижность

$$b_+ = \frac{g_+}{E} \quad \text{и} \quad b_- = \frac{g_-}{E}. \quad \text{Отсюда для плотности тока } j \text{ имеем: } j = nq\alpha(b_+ + b_-)E,$$

или для удельной электропроводности:

$$\sigma = n e \alpha (b_+ + b_-), \quad (15)$$

из которого следует, что удельная электропроводность σ должна измениться линейно с изменением концентрации ионов n в растворе. Для проверки зависимости σ от концентрации ионов в растворах используются данные для падения напряжения в растворах с известными концентрациями. Для этого, при $L = \text{const}$, нужно измерить падение напряжения от плотности тока, построить график зависимости j от U и по углу наклона определить находят σ .

Для определения σ раствора другой концентрации, не меняя расстояние между электродами ($L = \text{const}$) изменяют концентрацию раствора в электролизере и повторяют измерения j от U . Процедуру изменения концентрации нужно повторить не менее три раза. По результатам 3 и более измерений строят график зависимости σ от концентрации раствора.

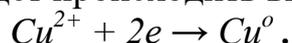
Концентрация раствора электролита во всех случаях заранее должна быть известной.

Упражнение 3.

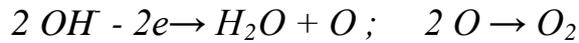
Определение числа Фарадея и заряда электрона.

При пропускании постоянного электрического тока через электролит происходит электролиз, т.е. выделение веществ на электродах. К аноду будут двигаться анионы, к катоду - катионы. Достигнув электродов, они разряжаются; анионы отдают аноду избыточные электроны, катионы восстанавливаются на катоде. Например, молекулы медного купороса CuSO_4 диссоциируют при растворении на положительные ионы Cu^{2+} и отрицательные ионы SO_4^{2-} . Кроме ионов Cu^{2+} и SO_4^{2-} раствор содержит также водородные H^+ и гидроксидные OH ионы воды.

Ионы меди разряжаются легче, чем ионы водорода H^+ , поэтому при прохождении тока на катоде будет происходить выделение меди



Ионы SO_4^{2-} разряжаются труднее, чем ионы OH . Поэтому при прохождении тока у анода разряжаются ионы гидроксида и выделяется кислород



Ионы SO_4^{2-} с ионами H^+ образуют у анода раствор серной кислоты: $SO_4^{2-} + 2H^+ \rightarrow H_2SO_4$.

Иначе протекает процесс, если анод изготовлен из меди. В этом случае разряд ионов происходит только у катода, у анода же наоборот, ионы металла (меди) переходят в раствор.

Следовательно, электролиз $CuSO_4$ при медном аноде сводится к переносу меди с анода на катод; в то же время количество медного купороса в растворе остается неизменным.

Выполнение упражнения

Упражнение выполняется в следующем порядке:

1. Используется собранная установка, что на рис.1.
2. Приготовить 0.1М раствор $CuSO_4$ на дистиллированной воде и заполнить им электролизер.
3. Приготовить (зачистить, промыть, просушить) медные электроды. Взвесить массу катода и записать (M_1).
4. Электроды при помощи электродных держателей устанавливаются так, чтобы они находились в середине сосуда с электролитом. Строго следить за полярностью потенциала на электродах.
5. С помощью реостата устанавливается ток через электролит в 0.05А.
6. Одновременно с включением тока включается секундомер и в течение времени измерения ток поддерживается постоянным.
7. После выключения тока (через 30 - 40 минут) электрод (катод) вынимают из сосуда, вторично просушивают и взвешивают его массу (M_2). Разность $M_2 - M_1 = \Delta M$ дает приращение массы катода.
8. По значению ΔM (формула (7)) вычисляют величину числа Фарадея. В соединении $CuSO_4$ медь двухвалентна ($z = 2$). Масса грамм - атома меди $A = 63.54$ г.
9. Заряд электрона вычисляется по формуле (9) в системе СИ.

Литература

1. Калашников С.Г.. Электричество.- М., 1977г. Гл.XV111. §§ 189-192, 194. С. 435-443
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики, т.3. - М., 1977. Гл. V1. §§ 92 – 96. С.413 -436.
3. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. –М.: 2007. Т.2. Гл.XV11. §§ 174 – 180. С. 204 – 222.
4. Лабораторный практикум по неорганической химии (под ред. Соколовской Е.М.-М.; изд-во МГУ,1981).
5. Настоящее учебное пособие, часть 1. §11. С.89-97.

Задача 6.
ИЗУЧЕНИЕ КОНТАКТНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ.
ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОНТАКТНОГО
ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Цель работы: изучение принципа действия контактного выпрямителя, снятие вольтамперной характеристики и коэффициента полезного действия контактного выпрямителя.

Принадлежности: селеновый выпрямитель, реостаты, вольтметры, амперметры, источник постоянного и переменного тока, двухполюсный переключатель, миллиамперметр, ваттметр осциллограф.

В зависимости от практических целей часто приходится использовать не переменный ток, а постоянный или выпрямленный ток. *Перевод переменного тока в постоянный ток называют выпрямлением.* Для этих целей используют выпрямители – устройства, обладающие односторонней проводимостью. В качестве выпрямителей наиболее часто на практике используют вакуумный диод, полупроводниковый *p-n* переход или контакт металла с полупроводником известный как контактный выпрямитель. Контактный выпрямитель состоит из двух электродов металлического и полупроводникового. Для определенно выбранных материалов, сопротивление на месте их контактов (контактное сопротивление) зависит от величины и направления приложенного к нему напряжения. Рассмотрим механизм этой зависимости.

Известно, что при соприкосновении двух тел, обладающих *разными работами выхода χ* , происходит перетекание электронов из одного тела в другое так, что электроны тела с меньшей работой выхода перетекают в тело с большей работой выхода. Таким образом, на границе раздела металл/полупроводник тело с меньшей работой выхода заряжается положительно, а тело с большей работой выхода – отрицательно и на границе между двумя телами возникает *двойной электрический слой (ДЭС)*. Скачок потенциала в ДЭС равен разности работ выхода контактирующих тел $\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$ и его называют *контактной разностью потенциала (КРП)*. В двойном электрическом слое, поле на контакте направлено от тела с меньшей работой выхода к телу с большей работой выхода. При этом заряды располагаются не строго на поверхности (как это принято считать в электростатике), а распределены в пограничных слоях некоторой толщины. В металлах (из-за большой плотности электронов в них) этот заряд сосредотачивается почти на поверхности (в пределах одного - двух атомных слоев, рис 1 а) и б)), в полупроводниках же (вследствие их малой проводимости) электрическое поле простирается на значительно большую глубину. Эффективная толщина слоя проникновения поля в полупроводник

(толщина объемного заряда) при этом может на несколько порядков превышать толщины проникновения поля в металл, рис.1 в).

Если металл находится в контакте с **электронным** полупроводником (*n*-тип), работа выхода электронов которого меньше, чем работа выхода электрона из металла, то в этом случае при образовании электрического контакта (в условиях термодинамического равновесия) *металл заряжается отрицательно*, а в *полупроводнике* в результате уменьшения концентрации электронов, вблизи границы образуется равный по величине *положительный заряд*. Поскольку плотность электронов в слое полупроводника на границе с металлом оказывается меньше, чем в его глубине, то и сопротивление приконтактной области будет больше, чем в глубине полупроводника, для перехода электронов через контакт образуется некоторый **потенциальный барьер**, рис.2.

Такое на границе металла с **дырочным** полупроводником (*p*-тип) может существовать, если соотношение между работами выхода металла и полупроводника будет обратным, т.е. работа выхода электрона из полупроводника будет больше, чем из металла, (см. рис. 2).

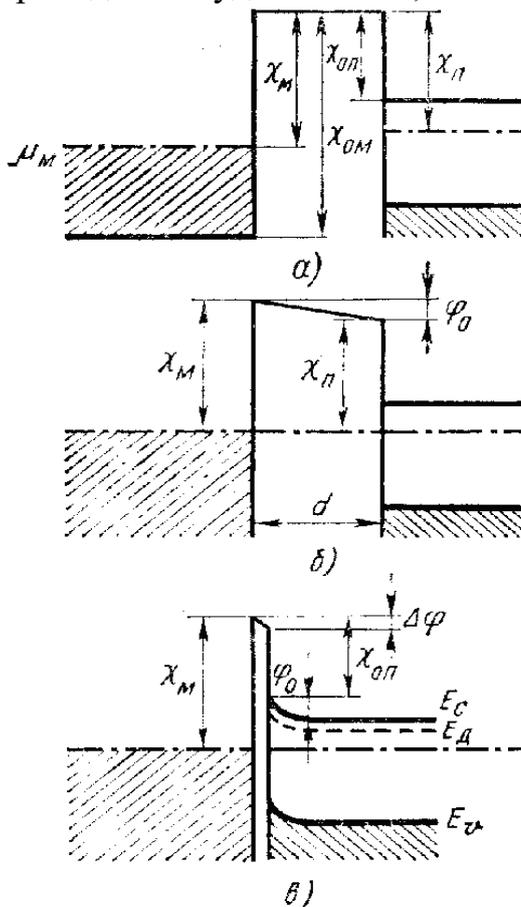


Рис.1. а) и б) возникновение КРП. в) возникновение запирающего слоя.

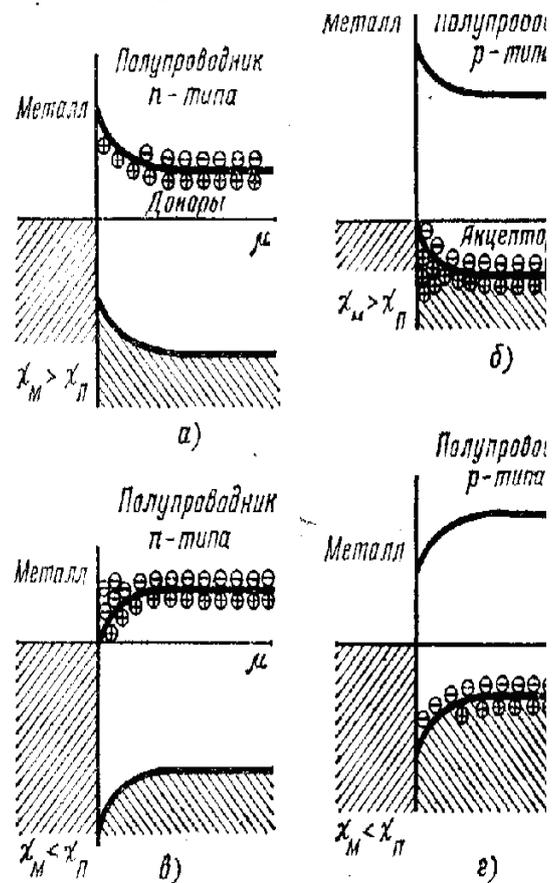


Рис.2. Образование запирающего и антизапирающего слоев на контакте металл/полупроводник.

Если же работа выхода из электронного полупроводника будет больше, чем из контактирующего с ним металла, то потенциальный барьер, а вместе с ним и слой с повышенным сопротивлением не образуется. Вследствие этого, теперь полупроводник заряжается отрицательно и в пограничном слое создается избыточная концентрация электронов, возникает слой с пониженным сопротивлением, толщиной $10^{-5} - 10^{-6}$ см. Это практически не оказывает влияние на перехода электронов через контакт металл/полупроводник.

Теперь рассмотрим, как влияет внешнее электрическое поле, приложенное к контакту металл\полупроводник. Пусть поле приложено так, чтобы его направление было *противоположное* контактной разности потенциалов. При этом результирующее поле в приконтактной области ослабевает, и объемный положительный заряд в пограничном слое полупроводника уменьшится. Это приведет к уменьшению толщины, а следовательно, и к уменьшению контактного сопротивления. При достижении напряжения, равного по величине (но противоположного по знаку) контактной разности потенциалов, объемный заряд на поверхности полупроводника, а вместе с ним слой повышенного сопротивления исчезнут, и сопротивление слоя будет равно омическому сопротивлению полупроводника. В результате, дальнейшее увеличение тока будет происходить по линейному закону. Это направление поля соответствует *пропускному* или *прямому* направлению.

При приложении внешнего поля, направление которого совпадает с направлением контактной разности потенциалов, область положительного объемного заряда полупроводника, т.е. область пониженной концентрации электронов, расширяется. Это приводит к увеличению контактного сопротивления.

Таким образом, изменение концентрации электронов в приконтактной области полупроводника в зависимости от величины и направления приложенного напряжения позволяет качественно объяснить одностороннюю (выпрямительные свойства) проводимости контакта металла с полупроводником.

Для электронных полупроводников прямое направление соответствует движению электронов от полупроводника к металлу, для дырочных же прямое направление соответствует движению электронов от металла в полупроводник, рис.1.

Теоретические вычисления зависимости тока от напряжения при этом приводят к формуле вида:

$$I = I_0 \left(e^{\alpha U_c} - 1 \right), \quad (1)$$

где I_0 , α - константы, зависящие от свойств полупроводника и контактной разности потенциалов (разности работ выхода) между металлом и полупроводником, U_c . Согласно формуле (1) в прямом направлении ($U_c > 0$)

ток растет экспоненциально; при достаточно большом напряжении величина $e^{\alpha U} > 1$, $U \approx U_c$ и формула может быть записана в виде $I = I_0 e^{\alpha U}$ или

$$\ln I = \ln I_0 + \alpha U. \quad (2)$$

Зависимость в виде формулы (2) удобна для сравнения теоретических характеристик с экспериментальными результатами. При этом, экспериментальный график в системе координат $\ln I$ от U должна дать линию с углом $\operatorname{tg} \alpha = \Delta \ln I / \Delta U$.

Упражнение 1.

Изучение контактного выпрямителя. Вольтамперная характеристики селенового выпрямителя

В данной работе принцип работы контактного выпрямителя рассматривается на основе селенового выпрямителя. Он состоит из двух различных металлических электродов и тонкого слоя кристаллического селена, заключенного между ними (рис.3).

- 1 – поддерживающая железная шайба;
- 2 – контактный электрод (слой никеля);
- 3 – слой селена;

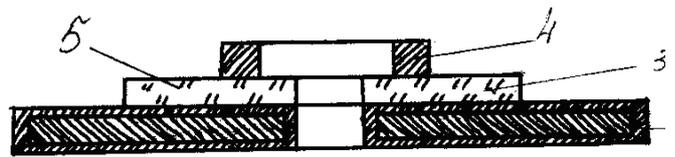


Рис.3. Схематический разрез селенового выпрямителя.

4 – вентильный электрод; 5 – запирающий слой, возникающий на границе вентильного электрода и селена.

Слой селена имеет толщину 0,05 - 0,1 мм. Одним из электродов является никелированная железная шайба, называемая **контактным электродом**. Второй электрод – **вентильный**, представляет собой тонкий слой тройного сплава легкоплавких металлов (Bi–Cd–Sn).

У селеновых выпрямителей прямое направление соответствует движению электронов от вентильного электрода через селен к контактному электроду, т.е. соответствует полярности: плюс на железной шайбе, минус - на слое сплава.

В прямом направлении сопротивление выпрямителя R , измеренное как функция приложенного напряжения, быстро уменьшается, стремясь к постоянной величине. В обратном направлении сопротивление выпрямителя вначале растет, достигает максимума, а затем уменьшается. Типичная зависимость дифференциального сопротивления выпрямителя от приложенного напряжения изображена на рис.4.

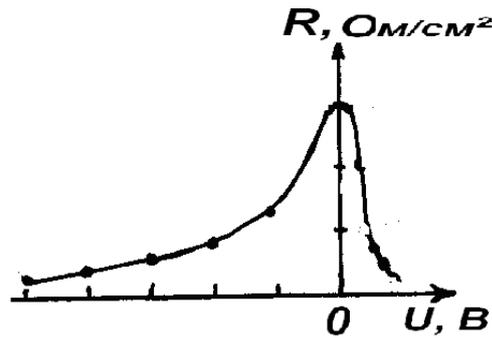


Рис.4.

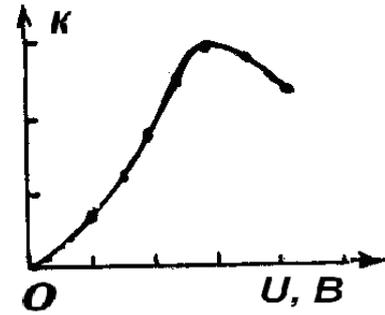


Рис.5.

Качество выпрямителя характеризуется коэффициентом выпрямления k равное отношению прямого тока к току обратному, измеренных при одинаковых по величине прямого и обратного напряжений $k = \left(\frac{I_{\text{прям}}}{I_{\text{обрат}}} \right)_{U=\text{const}}$.

На рис.5 изображена зависимость коэффициента выпрямления k от абсолютной величины напряжения, приложенного к выпрямителю. С увеличением напряжения коэффициент выпрямления быстро растет, достигает максимума, а затем уменьшается. Уменьшение коэффициента выпрямления с дальнейшим ростом напряжения вызывается возрастанием тока в обратном направлении.

Порядок выполнения работы:

1. Собрать схему согласно рис. 6. Здесь источник питания ВС-24 используемый в качестве источника тока, Д-селеневый выпрямитель.

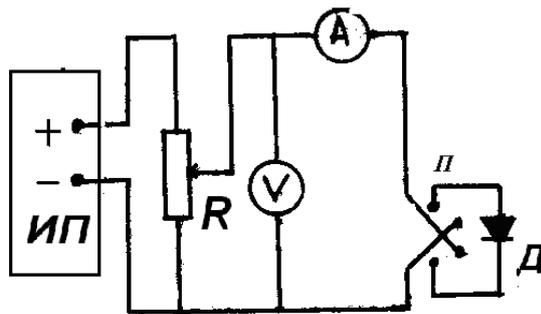


Рис.6.

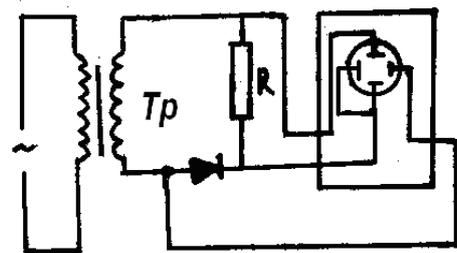


Рис.7.

2. После сборки схемы снимите полную вольтамперную характеристику. Снятие характеристики рекомендуется начинать с максимального тока в обратном направлении (не более 50 мА). Затем, уменьшая постепенно силу тока до нуля, переменить направление тока (переключателем П) и производить дальнейшее снятие характеристики ВАХ в прямом направлении, постепенно увеличивая силу тока до 1.5 – 2.0 А.

Так как сила тока через выпрямитель зависит от напряжения на нем по экспоненциальному закону, то удобнее при снятии характеристики задавать

определенные значения силы тока, величины получающих напряжений отсчитывать по вольтметру.

3. Постройте вольтамперные характеристики в линейных и полулогарифмических координатах. В случае линейных координат по осям откладываются I в мА и напряжение U в В, причем характеристики прямого и обратного направлений наносят на одну координатную сетку, считая прямой ток и напряжение положительными, обратный ток и обратное напряжение отрицательными. В случае логарифмических координат по оси ординат откладываются логарифмы абсолютных значений обратного и прямого токов, а по оси абсцисс - абсолютная величина напряжения в вольтах ($\ln I$ от U).

4. По полулогарифмической кривой для характеристики прямого направления найдите параметры уравнения (2): α и I_0 .

5. Постройте график зависимости сопротивления $R=U/I$ выпрямителя в прямом и обратном направлениях от напряжения в координатах ($\lg R$ от U).

6. Постройте график зависимости коэффициента выпрямления k от напряжения (до максимально возможного значения прямого напряжения) в координатах ($\lg k$, U).

Упражнение 2.

Получение характеристики выпрямителя с помощью осциллографа.

1. Соберите схему согласно рис.7, где T_p - понижающий трансформатор, R - реостат на 200 Ом, - исследуемый контактный выпрямитель, O - осциллограф; с работой которого следует ознакомиться по инструкции. Перед включением в сеть указатель движка ЛАТРА следует поставить в начальное положение. Напряжение на сопротивлении R , пропорциональное току, текущему через выпрямитель, подводится к клеммам вертикального отклонения осциллографа. Напряжение с выпрямителя подается на пластины горизонтального отклонения осциллографа. Поэтому луч при своем движении по экрану чертит характеристику выпрямителя в системе координат: по вертикали ток, по горизонтали напряжение.

2. Включите осциллограф и источник переменного тока или лабораторный трансформатор (ЛАТР) получите на экране осциллографа соответствующую характеристику. Меняя чувствительность осциллографа и величину напряжения на выпрямителе, подберите наиболее удобную для наблюдения картину. Зарисуйте полученную картину на кальку. Если характеристика на экране осциллографа оказывается неудобно повернутой, то переключением проводов у осциллографа и у выпрямителя нужно добиться обычной ориентации осей координат для характеристики.

Упражнение 3.

Измерение коэффициента полезного действия контактного выпрямителя.

1. Соберите схему однополупериодного выпрямления согласно рис.8.

W-ваттметр (включается по схеме, изображенной на рис.8. В-вольтметр и А-амперметр R-нагрузочное сопротивление (реостат на 200 Ом.

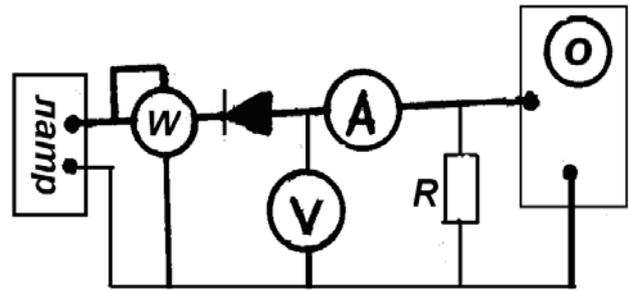


Рис.8. Схема для измерения КПД выпрямителя.

2. Включите осциллограф и с помощью ВУП-24 или ЛАТРа медленно увеличивая напряжение, снимите зависимость показаний амперметра I и вольтметра U от мощности переменного тока W . (при измерениях силу тока не увеличивать свыше 0,5 А).

3. Результаты измерений занести в таблицу со столбцами (Вт), I , mA, U , В, W , Вт, η , %; где W_{\sim} мощность на переменном токе, измеренная ваттметром, W_{-} мощность по постоянному току, равная $W_{-}=I \cdot U$, а η - коэффициент полезного действия, равный $\eta=W_{-}/W_{\sim}$.

4. Зарисуйте на кальку вид осциллограмм для выпрямленных токов в 0,2 и 0,5А.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М., 1979. т.3, Гл. 8. §§55, 57, 59, гл. 9., §§ 60 - 64.
2. Калашников С.Г. Электричество.- М.,1986. Гл. 19, §§151-153, 198, 203-205.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики.- М.,1977, Гл.7,8, §§104, 108, 100
4. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. – М.: 2007. Т.2. Гл.XV1. §§ 168 - 171 С. 174 – 193.
5. Настоящее учебное пособие, часть 1. §9. С.74, §10. С.81.

Задача 7. ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: получение и изучение петли гистерезиса сегнетоматериала, изучение температурной зависимости его диэлектрической проницаемости. Определение точки Кюри.

Принадлежности: сегнетоэлектрик (BaTiO_3), осциллограф, нагревательный элемент, ЛАТР или другой источник тока, повышающий трансформатор, эталонная емкость, магазин сопротивлений, термopара, измеритель емкости, микровольтметр или прибор для измерения термоэдс.

Среди диэлектрических материалов существуют вещества диэлектрическая проницаемость, которых при определенных условиях может достичь нескольких тысяч единиц. Их диэлектрическая проницаемость является функцией напряженности внешнего электрического поля и температуры. Первоначально такое свойство было обнаружено у кристаллов сегнетовой соли, и поэтому все диэлектрики такого рода получили название сегнетоэлектрики.

Сегнетоэлектрики, например, титанат бария BaTiO_3 имеют большое практическое применение, в связи с их широким применением, в частности, для изготовления конденсаторов с нелинейными свойствами.

Одной из важных свойств сегнетоматериалов состоит в том, что значение электрического смещения в них определяется не только величиной и знаком напряженности поля, но зависит еще от предшествующих состояний поляризации, но и от температуры. В некотором температурном интервале диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков весьма велика и достигает порядка 10^4 единиц. При температурах, превышающих определенное его значение сегнетоэлектрические свойства материала исчезают и сегнетоэлектрик превращается в обычный полярный диэлектрик. Эта температура называется температурой Кюри или точкой Кюри, T_K .

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для сегнетовой соли показана на рис.1

Для различных сегнетоматериалов T_K различна. Причиной возникновения сегнетоэлектрических свойств является самопроизвольная поляризация сегнетоэлектриков, возникающих в них под действием особенно сильного взаимодействия между частицами.

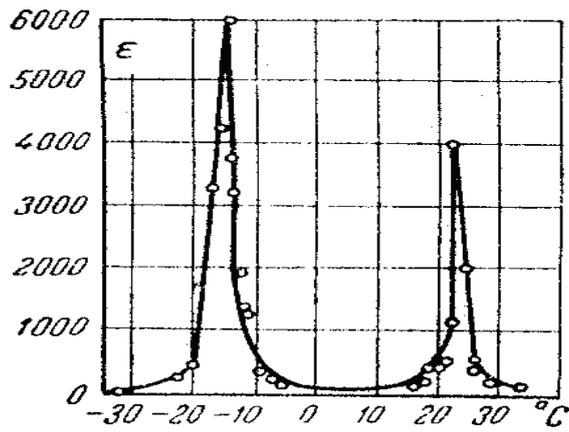


Рис.1.

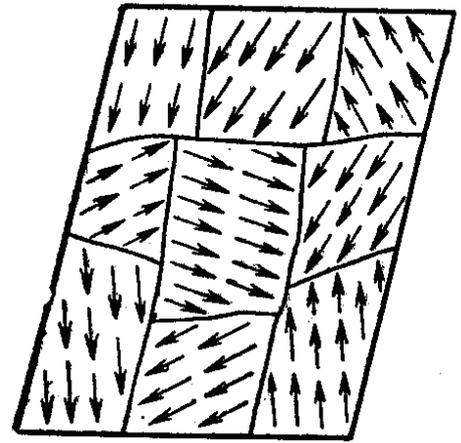


Рис.2.

Под влиянием этого взаимодействия объем сегнетокерамики подразделяется на отдельные области (домены), в пределах которых дипольные моменты молекул ориентированы в определенном направлении, как это показано на рис.2. Когда кристалл сегнетоэлектрика вносится в электрическое поле, происходит переориентация дипольных моментов доменов и он поляризуется. В точке Кюри домены разрушаются, сегнетоэлектрик превращается в полярный диэлектрик.

Схема измерительной установки для изучения сегнетоэлектриков приведена на рис.3

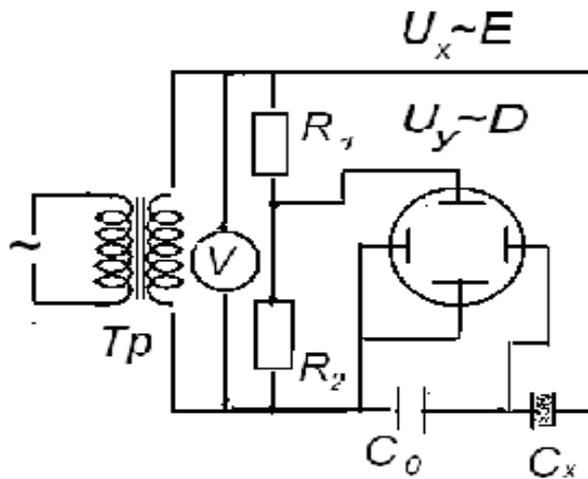


Рис.3.

Упражнение 1.

Изучение гистерезиса сегнетоэлектрика титаната бария с помощью осциллографа.

В качестве изучаемого образца в работе используется титанат бария ($BaTiO_3$) – пластинка диаметром в 10 мм и толщиной 1 мм, которую помещают между обкладками конденсатора C_x , последовательно соединенный с эталонной емкостью C_0 (конденсатор с известной емкостью).

Наличие остаточной поляризации в сегнетоматериалах приводит к тому, что зависимость между векторами поляризации электрической индукции D и напряженности электрического поля E не является однозначной и зависит не только от предыдущего значения E в данный момент времени, но и от его предыдущего значения, которое известно как *гистерезис*. Для его получения (зависимости $D=f(E)$) на экране осциллографа достаточно подать на вертикально отклоняющие пластины напряжение U_y пропорциональное вектору индукции D ($U_y \sim D$), а на горизонтально отклоняющие напряжение – U_x пропорциональное напряженности поля E ($U_x \sim E$).

Как видно из рисунка 3 одно и тоже напряжение U подается на делитель из последовательно соединенных сопротивлений R_1 и R_2 и на последовательно соединенные конденсаторы C_x и C_0 .

Индукция электростатического поля внутри сегнетоэлектрика равна поверхностной плотности σ зарядов на пластинах конденсатора $D = \sigma$, но $\sigma = q/S$, где S – площадь поверхности обкладок конденсатора, q – заряд одной из пластин этого конденсатора, так что $D = q/S$. Поскольку конденсаторы C_x и C_0 соединены последовательно, заряды на пластинах одинаковы. Поэтому напряжение на конденсаторе C_0 равно

$$U_y = U_{c0} = qD/C_0. \quad (1)$$

Таким образом, напряжение на конденсаторе C_0 , подаваемое на вертикально отклоняющие пластины осциллографа, пропорционально вектору электрической индукции D .

Напряжение U_x на горизонтально отклоняющих пластинах пропорционально напряженности E , поскольку в экспериментах обычно емкость конденсатора C_x значительно меньше емкости C_0 , т.е. практически все напряжение U приложено к конденсатору C_x . Это напряжение связано с напряженностью E соотношением $E=U/d$ (d – расстояние между пластинами конденсатора C_0).

На экране осциллографа, таким образом, возникает петля гистерезиса, где $U_y = k_1 D$, $U_x = k_2 E$; $k_1 = S/C_0$, $k_2 = d/(R_1/R_2 + 1)$.

Для выполнения работы вычисляют k_1 и k_2 по известным C_0 , S , d , R_1 и R_2 .

Далее, зная чувствительность осциллографа в вертикальном и горизонтальном направлениях, строят график зависимости $D = f(E)$ для исследуемого сегнетоэлектрика. При этом по оси ординат откладывают значения в Кл/см², по оси абсцисс – значения E в В/см².

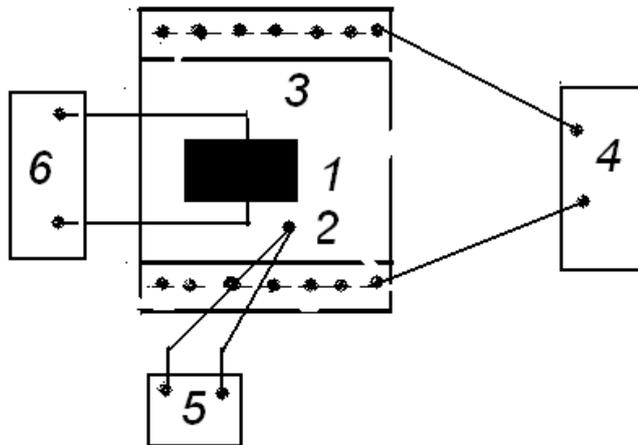
Упражнение 2.

Изучение температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

Изучение зависимости диэлектрической проницаемости от температуры производят на установке, которая изображена на рис.4. Относительную диэлектрическую проницаемость ϵ находим, используя формулу для плоского конденсатора

$$\varepsilon = \frac{C_x d}{\varepsilon_0 S} = \frac{C_x d}{\varepsilon_0 \pi r r^2},$$

где d – толщина, r – радиус таблетки титаната бария. Значение C_x берется по данным упражнения 1 или измеряют с прибором



- 1 – изучаемый образец;
- 2 – термопара;
- 3 – нагреватель,
- 4 – источник питания для нагревателя (латр),
- 5 – гальванометр или Микровольтметр;
- 6 – прибор для измерения емкости.

Рис.4.

Порядок выполнения упражнения:

1. включают нагревательную печь и устанавливают напряжение на выходе источника тока или на латре;
2. контролирует изменения C_x через каждые 1-2 °С либо по прибору для измерения емкости либо через делитель C_x/C_0 ;
3. составляют соответствующую таблицу измерений (форма таблицы приведена ниже).
4. строят график зависимости диэлектрической проницаемости от температуры;
5. по графику находят точку Кюри.

Форма таблицы

№ п\п	U, мВ	°С	C_x , пФ	ε

Литература

1. Калашников С.Г. Электричество.- М.,1986. Гл. V. §§ 50-52. С. 101 –110.
2. Сивухин Д. В. Курс общей физики.- М.,1977. § 39. С. 162.
3. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. – М.: 2007. Т.2. Гл.1. §§ 146 – 147. С. 97.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: 1977. Т. 2.
5. Настоящее учебное пособие, часть 1. §5. С43.

Задача 8. ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА КОНТАКТАХ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: ознакомление с термоэлектрическими явлениями на контактах металлов.

Принадлежности: металлы для составления электрической цепи (селен, висмут), материалы для изготовления термопар, ртутный термометр до 100°C , нагреватель, источник питания, микровольтметр или прибор для измерения термоэдс, амперметр постоянного тока.

Плотность электронного газа (свободных электронов) внутри металлов приблизительно равна $(10^{22} - 10^{23})/\text{см}^{-3}$, а поверхностность металла при этом играет роль стенки сосуда, в котором находятся электроны. Пока электрон находится внутри металла, силы, действующие на него со стороны положительных ионов находящихся в узлах кристаллической решетки, направлены во все стороны и в среднем взаимно уравновешены. Если же электрон оказался за пределами металла, то на него со стороны положительных ионов действуют силы, направленные только внутрь металла. Таким образом, вблизи поверхностного слоя металла образуется электрическое поле. Вектор E в этом слое возрастает до некоторого значения E_0 и затем убывает до нуля на больших расстояниях от тела. Это означает, что в поверхностном слое металла существует потенциальный барьер, (потенциальная энергия электрона на больших расстояниях от металла принята считать равной нулю, а внутри металла - отрицательной величине, равной U_0). Для того чтобы электрон мог преодолеть силы, притягивающие его к ионной решетке металла, т.е. пройти через потенциальный барьер в поверхностном слое и удалиться из металла, необходимо затратить некоторую энергию. Максимальная кинетическая энергия, которую может иметь электрон внутри металла, недостаточна для этого. Поэтому для преодоления потенциального барьера U_0 к электрону необходимо каким-нибудь образом сообщить ему дополнительное количество энергии. Работа, которая должна быть затрачена на освобождение электрона из металла, называется **работой выхода** и является одной из важных характеристик металла. Она связана с электрическим полем в поверхностном слое металла:

$$A = \int_0^{\infty} e \dot{A}_{(x)} dx; \quad \int_0^{\infty} E_{(x)} dx = \frac{A}{e}, \quad (1)$$

где интегрирование вдоль любой траектории должно производиться от какой-нибудь точки, взятой внутри металла, до точек, расположенных достаточно далеко от его поверхности (например, для чистой поверхности вольфрама эта работа равна 4,5 эВ, а у других (чистых) металлов эта работа колеблется в пределах от 1,8 до 5,3 эВ).

Если поверхность одного металла (1) привести в соприкосновение (контакт) с поверхностью другого металла (2), то происходит перетекание

электронов из одного металла в другой, вследствие чего один из них заряжается положительно, другой - отрицательно. Возникающая при этом разность потенциалов между соприкасающимися телами называется **контактной разностью потенциалов**.

Появление контактной разности потенциалов обусловлено двумя причинами:

1) различием в работах выхода (A) электрона из металлов, приведенных в соприкосновение. В этом случае силы, действующие на электроны в пограничной области со стороны ионных каркасов обоих металлов (направленные в противоположные стороны), не уравновешены и поэтому вызывают переход электронов из одного металла в другой;

2) различием в плотностях (n) электронного газа в металлах, вследствие чего возникает диффузный переход электронов из металла, где плотность этого газа большая, в металл, где эта плотность меньше.

Рассмотрим в отдельности действие каждой из этих причин:

1. на электрон, оказавшийся в пограничной области (между ионными решетками обоих металлов), действуют электрические поля E_1 и E_2 , созданные поверхностными слоями каждого из металлов и направленные в противоположные стороны. Сумма

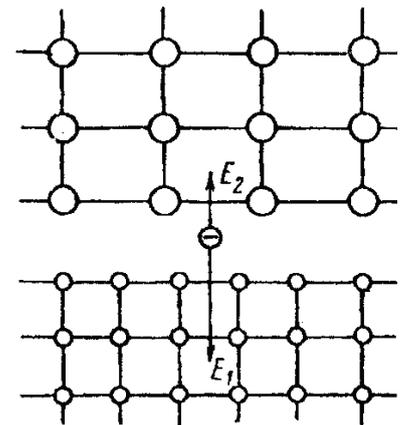


Рис.1.

векторов E_1 и E_2 отлична от нуля, и поэтому на электрон, оказавшийся в этой области, будет действовать некоторая результирующая сила, направленная в сторону одного из металлов. На рис. 1 показаны ионные решетки двух металлов (1 и 2) с различными объемными плотностями ионов. Очевидно, на электроны, оказавшиеся в пограничной области, со стороны металла (1) будут действовать меньшие силы, чем со стороны металла (2), имеющего более плотную ионную решетку; работа выхода электрона из металла 1 (A_1) будет меньше, чем из металла 2 (A_2). Если $n_1 = n_2$, то вследствие теплового движения оба металла будут посылать в пограничный слой одинаковое число электронов N . Из этих $2N$ электронов большая часть втягивается в металл 2. Таким образом, из пограничного слоя металл 1 получает меньше электронов, чем посылает сам, а металл 2 - больше; первый заряжается положительно, второй - отрицательно. Это вызовет появление в пограничной области **внешнего электрического поля E** , направленного от положительно заряженного металла к отрицательно заряженному; оно будет

препятствовать указанному выше переходу электронов от одного металла к другому. При этом интеграл $\int E dx$ будет равен разности потенциалов обоих металлов – контактная разность потенциалов, обусловленная разностью работ выхода, поэтому ее будем обозначать через $(\varphi_1 - \varphi_2)_A$. Очевидно, что $(\varphi_1 - \varphi_2)_A = -(A_1 - A_2)/e$, где знак "минус" учитывает знак заряда электрона.

2. Рассмотрим контактную разность потенциалов, которая вызывается различием плотностей электронного газа в металлах. Допустим, что у соприкасающихся металлов работы выхода равны ($A_1 = A_2$), но числа свободных электронов в единице объема отличаются ($n_1 \neq n_2$). При $n_1 \neq n_2$ каждый из металлов будет каждую секунду посылать в пограничную область различные количества электронов N_1 и N_2 . Так как в этой области односторонне действующих сил пока нет, то из $N_1 + N_2$ электронов, каждую секунду поступающих в эту область, половина будет втянута в один металл, другая половина – во второй металл. Таким образом, из первого металла каждую секунду выходят N_1 электронов, а поступают $(N_1 + N_2)/2$ электронов; разница между этими числами вызовет недостаток или избыток электронов в данном металле, т. е. его положительную или отрицательную зарядку. Второй металл приобретает противоположный заряд. Вследствие этого появится электрическое поле E , направленное от положительного заряженного металла к отрицательному, которое со временем приостановит диффузию электронов из одного металла в другой. В этом случае в пограничной области между металлами также возникает контактное электрическое поле E , которое препятствует выравниванию плотностей электронного газа в металлах. Внутри этой области плотность электронного газа должна изменяться от n_1 , в одном металле, до n_2 - в другом с распределением (по закону Больцмана)

$$n_2 = n_1 \exp(-A/T),$$

где A работа переноса электрона через пограничную область, равная $e(\varphi_1 - \varphi_2)_n$ где φ_1 и φ_2 - потенциалы металлов после наступления равновесного состояния. Тогда

$$A = e(\varphi_1 - \varphi_2)_n = kT \ln(n_1/n_2); (\varphi_1 - \varphi_2)_n = kT/e \ln(n_1/n_2), \quad (3)$$

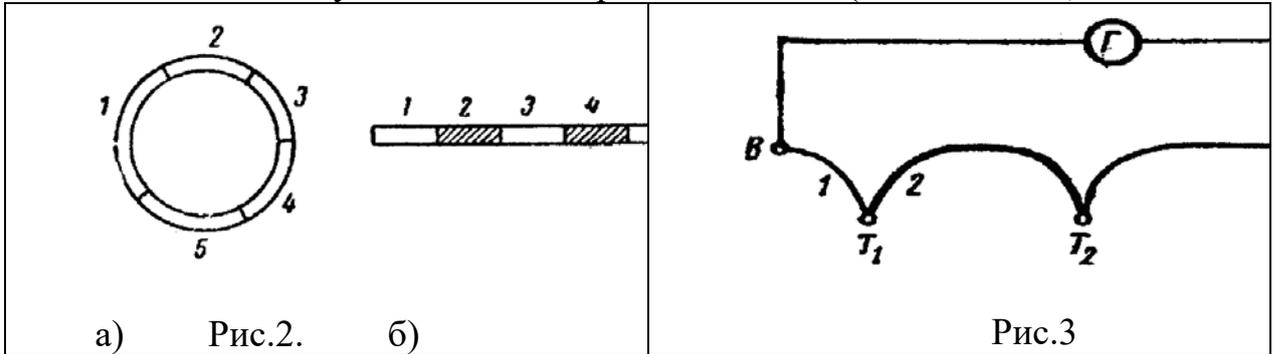
где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура металлов.

Очевидно, если существуют обе причины, вызывающие контактную разность потенциалов, то

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = -(A_1 - A_2)/e + kT/e \ln(n_1/n_2). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что если имеется система из нескольких разнородных проводников, составляющих замкнутую цепь, в условиях термодинамического равновесия и в системе не происходит химических

изменений, то в замкнутой цепи (см. рис.2 а) контактные разности потенциалов не могут вызвать электрического тока (закон Вольты).



Если такая цепь разомкнута (см. рис.2 б), то разность потенциалов между конечными проводниками определяется только материалами конечных проводников и не зависит от промежуточных материалов – она будет точно такой же, как и при соприкосновении одних только крайних проводников. В этом случае

$$f_1 - f_2 = -(A_1 - A_n) / e + kT / e \ln(n_1 / n_n). \quad (5)$$

Очевидно, если крайние проводники совершенно одинаковые, то $A_1 = A_n$, $n_1 = n_n$, и $f_1 - f_2 = 0$.

При наличии разностей температур в замкнутой цепи возникает электрический ток. Рассмотрим систему из двух различных металлов 1 и 2, контакты (спаи) между которыми находятся при различных температурах (рис. 3). Тогда разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$, возникающая в месте контакта с температурой T_1 , будет отличаться от разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ в контакте с температурой T_2 .

Допустим, что работы выхода A_1 и A_2 и плотности электронов n_1 и n_2 не изменяются с температурой, тогда суммарная разность потенциалов между точками B и C (при разомкнутой цепи) будет равна:

$$\begin{aligned} \varphi_B - \varphi_C &= (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_1) = \left(-\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_1}{e} * \ln \frac{n_1}{n_2}\right) + \\ &+ \left(-\frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_2}{e} * \ln \frac{n_2}{n_1}\right) = (T_1 - T_2) \frac{k}{e} * \ln \frac{n_1}{n_2} = C(T_1 - T_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Эта разность потенциалов является электродвижущей силой, называемой **термоэлектродвижущей силой**, а систему, изображенную на рис.3, - **термоэлементом**. Очевидно, если для данных двух металлов известна постоянная C термоэлектродвижущей силы, то выражение (6) можно переписать

$$\varepsilon = C(T_1 - T_2). \quad (7)$$

Таким образом, измеряя ε и зная температуру одного из спаев, например T_2 , можно определить температуру T_1 среды, в которой находится другой спай. Этим пользуются для измерения очень высоких и очень низких

температур, а также для измерения температур в тех местах, где нельзя использовать обычные ртутные термометры. Величина постоянной C составляет микровольты на один градус разности температур. Например, для термоэлемента из железа и константана $C = 5,2 \cdot 10^{-5}$ В/град.

Следует заметить, что измерение A позволяет найти отношение плотностей электронного газа в контактирующих металлах, поскольку $C = k/e * \ln(n_1/n_2)$.

Упражнение 1.

Градуировка термопары.

Градуировка термопары может быть произведена при помощи схемы, приведенной на рисунке 4, где для поддержания постоянной температуры холодный спай "а" погружен в тающий лед в стеклянном сосуде (для контроля температуры сосуд снабжен ртутным термометром). Горячий спай "б" также помещается в подогреваемый сосуд с водой. Сосуд с водой имеет электронагреватель и снабжен термометром T и мешалкой M .

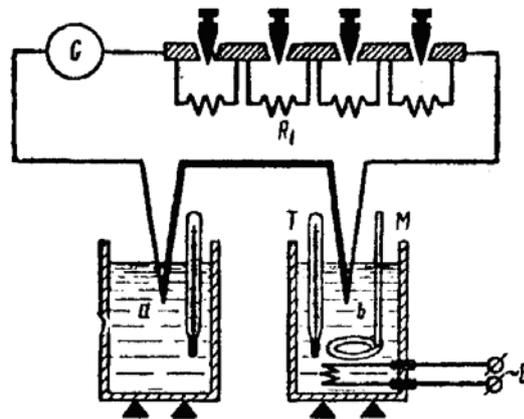


Рис.4.

Для градуировки термопары сопротивление R выключают из цепи (при помощи контактных ключей).

Включают электронагреватель и в течение всего периода нагревания воды размешивают мешалкой. Через каждые 5°C регистрируют показания гальванометра G или микровольтметра. Далее строят график, откладывая по оси абсцисс показания гальванометра, а по оси ординат - разность температур между обеими спаями термоэлемента.

Упражнение 2.

Определение термоэлектродвижущей силы.

Упражнение выполняют на той же установке, что и для первого упражнения (рис.4). Предположим, что холодный и горячий спаи имеют температуры t_1 и t_2 . Если сопротивление R выключен из цепи, то ток, идущий

через гальванометр будет равен $I = \frac{\varepsilon}{R_G} = kn$, где R_G - сопротивление

гальванометра, термопары и подводных проводов, k - цена деления гальванометра G , n - число делений, указываемых гальванометром.

Если, не изменяя температуры спая, включить внешнее сопротивление R (при помощи контактных ключей), то $I' = \frac{\varepsilon}{R_G + R} = kn'$. Исключая из полученных уравнений R_G , найдем $\varepsilon = k \frac{nn'}{n - n'} R$. Сравнивая последнее выражение с формулой (7), для C получим

$$C = \frac{kR}{t' - t} \frac{n'n}{n - n'}. \quad (8)$$

Экспериментально C определяют следующим образом: устанавливают некоторую температуру воды t' (для этого электроплитку выключают и выжидают несколько минут, пока температура воды в сосуде не перестанет повышаться). Отмечают показания n гальванометра и регистрируют температуру t' нагретого спая. Включают в цепь сопротивление R и отмечают новое показание гальванометра n' . Показания гальванометра должны быть сняты строго при той же температуре t' , что и показания n .

Отсчитывают по термометру температуру холодного спая t . Вычисляем по формуле (8) термоэлектродвижущую силу C , возникающую при разности температур 1°C (в микровольтах на градус).

Дополнительное задание

1. Продумайте и предложите схему для определения ЭДС термопары методом компенсации на реохорде.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М., 1979. Т.3, гл. 8. §§ 55, 57, 59, Гл. 9., §§ 60 - 64.
2. Калашников С.Г. Электричество.- М.,1986. Гл. 19 §§ 151-153, 198, 203-205.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики.- М.,1977, Гл.7,8, §§ 104, 108, 100
4. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. М.: 2007. Т.2. Гл.XV1. §§ 168 - 171 С. 174 – 193.
5. Настоящее учебное пособие, часть 1. §10. С.81.

Задача 9.**ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.
ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ И ЕМКОСТИ**

Цель работы: ознакомление с принципом измерения коэффициента самоиндукции, емкости конденсатора, проверка закона Ома для переменного тока.

Принадлежности: источник тока ВУП-24м, амперметр, вольтметр, реостат, магазин емкостей, индуктивность, двойной и одинарные ключи

Если к концам проводника с активным сопротивлением R_0 приложена переменная электродвижущая сила, величина которой в каждый момент времени t определяется уравнением

$$U(t) = U_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где U_0 - амплитудное значение напряжения, а $\omega = 2\pi\nu$ - круговая частота, то в нём возникает переменный электрический ток, сила которого в тот же момент времени определяется по закону Ома

$$I(t) = \frac{U_0}{R_0} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

где $R_0 = \rho \frac{l}{S}$ - **активное сопротивление**, l , S и ρ - длина, сечение и удельное сопротивление проводника.

Соответствующие электрическая схема, график зависимости тока и ЭДС от времени, и векторная диаграмма приведены на рис.1.

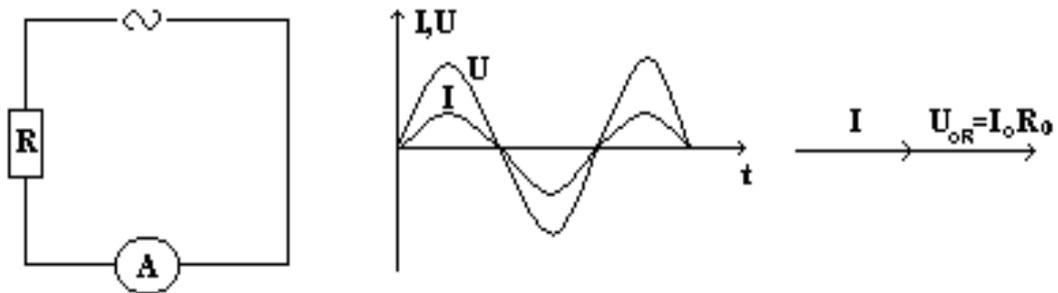


Рис.1.

Если же помимо активного сопротивления R_0 в цепи имеется индуктивность, характеризуемая коэффициентом самоиндукции L , то под действием той же электродвижущей силы возникает ток силой

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t - \phi). \quad (3)$$

Соответствующие электрическая схема, график зависимости тока и ЭДС от времени, и векторная диаграмма приведены на рис.2.

Из этой векторной диаграммы следует, что

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + R_L^2}} = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U_0}{Z}. \quad (3a)$$

ϕ - сдвиг фаз между током и напряжением, определяемый по формуле

$$\operatorname{tg} \phi = R_L / R_0 = \frac{L\omega}{R_0}. \quad (36)$$

Величина $\omega L = R_L$ носит название **реактивного индуктивного сопротивления**.

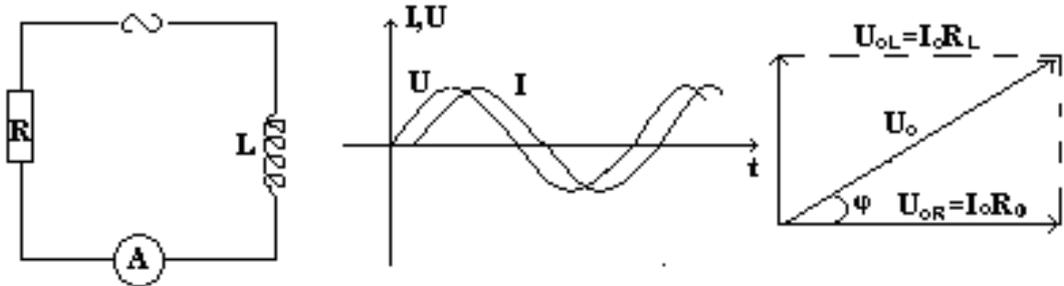


Рис.2.

Из сопоставлений уравнений (1) и (3) следует, что в этом случае ток отстаёт по фазе от напряжения на величину ϕ .

$$\text{В выражении 3(a)} \quad Z = \sqrt{R_0^2 + (\omega L)^2} \quad (3\text{в})$$

носит название полного сопротивления для цепи переменного тока или **импеданс цепи**, так как она играет в формуле (3а) ту же роль, что и обычное сопротивление в законе Ома.

Если помимо активного сопротивления R_0 вместо индуктивности в цепь переменного тока включена ёмкость C , то под действием той же электродвижущей силы в цепи возникает ток силой

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t + \phi). \quad (4)$$

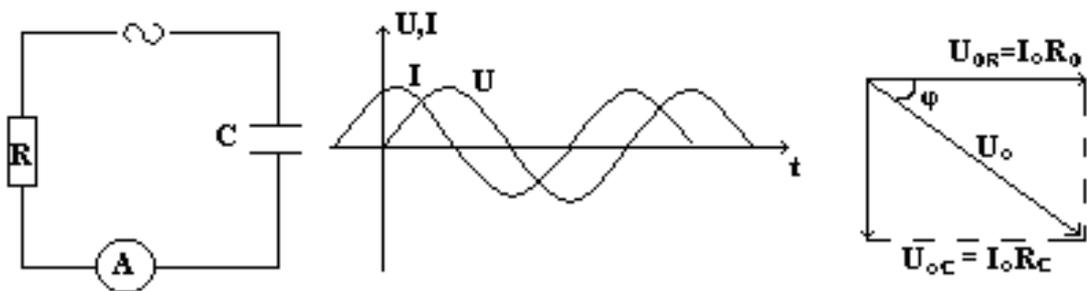


Рис.3.

В этом случае сила тока по фазе опережает напряжение (сравните выражения 1 и 4). Соответствующая электрическая схема, графики зависимости тока и ЭДС от времени и векторная диаграмма приведены на рис.3. Из этой векторной диаграммы следует, что

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + R_c^2}} = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + 1/(\omega C)^2}} = \frac{U_0}{Z}, \quad (4\text{а})$$

где для этой цепи Z теперь принимает вид:

$$Z = \sqrt{R_0^2 + 1/(\omega C)^2}. \quad (46)$$

Величину равную $1/(\omega C) = R_c$ называют **емкостным реактивным сопротивлением**, а сдвиг фаз между током и напряжением определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \phi = R_c / R_0 = \frac{1}{R_0 \omega}. \quad (4B)$$

В этом случае ток опережает напряжение на величину ϕ .

Наконец, в общем случае, когда в цепь включены последовательно все три величины - R, L, C (рис. 4), сила тока в цепи может быть записана в виде

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t - \phi). \quad (5)$$

Соответствующая электрическая схема, график зависимости тока и ЭДС от времени и векторная диаграмма приведены на рис.4, из которой следует для амплитуды тока

$$I_0 = \frac{U_0}{Z} = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \quad (5a)$$

сдвига фаз
$$\operatorname{tg} \phi = \frac{R_L - R_C}{R_0} = \frac{L\omega - 1/\omega C}{R_0} \quad (56)$$

и полного сопротивления
$$Z = \sqrt{R_0^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}. \quad (5B)$$

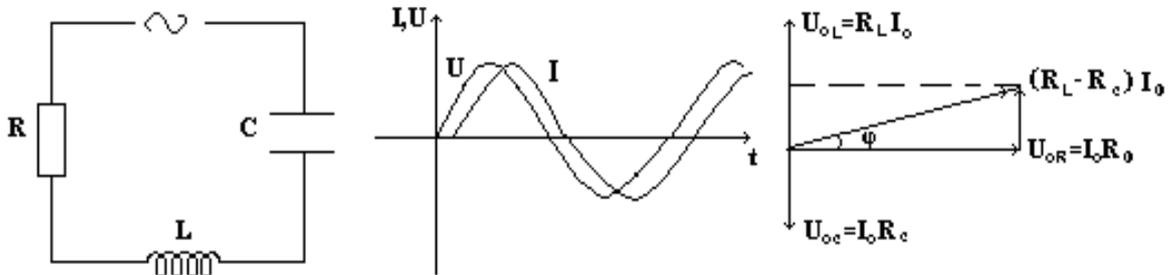


Рис. 4.

Выражение (5a) напоминает закон Ома и поэтому называется законом Ома для цепи переменного тока, где I_0 и U_0 - амплитудные значения тока и напряжения. Так как приборами для переменного тока измеряют эффективные значения этих величин ($I_{\text{эф}}$ и $U_{\text{эф}}$), то, учитывая, что они связаны между собой соотношениями:

$$(I_{\text{эф}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 = 0,71 I_0, U_{\text{эф}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 = 0,71 U_0),$$

выражения (2, 3, 4 и 5) можно переписать в виде:

$$I_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{Z}, Z = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}, R_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

$$I'_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{Z} = \frac{U'_{\text{эф}}}{\sqrt{R_0^2 + R_L^2}} = \frac{U'_{\text{эф}}}{\sqrt{R_0^2 + (\omega L)^2}}, \quad (7)$$

$$I''_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{Z} = \frac{U''_{\text{эф}}}{\sqrt{R_0^2 + R_n^2}} = \frac{U''_{\text{эф}}}{\sqrt{R_0^2 + 1/(\omega_n)^2}}, \quad (8)$$

$$I'''_{\text{эф}} = \frac{U'''_{\text{эф}}}{Z} = \frac{U'''_{\text{эф}}}{\sqrt{R_0^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}. \quad (9)$$

Во всех этих формулах R_0 следует понимать как сумму всех активных сопротивлений цепи (в том числе и катушки самоиндукции). Если разность потенциалов измеряется непосредственно на зажимах катушки, то R_0 есть сопротивление одной лишь катушки.

Для выполнения данной работы собирают электрическую схему, приведенную на рис.5, где последовательно включены R , L , C . Неизвестные величины R_0 , L , C находят по предыдущим измерениям $U_{\text{пост}}$, $I_{\text{пост}}$, $U_{\text{эф}}$, $I_{\text{эф}}$ по формулам (6-9).

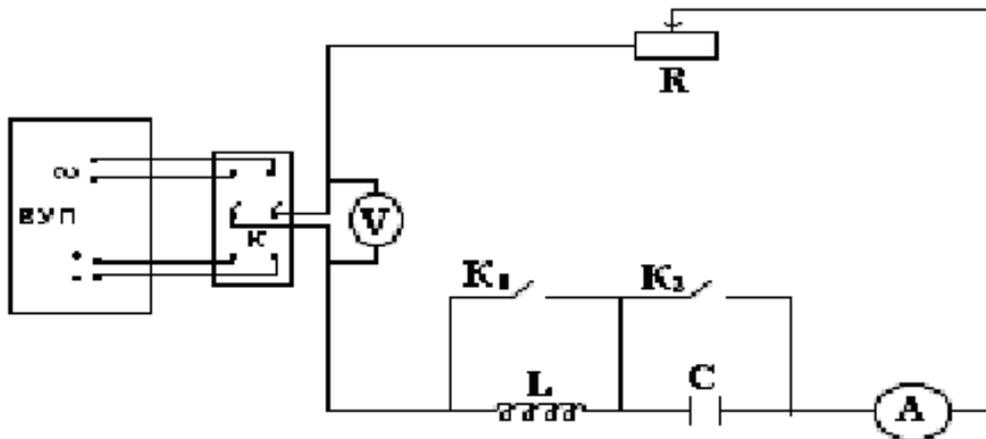


Рис. 5.

В указанной на рис.5 электрической цепи вольтметр и амперметр должны быть пригодны для измерений как постоянного, так и переменного тока. Для определения ω необходимо знать частоту переменного тока, которая для городской сети, на территории РФ $\nu = 50$ Гц и $\omega = 2\pi\nu = 100\pi$ Гц.

Упражнение 1.

Измерение коэффициента самоиндукции L .

Для индуктивности L из формулы (6) следует, что

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R_0^2}}{\omega}. \quad (10)$$

Определив величины Z , R_0 по формулам (6) и поставив их в (10) и (3б), находим искомые значения индуктивности L и сдвига фаз между током и напряжением.

Данное упражнение выполняется при **выключенном** K_1 и **включенном** K_2 . Затем:

1. Замыкают рубильник K на **постоянный** ток. Медленно передвигая ползунок реостата, устанавливают его в таком положении, чтобы стрелки

амперметра и вольтметра отклонились больше чем на половину шкалы. Записывают по приборам силу тока I_{noc} и U_{noc} и, по формуле (6), вычисляют значение активного сопротивления R_o .

2. Для определения полного сопротивления катушки Z замыкают рубильник K на *переменный* ток. Производя соответствующие отчёты по амперметру и вольтметру необходимых значений для $I_{эф}$ и $U_{эф}$ и подставляя их в формулу (6), вычисляют соответствующие значения сопротивления Z . Определив, таким образом, значения Z и R_o , по формуле (10) далее находим значения L .

Упражнение 2.

Измерение емкости конденсатора.

Для емкости C из формулы (4б) следует

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{Z^2 - R_o^2}}, \quad (11)$$

где Z и R_o полное и активное сопротивления цепи.

Упражнение выполняется по той же схеме, что на рис.5. Для определения R_o в электрической цепи надо выключить емкость и индуктивность из схемы (*замыкают* ключи K_1 и K_2 проволочной перемычкой, а ключ K переключают на постоянный ток) и при заданном сопротивлении реостата записывают показания $I_{пост}$ и $U_{пост}$ и по формуле (6) вычисляют R_o .

Для определения Z ключ K_1 оставляют *включенным*, K_2 *выключают*, а рубильник K переключают на источник переменного тока, записывают $I_{эф}$ и $U_{эф}$. Определив Z по формуле (6), подставляют значения Z и R_o в формулы (11), (4б) и находят искомые значения измеряемой ёмкости C и величину угла сдвига фаз.

Во всех измерениях реостат R служит лишь предохранителем на случай пробоя и короткого замыкания обкладок конденсатора и должен быть включён на значительное сопротивление (движок на реостате установить примерно на середину).

Упражнение 3.

Проверка закона Ома для переменного тока.

В случае последовательно включенных R , L , C полное сопротивление переменного тока определяется по формуле (5в)

$$\frac{U_{эф}}{I_{эф}} = Z = \sqrt{R_o^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}. \quad (5в)$$

Для проверки этой формулы в цепь переменного тока (рис.5) включают последовательно: катушку с известной индуктивностью L , конденсатор с известной ёмкостью C и реостат. Упражнение выполняется с *выключенными* ключами K_1 и K_2 . Установив реостат на определенное сопротивление и включив рубильник K на переменный ток, добиваются достаточных

отклонений стрелок на приборах и производят отсчёт $I_{эф}$ и $U_{эф}$. Полученные результаты подставляют в правую часть формулы (5в) и вычисляют Z .

С другой стороны, величину Z находят подстановкой в левую часть формулы (5в) известных (по результатам упражнений 1 и 2) L и C . Измерение R_0 при этом производят следующим образом: ключ K_2 **включают**, а рубильник K переключают на постоянный ток (при неизменном сопротивлении реостата), записывают показания приборов $I_{пост}$ и $U_{пост}$, а затем по формуле (6) находят R_0 . Полученные результаты сравнивают на предмет проверки справедливости закона Ома для переменного тока.

Далее, по известным величинам L , C , R_0 , по формуле (5б), определяют величину угла сдвига фаз. Отчёт представляют в виде таблицы измеренных и вычисленных величин R , L , C , Z .

Таблица 1.

№ п/п	I_{\sim}	U_{\sim}	Z	I_{-}	U_{-}	R_0	L	C	φ	$Z_{изм}$	$Z_{выч}$

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М: 1983. §48. - С.335-346.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3 (электричество) – М: 1977. Гл.10, § 129-131.
3. Калашников С.Г. Электричество – М: 1977. Гл. 21, §§ 217-220. С 473-482.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2 - М: 1978. Гл.13, §92. С.262.
5. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. – М.:2007. Т.2, §§ 232 – 234. С.432 – 446.
6. Настоящее учебное пособие, часть 1. §18. С.151. Приложение 5.

Задача 10. ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Цель работы: изучение резонансных явлений в цепи переменного тока при наличии R, L, C и источника ЭДС

Принадлежности: Вольтметры, звуковой генератор ЗГ-18, набор емкостей, катушка индуктивности, реостаты.

В зависимости от формы включения R, L, C в электрической цепи, в данной задаче рассматривают: резонанс по напряжению и резонанс по току.

1. Изучение резонанса напряжения

Протекание переменного тока в цепи, обладающей ёмкостью C , индуктивностью L и активным сопротивлением R_0 , обусловлено переменным напряжением

$$U(t) = U_0 \sin \omega t. \quad (1)$$

с частотой $\omega = 2\pi\nu$ от источника ЭДС. Если при этом в электрической цепи L, C, R и источник переменного ЭДС включены между собой *последовательно*, как это показано на рис.1, то в цепи будет одинаковый.

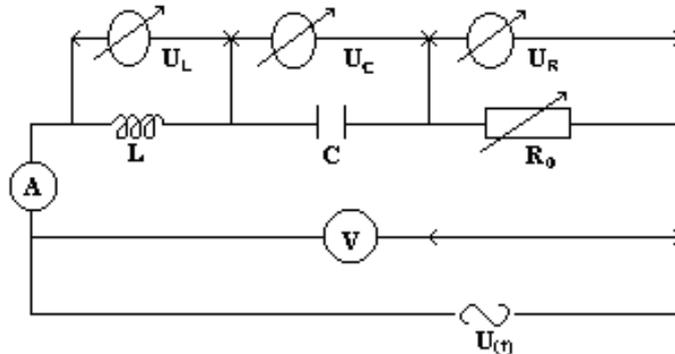


Рис.1.

В рассматриваемой цепи общим для R_0, L, C является ток, так что по второму закону Кирхгофа уравнение для U запишется в виде:

$$U(t) = U_0 \sin \omega t = U_L + U_C + U_R = L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int I dt + IR_0, \quad (2)$$

где $U_L = L \frac{dI}{dt}$ - падение напряжения на индуктивном (реактивном)

сопротивлении $R_L = \omega L$; $U_C = \frac{1}{C} \int I dt$ - падение напряжения на

ёмкостном (реактивном) сопротивлении $R_C = 1/\omega C$; $U_R = IR_0$ -

падение напряжения на омическом (активном) сопротивлении $R_0 = \rho \frac{l}{S}$.

Решение уравнения (1) для тока получается в виде

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t - \phi), \quad (2)$$

где I_0 - амплитудное значение силы тока.

Соответствующие графики зависимости тока и ЭДС от времени, а также векторная диаграмма приведены на рис.2, из которой следует для амплитуды тока

$$I_0 = \frac{U_0}{Z} = \frac{U_0}{\sqrt{R_0^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \quad (3)$$

сдвига фаз

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{R_L - R_C}{R_0} = \frac{L\omega - 1/\omega C}{R_0} \quad (4)$$

и полного сопротивления

$$Z = \sqrt{R_0^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}, \quad (5)$$

где Z - называют **импедансом** или **полным сопротивлением электрической цепи по переменному току**; ϕ - угол сдвига фаз между током и напряжением, которое определяется из соотношения (4).

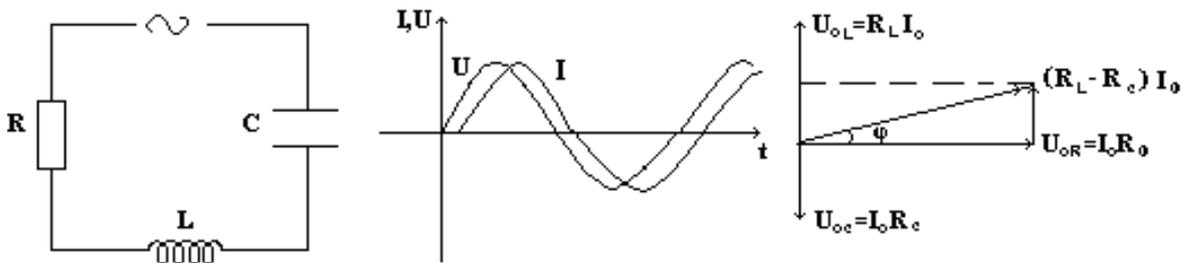


Рис.2.

Из рисунка 2 видно, что падение напряжения на активном сопротивлении изменяется с током по фазе, падение напряжения на емкостном сопротивлении отстает от тока по фазе на $\frac{\pi}{2}$, а на индуктивном - ток опережает по фазе на $\frac{\pi}{2}$.

Анализ формулы (4) показывает, что при $\omega L > 1/\omega C$ приложенное напряжение U опережает ток по фазе и $\phi > 0$, при $\omega L < 1/\omega C$ ток будет опережать напряжение и $\phi < 0$. В частном случае, когда $\omega L = 1/\omega C$ ($\phi = 0$) ток в контуре будет определяться значением активного сопротивления R_0 и достигнет наибольшего значения. Максимальному значению тока в цепи соответствует максимальное напряжение $U_0 = I_0 R_0$ - резонанс напряжения.

Таким образом, резонансом напряжений в цепи переменного тока называют такой режим в неразветвленной электрической цепи, содержащей последовательно соединенные участки с индуктивностью, ёмкостью, активным сопротивлением и источником сторонних ЭДС, при котором

разность фаз между током и напряжением равна нулю. При этом $R_L = R_c$ и ток достигает своего максимального значения $I = I_0 = U_0 / Z = U_0 / R_0$.

в неразветвленной цепи переменного тока, состоящей из R, L, C , условие резонанса может быть достигнуто тремя способами:

- 1) изменением емкости - C ,
- 2) изменением индуктивности - L ,
- 3) изменением частоты - $\omega = 2\pi\nu$.

В данной работе резонанс напряжения будем рассматривать в зависимости от частоты внешней ЭДС.

Общий вид кривых зависимости измеряемого тока от частоты подаваемого напряжения для различных значений сопротивления R_0 показан на рис.3. Максимальное значение тока в цепи имеет место при резонансе напряжений на индуктивности и емкости.

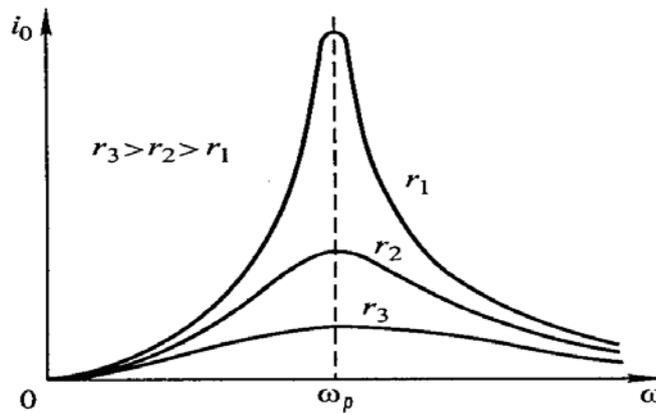


Рис.3.

Для выполнения упражнения собирают электрическую схему приведенную на рис 4.

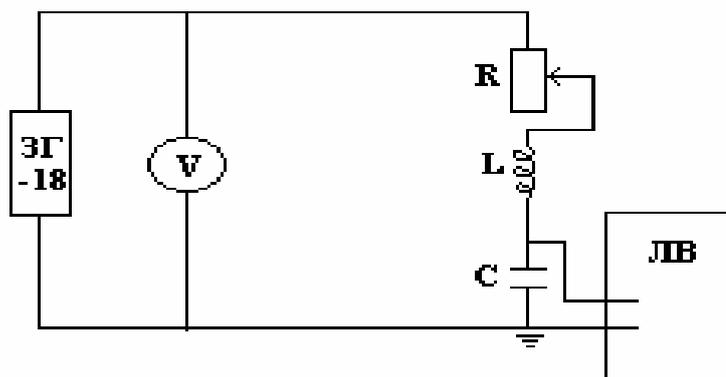


Рис.4.

Источником питания является звуковой генератор ГЗ-18. Ламповый вольтметр (ЛВ) с большим входным сопротивлением. Переменное сопротивление R_0 в схеме представляет собой магазин сопротивлений или высокоомный реостат. Индуктивность L и емкость C задаются.

При сборке схемы обратите внимание на то, чтобы зажим "Земля" генератора оказался соединенным с зажимом "Земля" вольтметра. На

генераторе тумблер "Внутр. нагр." поставьте в положение "Вкл.", ступенчатый переключатель аттенюатора поставьте в положение "600". Выходное напряжение генератора *во время эксперимента поддерживается постоянным* и контролируется с помощью лампового вольтметра ЛВ. Его не следует брать выше 3 В, во избежание пробоя конденсатора при резонансе.

Работа выполняется изменением частоты выходного напряжения, снимаемого с ГЗ - 18. Для начала *необходимо определить область частот, в которой происходит наиболее существенное изменение U_C при изменении частоты*, а затем (по усмотрению) определяют шаг изменения, обеспечивающий достаточно детальное изменение зависимости $U_C(\omega)$.

Результаты эксперимента заносят в таблицу 1. Частоты и соответствующие напряжения, снимают со шкал звукового генератора и цифрового вольтметра или с осциллографа. Число измеренных точек должно быть достаточной, чтобы при заданной R четко определялась резонансная кривая.

По результатам измерений:

1. Постройте график, выражающий зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты питающего напряжения при постоянной амплитуде последнего и $R_0 \approx 0$. Те же измерения и построения проведите при нескольких других значениях R_0 . ($R_0 > 10 - 1000$ Ом),

2. По резонансным кривым найдите соответствующие резонансные частоты, $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

3. Вычислите индуктивность катушки по резонансной частоте $L = 1/\omega_p^2 C$ (C задана по схеме).

4. Используя резонансные графические кривые, определите **добротность электрической цепи** - Q (Q - безразмерная величина, характеризующая потери энергии в цепи) $Q = \frac{2\pi W}{\delta W}$, где W - энергия, запасенная в контуре; δW - уменьшение этой энергии за 1 период T .

При малых потерях энергии $Q = U_{рез}/U_0 = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$, т.е. добротность показывает во сколько раз напряжение на C превышает приложенное от генератора напряжение, см. рис.5.

С другой стороны добротность определяет остроту резонансных кривых. $Q = \frac{\omega_p}{\Delta\omega}$, где $\Delta\omega$ - ширина резонансной кривой, определяемой на уровне 0,71 от резонансной амплитуды тока или напряжения (см. рис. 5). Это соответствует 0,5 мощности при резонансе ($0,5 \approx (0,71)^2$).

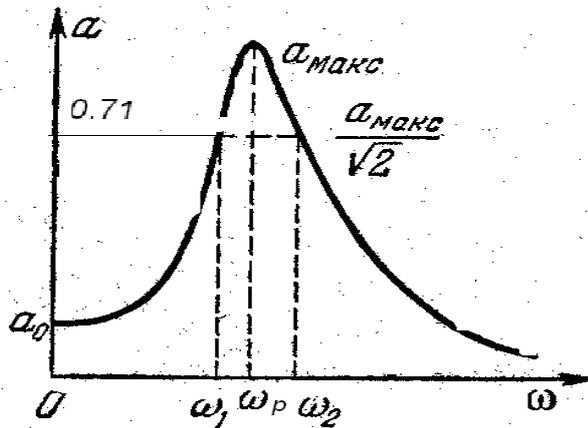


Рис.5.

5. По результатам графического измерения $\Delta\omega$ определите величину добротности Q для разных значений R и постройте *график зависимости Q от R* .

Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 1.

Таблица 1.

$U_{\text{рез}}, \text{В}$	$\omega_{\text{рез}}, \text{Гц}$	$L, \text{Гн}$	$R_0, \text{Ом}$	$C, \text{мкФ}$	$\Delta\omega, \text{Гц}$	Q
1						
2						
3						

II. Изучение резонанса токов

Резонанс по току в электрической цепи наблюдается, когда L, C, R и источник ЭДС будут включены по отношению друг к другу *параллельно*.

Пусть электрическая цепь, состоящая из трех ветвей, одна из которых содержит конденсатор емкости C , а другая - катушку индуктивности L , а третья R питаются от источника сторонних ЭДС с $U = U_0 \sin \omega t$ как это показано на рис.1 а.

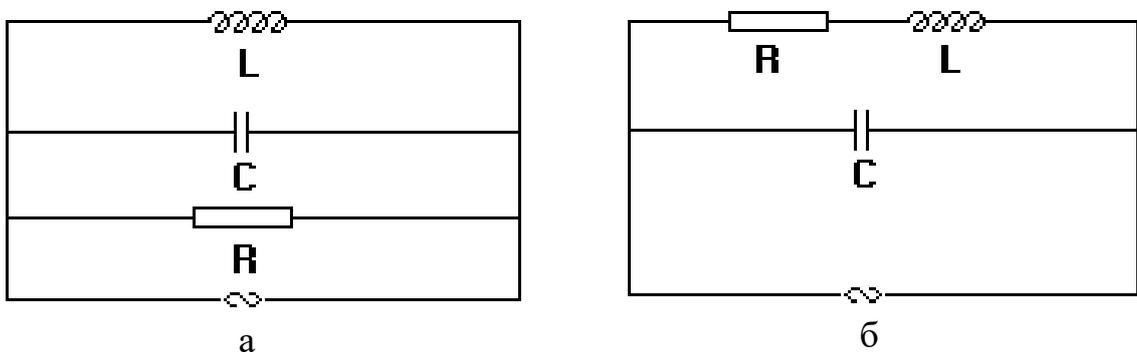


Рис.1.

В рассматриваемой цепи общим является напряжение, а полная сила тока будет равна

$$I = I_R + I_C + I_L, \quad (1)$$

где $I_R = (U_o / R) \sin \omega t$, $I_C = U_o \omega C \cos \omega t$, $I_L = U_o / \omega L \cos (\omega t + \pi)$. (2)

После подстановки (2) в выражение (1) для полного тока I легко получить

$$I = U_o [1/R \sin \omega t + (\omega C - 1/\omega L) \sin (\omega t + \pi/2)]. \quad (3)$$

Векторная диаграмма для разветвленной цепи, где R , L и C включены по отношению друг к другу в параллельных ветвях, показана на рис.2а.

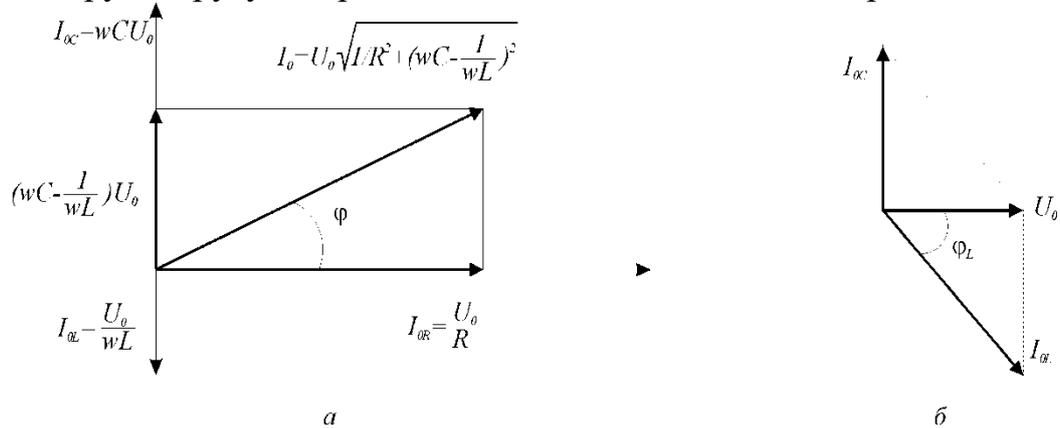


Рис.2.

Если в цепь включены только C и L , причем индуктивность обладает омическим сопротивлением R , отличным от нуля (рис.1б), то полный ток в цепи $I = I_{R,L} + I_C$,

$$\text{где } I_C = U_o \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad I_{R,L} = U_o / \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \sin(\omega t - \varphi_L).$$

Соответствующая векторная диаграмма представлена на рис.2б. Как это видно из рис.2б, при некотором соотношении между L , C и ω сдвиг фаз становится равным нулю и, следовательно, электрическая цепь ведет себя, как чисто активное сопротивление R_o .

При наличии индуктивности в цепи, где $\omega L \gg R_o$, угол сдвига фаз $\varphi_L \approx -\pi/2$, а ток в цепи с C опережает напряжения на $\varphi_C = +\pi/2$. В результате оба тока (I_L и I_C) обладают разностью фаз, близкой к π , т.е. находятся в противофазах. Поэтому полный ток I в цепи приблизительно будет равен разности токов I_L и I_C . Этот случай, когда величина **полного тока в цепи становится наименьшей, называют резонансом токов**. Величина сопротивления в электрической цепи при резонансе тока достигает наибольшего значения и не равна активному сопротивлению R_o , т.к. зависит еще от L и C .

Пользуясь векторной диаграммой (см. рис.2б), находим условие, при котором наступает резонанс токов.

При резонансе тока $I_o C = I_o \sin \varphi_L$, где амплитудные значения для $I_o C$ и I_o будут равны:

$$I_o C = U_o \omega C, \quad I_o L = \frac{U_o}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}. \quad (4)$$

Пользуясь векторной диаграммой сложения и с учетом выражений

(2,3,4) для амплитудного значения полного тока будем иметь

$$I = U_o \sqrt{1/R^2 + (\omega C - 1/\omega L)^2} \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

из которого видно, что при $(\omega C - 1/\omega L) = 0$, т.е. при равенстве индуктивного R_L и емкостного R_C сопротивлений ($\omega L = 1/\omega C$), полный ток минимален (условие резонанса).

Если $(\omega C - 1/\omega L) > 1/R$, то в условиях резонанса ток через конденсатор и индуктивность будет больше полного тока.

Таким образом, резонансом токов называют режим работы разветвленной электрической цепи, содержащей ветвь с индуктивностью L и ветвь с емкостью C , при котором разность фаз напряжения на зажимах цепи и тока на выходе равна нулю. При этом **полный ток** в цепи будет **минимален**, и равен $I_o = U_o/R$, а токи в ветвях с L и C (I_L и I_C) будут намного больше чем I . Электрическая схема, необходимая для изучения резонанса токов приведена на рис.3

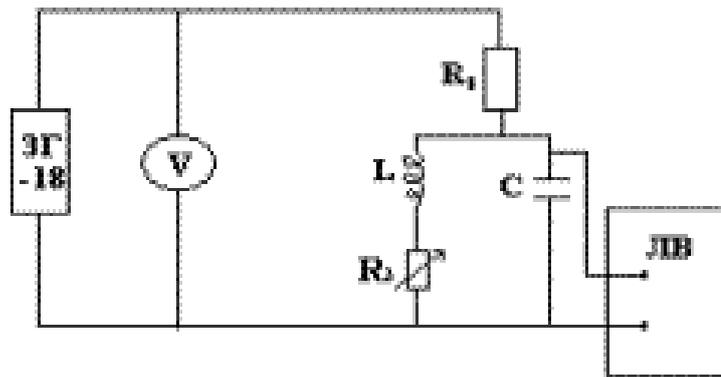


Рис.3.

В качестве источника сторонних ЭДС используется звуковой генератор ГЗ – 18; R_1 и R_2 - резисторы с переменным сопротивлением (реостат и магазин сопротивлений, $R_2 \gg R_1$).

С помощью R_1 можно изменить силу тока в цепи, а с помощью R_2 изменить добротность контура электрической цепи.

Для выполнения работы

1. Собирают схему, приведенную на рис.3 и с помощью ГЗ - 18 задают (постоянный по амплитуде) выходной сигнал (не более 3В). Выходное напряжение контролируется с помощью лампового вольтметра ЛВ. Для обнаружения резонанса меняют частоту напряжения, снимаемого от генератора. Органы управления генератора, и ЛВ устанавливают таким образом, чтобы было удобно измерять напряжение U_C при изменении частоты генератора. Для начала **необходимо определить область частот, в которой происходит наиболее существенное изменение U_C при изменении частоты**, а затем (по усмотрению) определяют шаг изменения частоты, обеспечивающий достаточно детальное изменение зависимости U_C (ω).

1. Изменяя частоту напряжения генератора, снимите зависимость $U_C(\omega)$, заносая данные в такую же таблицу 1.

2. Вычислить ток и построить график зависимости I от ω .

3. Определите по графику: значение резонансной частоты $\omega_{рез}$; полосу пропускания и добротность электрической цепи Q .

Измерения по резонансу тока нужно повторить для двух различных значений R_2 и C .

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М: Высшая школа, 1983. Гл. §50, §48. - С.356.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики (Электричество). Т.3. – М: 1977. §130,127, - С.561.
3. Калашников С.Г. Электричество. – М.: 2004. §§217-221,224,225.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М.: Наука, 1978. §§90-91.
5. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. – М:2007. Т.2. §§ 232 – 234, 240. С.432 – 446, 461.
6. Настоящее учебное пособие, часть 1. §18. С.151. Приложение 5.

Задача 11.**ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ**

Цель работы: освоение метода измерения мощности переменного тока и сдвига фаз между током и напряжением с помощью ваттметра и осциллографа.

Принадлежности: амперметр, вольтметр, ваттметр, ЛАТР, реостаты, катушка индуктивности, магазин емкостей.

Энергия источника сторонних ЭДС в электрической цепи переменного тока, при наличии R, L, C испытывает следующие превращения:

1. Если в цепи переменного тока имеется только активное сопротивление R_0 , то мгновенная мощность, развиваемая источником сторонних ЭДС

$$W_R = IU_R = I^2 R_0, \quad (1)$$

превращается в джоулево тепло нагревания проводника.

2. Если в цепи переменного тока имеется только индуктивность L , то мгновенная мощность, развиваемая источником сторонних ЭДС

$$W(t)_L = LI \frac{dI}{dt} = U_L I, \quad (2)$$

превращается в энергию магнитного поля.

3. Если в цепи переменного тока имеется конденсатор с ёмкостью C , то мгновенная мощность, развиваемая источником сторонних ЭДС

$$W(t)_C = \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{C} I = IU, \quad (3)$$

превращается в энергию электрического поля; Q - заряд на пластинах конденсатора.

При наличии R, L, C в цепи переменного тока полная мгновенная мощность $W(t)$, развиваемая источником сторонних ЭДС будет равна

$$W(t) = W(t)_R + W(t)_L + W(t)_C = U_R I + U_L I + U_C I. \quad (4)$$

Здесь U_R, U_L, U_C - падения напряжений на омическом, индуктивном и ёмкостном сопротивлениях соответственно.

Если в электрической цепи переменный ток меняется по закону $I = I_0 \sin \omega t$, то на основании закона Ома для U_R, U_L, U_C и возникающих сдвигов фаз получим:

$$\begin{aligned} U_R &= I_0 R \sin \omega t, \\ U_C &= \frac{I_0}{\omega C} \sin(\omega t - \pi/2), \\ U_L &= I_0 L \omega \sin(\omega t + \pi/2) \end{aligned} \quad (5)$$

или для мгновенной мощности:

$$P(t)_R = I_0^2 R \sin^2 \omega t, P(t)_C = -\left(\frac{I_0^2}{LC}\right) \sin \omega t \cos \omega t, P(t)_L = I_0^2 \omega L \sin \omega t \cos \omega t.$$

(6)

Практический интерес представляет среднее по времени значение мощности $\langle W \rangle$. Для нахождения средней мощности берут интеграл от мгновенных значений мощности (7) за период и делят на T

$$\langle W \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt. \quad (7)$$

Для среднего значения мощности после подстановки в формулу (7) выражения из (6) получается

$$\langle W \rangle = \frac{1}{2} I_0 U_0 \cos \phi = I_{\text{эф}} U_{\text{эф}} \cos \phi, \quad (8)$$

где I_0 и U_0 - амплитуды силы тока и напряжения; ϕ - разность фаз между силой тока и напряжением; $\cos \phi$ - коэффициент мощности, от которого зависит, насколько эффективно производится передача мощности от источника тока к потребителю.

Эффективные значения тока и напряжений $I_{\text{эф}}, U_{\text{эф}}$ устанавливают по равенству тепловых энергий, выделяемых на одной и той же нагрузке при пропускании постоянного и переменного токов ($Q_{\text{пост.}} = Q_{\text{пер}}$). Им соответствуют значения тока и напряжения на уровне 0,71 от их амплитудных значений:

$$I_{\text{эф}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 = 0,71 I_0; U_{\text{эф}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 = 0,71 U_0.$$

Введение $I_{\text{эф}}$ и $U_{\text{эф}}$ позволяет рассматривать мощность переменного тока формально так, как будто нет колебаний мощности. Лишь присутствие $\cos \phi$ напоминает о том, что речь идёт о переменном токе и показывает, что в общем случае (т.е. при наличии R, L, C) выделяемая в цепи мощность зависит от силы тока, напряжения и угла сдвига фаз между ними.

Для постоянного тока мгновенная мощность совпадает со средней, так как для постоянного тока $\cos \phi = 1$.

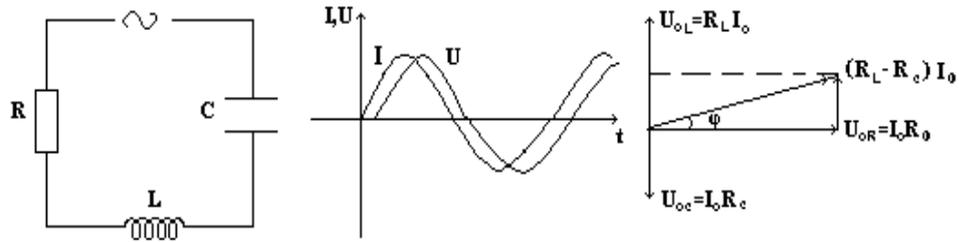


Рис.1.

Из векторной диаграммы для переменного тока легко показать, что в общем случае $\cos \phi$ - коэффициент мощности, есть величина, зависящая от активного сопротивления цепи R_0 , её самоиндукции L , ёмкости C и частоты ω :

$$\cos \phi = \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}. \quad (9)$$

Если в цепи имеется лишь одна активная нагрузка R , тогда $\cos \phi = 1$ и отдаваемая в нагрузку мощность при заданных $I_{эф}$ и $U_{эф}$ максимальна. Если в цепь включить реактивную нагрузку (R_C , R_L), то $\cos \phi$ станет меньше единицы и для обеспечения передачи прежней мощности в электрическую цепь необходимо соответственно увеличить $I_{эф}$ $U_{эф}$, т.е. к потребителю энергии по линии передачи надо подводить больший ток. Это приводит к увеличению потерь энергии на джоулево теплоту в линии передачи. Поэтому всегда стремятся распределить нагрузку так, чтобы сдвиг фаз между током и напряжением в цепи был минимальным (или максимальный $\cos \phi$)

Упражнение 1.

Измерение мощности переменного тока и сдвига фаз между током и напряжением с помощью ваттметра.

Для выполнения упражнения необходимо:

1. Собрать электрическую цепь, приведенную на рис.2 (а).

Упражнение 2.

Измерение мощности переменного тока и сдвига фаз между током и напряжением с помощью осциллографа.

Электронный осциллограф может быть применен для наглядного исследования сдвига фаз между током и напряжением в цепи переменного тока, а также для измерения мощности переменного тока.

На рис.3 приведена схема участка цепи переменного тока, подлежащего исследованию, и принципиальная схема включенного в этот участок катодного осциллографа.

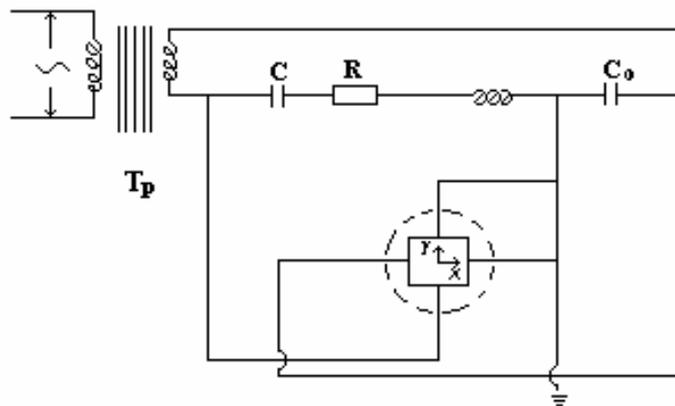


Рис.3

Одна пара пластин осциллографа (например, горизонтальная) включена параллельно исследуемому участку. Вторая пара пластин осциллографа при всех опытах неизменно соединена с эталонным конденсатором C_0 , введенным в схему специально для измерительных целей.

Средняя мощность, развиваемая переменным током на участке C, R, L задается формулой

$$\langle W \rangle = \frac{1}{2} I_0 U_0 \cos \phi = I_{эф} U_{эф} \cos \phi. \quad (11)$$

Для измерения мощности при помощи осциллографа необходимо обеспечить подачу на его пластины отклоняющих напряжений, пропорциональных величинам, входящим в формулу (11). При этом осциллограф работает при выключенной временной развертке. Напряжение, поданное на горизонтальные пластины, пропорционально величине $U_{R,L,C}$. Следовательно, отклонение катодного луча в направлении оси OY будет

$$y = \frac{U_{R,L,C}}{k_1} = \frac{U_0}{k_1} \sin \omega t, \quad (12)$$

где k_1 - чувствительность луча осциллографа в направлении OY по напряжению. Величина k выражается в B/cm . Величина k - это переменная величина, зависящая от используемого в данных условиях коэффициента усиления осциллографа.

Величина отклонения луча в направлении оси OX пропорциональна напряжению на эталонном конденсаторе. Легко видеть, что это напряжение

в свою очередь пропорционально силе тока в цепи. Ток, протекающий по C , приведет к наличию на конденсаторе заряда.

$$q = \int I_0 \sin(\omega t + \varphi) dt = -\frac{I_0}{\omega} \cos(\omega t + \varphi), \quad (13)$$

$$\text{и разности потенциалов } U_{C_0} = \frac{q}{C_0} = -\frac{I_0}{C_0 \omega} \cos(\omega t + \varphi). \quad (14)$$

Следовательно, введение в цепь эталонного конденсатора позволяет подать на вертикальные пластины осциллографа напряжение, пропорциональное амплитуде силы тока. Если чувствительность осциллографа в горизонтальном направлении обозначить через k_2 , то отклонение луча по оси ОХ можно записать так:

$$\text{ось: } OX = U_{C_0}/k_2 = -(I_0/k_2 C_0 \omega) \cos(\omega t + \varphi). \quad (15)$$

Таким образом, на пластинах осциллографа будут поданы два синусоидальных напряжения с равными частотами, но с разными амплитудами и фазами. Эти напряжения пропорциональны множителям, входящим в формулу мощности

$$W = I_{эф} U_{эф} \cos \varphi.$$

В результате сложения двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний с равными частотами суммарное колебание является, в общем случае, движением по эллиптической траектории, чья площадь пропорционально развиваемой током мощности.

Элемент площади эллипса

$$dS = y dx = y \frac{I_0}{k_2 C_0} \sin(\omega t + \varphi) dt = \frac{V_0}{k_1 k_2} \frac{I_0}{C_0} \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t dt = \frac{W(t)}{k_1 k_2 C_0} dt, \quad (16)$$

где $W(t)$ – мгновенная мощность тока. При этом находим среднюю мощность по выражению.

$$W_{сред} = \frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt = \nu \int_0^T W(t) dt. \quad (17)$$

Следовательно, после соответствующей постановки для средней мощности получим выражение

$$W_{сред} = \nu C_0 k_1 k_2 \int_S dS = \nu C_0 k_1 k_2 S, \quad (18)$$

где S - площадь эллипса, $\nu = 1/T$. Частота $\nu = 50$ Гц. Величина k_1 и k_2 задаются. Ёмкость эталонного конденсатора известна. Таким образом, для измерения мощности остается найти из опыта площадь эллипса, получающегося на экране осциллографа. Площадь эллипса находим через длины осей a и b эллипса соотношением $S = \pi ab$. Наблюдения эллипса позволяет измерить на экране осциллографа a и b , определить $\cos \varphi$, а затем вычислить и $W_{сред}$.

Ориентация эллипса по отношению к осям координат зависит от угла φ . Так, например, при $\varphi = 0, \pi/2, \pi$ и т. д. оси эллипса совпадают с осями координат.

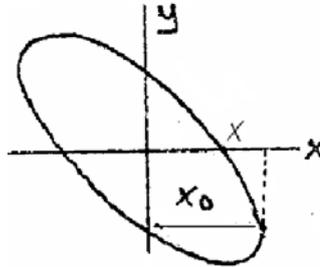


Рис. 4.

Из формулы (15), дающей смещение луча по оси OX , видно, что при $\omega t = 0, \pi, 2\pi, \dots$, можно найти $\cos\varphi$ из выражения

$$\cos\varphi = -X/X_0, \quad (19)$$

где X_0 - амплитуда колебаний по оси OX , а X - координата точки пересечения эллипса с осью абсцисс (рис. 4). Найденное, таким образом, значение $\cos\varphi$ позволяет определить развиваемую током мощность через эффективные силу тока и напряжения, входящие в формулу (11). Действительно, амплитудные значения силы тока и напряжения можно найти по амплитудным значениям x_0 и y_0 как $U_0 = k_1 y_0$, $I_0 = k_2 \omega C_0 x_0$. После этого вычисляют соответствующую мощность, используя выражение

$$W = 1/2 (k_1 k_2 C_0 y_0 x_0 \omega \cos\varphi). \quad (20)$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, показанную на рис.3. Исследуемым участком цепи переменного тока являются последовательно соединенные конденсатор C , реостат R и катушка самоиндукции L (возможны и другие виды их соединений).

2. Перед началом измерений, после того как собрана схема, установить светящуюся точку на экране осциллографа на его середину так, чтобы она совпала с точкой пересечения средних линий на координатной сетке (нельзя долго держать яркую точку на одном месте, так как это портит экран осциллографической трубки). Далее:

а) действуя усилениями осциллографа, можно получить эллипс (растянутый в том или ином направлении);

б) для определения мощности первым способом надо измерить длины осей эллипса a и b и воспользоваться формулой (18);

в) для определения величины сдвига фаз по формуле (19) и мощности вторым способом необходимо измерить x и X_0 и y и Y_0 . Величину $2x$ измеряют непосредственно на экране осциллографа на эллипсе как отрезок его секущей (см. рис. 4);

г) для измерения X_0 отключают от схемы горизонтальные пластины осциллографа и измеряют длину получившейся на экране горизонтальной развертки отрезок: её длина теперь равна $2X_0$. Аналогично находят величину

Уо. Все измерения проделывают несколько раз и вычисляют среднее значение измеряемых величин;

д) опыт проделывают при нескольких значениях сопротивления R и ёмкости C , указанных на установке.

3. Величины W и $\cos\varphi$ для каждого случая вычисляют по формулам (16) и (17).

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М: Высшая школа, 1983. §49. - С.346.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3 (Электричество) – М: 1977. §131. - С.581.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М: 1978. §92.- С.264.
4. Калашников С.Г. Электричество. - М: 2004. §223. - С.479
5. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. – М:2007. Т.2. §§ 232 – 234. С.432 – 446.
6. Настоящее учебное пособие, часть 1. §18. С.121. Приложение 5.

Задача 12.**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ**

Цель работы: измерение длины волны излучения высокочастотного генератора; изучение распределения амплитуд тока и напряжения вдоль двухпроводной линии.

Принадлежности: генератор электромагнитных волн (ГВЧ), Многопредельный ампервольтметр, щупы для тока и напряжения, контрольные лампочки накаливания на 6,3 В

Система, состоящая из генератора электромагнитных колебаний и двух близко расположенных друг к другу параллельных проводов, называется системой Лехера. Такую систему можно рассматривать как колебательный контур с распределенными параметрами.

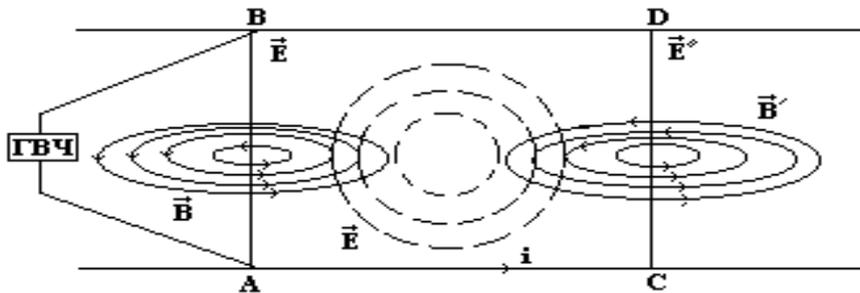


Рис.1.

На рис.1 приведен случай, когда генератор подключен к двухпроводной линии в точках А и В.

Тогда между этими точками возникает переменное электрическое поле \vec{E} . Это поле создает в пространстве переменное магнитное поле индукции \vec{B} , В свою очередь изменяющееся магнитное поле создает в пространстве переменное вихревое электрическое поле \vec{E} . Процесс взаимного превращения электрического и магнитного полей будет продолжаться непрерывно.

Таким образом, в пространстве появляются бегущие электромагнитные волны. Их уравнение имеет вид

$$\begin{aligned} E(x, t) &= E_0 \cos(\omega t - kx) \\ B(x, t) &= B_0 \cos(\omega t - kx) \end{aligned} \quad (1)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число, ω - частота; E_0 , B_0 - амплитудные значения векторов электрического и магнитного полей, x - ход волны.

Направления векторов \vec{E} и \vec{B} электромагнитной волны перпендикулярны к вектору скорости распространения волны υ .

В двухпроводной линии энергия электромагнитной волны передается полностью от источника в нагрузку (через двухпроводную линию) только

тогда, когда в линии нет потерь и отражений энергии. В этом случае в системе Лехера существуют только бегущие волны, где волны электрического и магнитного полей совпадают по фазе, и в проводах несутся волны тока и напряжений. Их амплитуды не зависят от координат OX , а плотность переносимой энергии определяется вектором Умова – Пойтинга $\vec{I} = [\vec{E}\vec{H}]$. Такая ситуация в системе Лехера возникает, если двухпроводная линия либо бесконечно длинная, либо замкнута конечным сопротивлением, известным как волновое сопротивление Z , определяемое как отношение амплитуд напряжения и тока в бегущей волне. Если считать, что тепловые потери тока в линии малы, а утечка между проводами незначительна, то приближенно волновое сопротивление равно

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2)$$

Так как индуктивность единицы длины линии L и емкость C зависят от геометрических размеров и их взаимного расположения, то волновое сопротивление можно выразить через геометрические размеры двухпроводной линии в таком виде

$$Z = 276 \log(a/d), \quad (3)$$

где a - расстояние между проводами, d - диаметр провода.

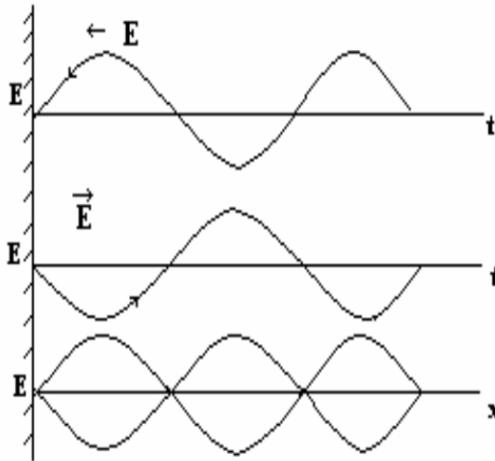
Если линия закорочена ($R = 0$) или разомкнута ($R = \infty$), на конце линии происходит полное отражение энергии, и в линии устанавливается стоячая волна.

Если нагрузить линию на конце сопротивлением большим или меньшим волнового ($R \neq Z$), то появится отраженная волна и наряду с бегущей волной в линии установится **стоячая волна**.

Необходимо иметь в виду, что в реальных двухпроводных линиях не могут быть практически осуществлены режимы чисто бегущих или чисто стоячих волн. Причины этого - наличие во всякой реальной линии отражений и потерь, связанных с выделением джоулева тепла и излучением электромагнитной энергии в окружающую среду. Таким образом, в реальной двухпроводной линии всегда имеет место смешанный режим бегущих и стоячих волн.

Процесс образования стоячих волн в **двухпроводной линии конечной длины** происходит следующим образом (для простоты рассмотрим только электрическую составляющую электромагнитной волны). Запишем соответствующее уравнение для плоской волны, распространяющейся в положительном направлении по оси OX (для электрического вектора E)

$$E_1 = E_0 \cos(\omega t - kx). \quad (4a)$$



Уравнение для отраженной волны будет иметь при этом вид

$$E_2 = E_0 \cos(\omega t + kx - \varphi), \tag{46}$$

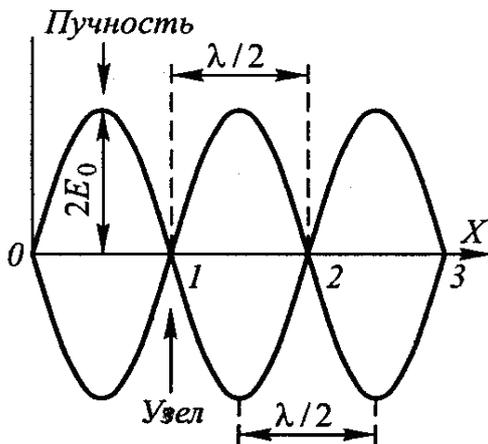
где φ - фазовый сдвиг между бегущей и отраженной волнами. Будем считать, что отражение происходит без потерь энергии, поэтому амплитуды падающей и отраженной волн одинаковы. Обе волны, складываясь, образуют стоячую волну

$$E(x, t) = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos(kx - \varphi / 2) \cos(\omega t - \varphi / 2). \tag{5}$$

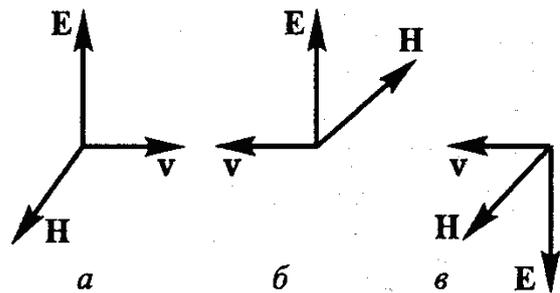
Как это следует из выражения (5), если на длине линии укладывается целое число полуволн, то фазовый сдвиг будет постоянным. Тогда в линии образуется стоячая волна, амплитуда которой равна

$$2E_0 \cos(kx - \varphi / 2), \tag{6}$$

что уже является функцией от координаты x . Вид этой функции показан на рис.3.



Колебания электрического поля в стоячей волне



Взаимная ориентировка электрического и магнитного векторов до (а) и после (б и в) отражения электромагнитной волны

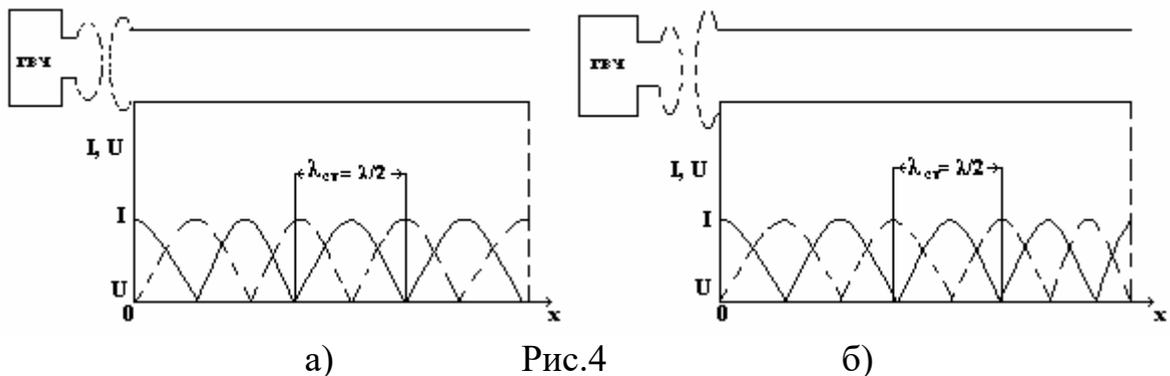
Рис.3.

Амплитуда колебаний вектора \vec{E} в стоячей волне обращается в нуль в точках, для которых $\cos(kx - \phi/2) = 0$. Эти точки называются **узлами** электрического поля **стоячей волны**. По середине между двумя соседними узлами в точке, где $\cos(kx - \phi/2) = 1$, амплитуда колебаний максимальна. Такие точки называются **пучностями** электрического вектора **стоячей волны**. **В стоячей волне не происходит передача энергии** через узлы или пучности волны и **имеет место только локальное ее возбуждение**.

В стоячей волне колебания векторов \vec{E} и \vec{B} не будут совпадать по фазе, как это было для бегущей волны. Характер распределения узлов и пучностей электрического и магнитного полей в стоячей волне зависит от условий на концах линии, т.е. от граничных условий (рис.4.).

Рассмотрим двухпроводную линию, один конец которой разомкнут, а второй - индуктивно связан с генератором высокой частоты (рис.5). Так как разомкнутый конец граничит с диэлектриком $R = \infty$, то, по закону Ома, амплитуда тока на конце линии будет равна нулю, а значит, здесь будет находиться узел магнитного поля \vec{B} и, следовательно, пучность электрического поля \vec{E} , т.е. пучность напряжения (рис 4, 5а).

Если линия закорочена ($R=0$), то амплитуда напряжения на конце линии будет равна нулю, а значит, здесь будет находиться



узел электрического поля \vec{E} и, следовательно, пучность магнитного поля \vec{B} , т.е. образуется пучность тока и узел напряжения (рис.4 а), и наоборот, если линия разомкнута ($R \rightarrow \infty$), то амплитуда тока на конце линии будет равна нулю, а значит, здесь будет находиться узел магнитного поля и, следовательно, пучность электрического поля \vec{E} , т.е. образуется пучность напряжения и узел тока (рис.4 б).

Описание лабораторной установки для изучения электромагнитных волн в двухпроводной линии.

Установка состоит из генератора незатухающих электромагнитных колебаний, двухпроводной линии длиной около 5 м (расстояние между проводами $a = 124$ мм, диаметр медного провода $d = 2,38$ мм) и двух, перемещаемых вдоль линии, измерителей поля (индикаторы) - один

индикатор измеряет величину, пропорциональную квадрату амплитуды тока, протекающего по линии, а другой - величину, пропорциональную квадрату амплитуды напряжения. Измерения распределения амплитуд тока и напряжения вдоль линии производятся индикаторами, схемы которых изображены на рис.5 и 6.

Индикатор тока в виде витка связи (рис.5) ориентируют перпендикулярно к направлению магнитного поля \vec{B} . ЭДС индукции, наводимая в нем высокочастотным магнитным полем, при этом будет пропорциональна амплитуде тока в том сечении линии, около которого расположен виток связи.

Индикатор напряжения в виде приемной антенны располагают параллельно проводам линии вблизи них, как это показано на рис.6. При этом высокочастотное электрическое поле \vec{E} будет индуцировать в цепи прибора ток, пропорциональный амплитуде напряжения между проводами, в том сечении линии, около которого расположены витки связи.

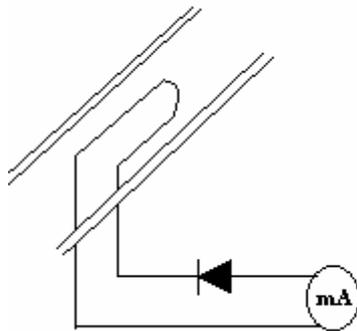


Рис.5.

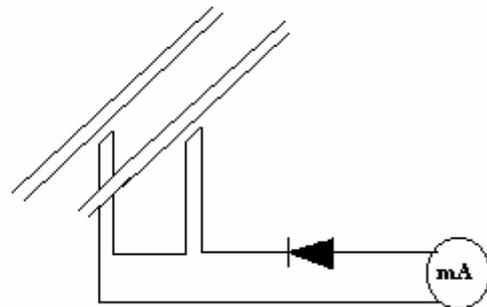


Рис.6.

Необходимо учесть, что напряженность электрического и магнитного полей вблизи провода очень сильно убывает с изменением расстояния от провода. Например, изменение расстояния на один - два миллиметра может привести к значительной ошибке, поэтому необходимо при измерении индикатор держать на одном и том же расстоянии от линии на всей её длине.

Рекомендуется во время измерений держаться по возможности дальше от линии, так как, находясь вблизи линии, экспериментатор будет влиять на распределение поля.

Упражнение 1.

Измерение длины электромагнитной волны и определение частоты генератора

Для измерения длины волны с помощью двухпроводной линии удобно использовать условия, когда в линии установилось одно из её собственных колебаний, т.е. имеет место резонанс линии с генератором. Для того, чтобы настроить линию в резонанс, линию замыкают хорошо проводящим диском и при помощи индикаторов отыскивают положение диска, соответствующее

режиму линии. В качестве индикатора в данной работе используется переключатель с неоновой лампочкой или лампой накаливания. Индикаторы напряжения и тока дают тем больше показания соответственно в пучностях напряжения и тока, чем точнее линия настроена в резонанс. Надо иметь в виду, однако, что при перемещениях диска смещаются и положения пучностей, в которых надо помещать индикаторы.

Расстояние l между двумя максимумами напряжения или тока, найденное перемещающимися индикаторами, будет равно $l = \frac{\lambda}{2}$. Следовательно, $\lambda = 2l$. Таким образом можно определить и частоту генератора $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l}$, где c - скорость распространения электромагнитной волны в среде, принимается равной $3 \cdot 10^8$ м/с.

Упражнение 2.

Исследование распределения амплитуд тока и напряжения вдоль линии.

Эти измерения следует провести при двух нагрузках на конце линии:

1. $R = 0$, т.е. линия замкнута диском, и $R = Z$, когда на линии установлен поглотитель. Поглотитель изготовлен в виде конуса из губчатой резины, пропитанной раствором графита. Такой поглотитель на конце линии эквивалентен нагрузке линии, равной волновому сопротивлению. Однако необходимо учесть, что даже при очень длинных линиях и хороших поглотителях, невозможно получить только бегущую волну, поэтому здесь будут возникать одновременно бегущая и стоячая волны.

Для выполнения упражнения необходимо, перемещая индикаторы вдоль линии через каждые **5** см, снять зависимости амплитуды тока $I(x)$ и амплитуды напряжения $U(x)$ для двух случаев стоячей волны:

а) $R = 0$ и б) $R = Z$.

2. Зависимости $I(x)$ и $U(x)$ для каждого случая представить графически. Проанализировать полученные результаты.

3. Показать, что в случае применения поглотителя в линии преобладает бегущая волна.

4. Оцените степень поглощения энергии волны поглотителем. Для этого нужно поместить индикатор тока или напряжения до и после поглотителя примерно на расстоянии 10 – 20 см от поглотителя и сравнить результаты.

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983. § 59 – 60. - С.398.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3 (Электричество). - М: Наука, 1977. § 143. - С. 620.
3. Калашников С.Г. Электричество. - М: Наука, 1985 - С.496.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2, М: Наука, 1982. §104 - 107, §99,93.
5. Настоящее учебное пособие, часть 1. §§18-21. С.172, 176, 188.

Задача 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы: определение удельного заряда электрона посредством изучения его движения во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях.

Принадлежности: вакуумный диод, соленоид, источник питания для соленоида, ВУП, микроамперметр, амперметры на 1.5 А, вольтметр, реостаты.

Используемый метод определения удельного заряда e/m известен в литературе как метод магнетрона. Происхождение такого названия связано с управляемым магнитным полем в вакуумном диоде - магнетроном, служащим для генерации электромагнитных волн.

Электроны, испускаемые нагретым катодом вакуумного диода, движутся в кольцевом пространстве, заключенном между катодом и анодом (коаксиальными цилиндрическими электродами). Благодаря такой форме и расположению электродов электрическое поле \vec{E} в межэлектродном промежутке направлено по радиусу от анода к катоду. Сам вакуумный диод помещен внутрь соленоида так, что магнитное поле соленоида \vec{B} направлено параллельно оси катода, т.е. перпендикулярно к электрическому полю. Электрическое поле ускоряет электроны в пространстве между электродами, а магнитное поле искривляет их траекторию (это искривление связано с силой Лоренца). В результате, искривленная траектория электронов, движущихся под действием комбинации электрического и магнитного полей, можно описать уравнением динамики вращательного движения через момент силы \vec{M} :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = [\vec{r}(\vec{F}_{эл} + \vec{F}_{маг})] = q [\vec{r}\vec{E}] + q [\vec{r}[\vec{v}\vec{B}]], \quad (1)$$

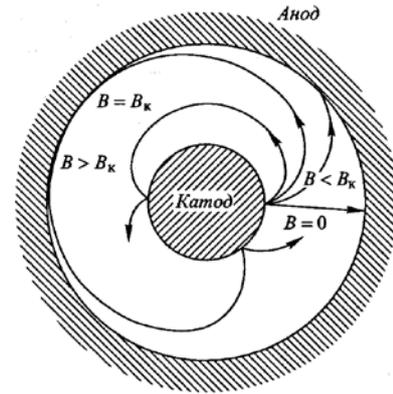
где q - заряд электрона; $\vec{F}_{маг}$ - сила Лоренца; \vec{L} - момент импульса ($\vec{L} = I\omega$); $I = mr^2$ - момент инерции; m - масса электрона; ω - угловая скорость вращения электрона по окружности; $\vec{v} = [\vec{\omega}\vec{r}]$ - линейная скорость вращения электрона по окружности радиуса \vec{r} .

Из выражения (1), после его интегрирования по времени, для ω получаем

$$\omega = \frac{e}{2m} B, \quad (2)$$

из которого видно, что угловая скорость электронов линейно

зависит от B и при данной индукции магнитного поля является величиной постоянной. Отметим, что наличие угловой скорости у электронов свидетельствует об искривлении их траекторий магнитным полем.



Пути электронов в цилиндрическом магнетроне

Рис.1.

Примерный вид траектории электронов для различных значений B показан на рис.1.

Траектория электронов в общем случае представляет собой кривую с переменной кривизной, уменьшающейся при приближении к аноду. Чем сильнее магнитное поле, тем больше искривление траектории электронов. При $\vec{B} = 0$ траектория представляет прямую линию (рис.1а). При полях $B \ll B_{кр}$, $B < B_{кр}$ траектория искривляется, но электрон все же достигает анода (рис.1 б и в). При некотором критическом значении индукции магнитного поля $B_{кр}$ траектория искривляется так сильно, что в самой удаленной от катода точке электрон только касается анода. И, наконец, при $B > B_{кр}$ электрон совсем не попадает на анод (см. рис.1 с). Ток диода при $B \geq B_{кр}$ начинает резко уменьшаться и с ростом B спадает до нуля. Индукцию критического поля $B_{кр}$ можно найти, если принять во внимание, что при $B = B_{кр}$ радиальная составляющая скорости электрона обращается в нуль и в этой точке остается только тангенциальная составляющая скорости $v_\tau = \omega r$.

Учитывая, что магнитное поле над электроном работу не совершает, работа электрического поля по перемещению электрона от катода к аноду будет равна приращению кинетической энергии электрона

$$qU = \frac{mv_\tau^2}{2}, \quad (3)$$

где U - разность потенциалов между катодом и анодом. Подставляя в формулу (3) соответствующие значения для v_τ и ω , получим

$$U = \frac{1}{8} \frac{q}{m} r^2 B_{кр}^2. \quad (4)$$

В качестве источника однородного магнитного поля в работе используется длинный ($d/l \ll 1$) соленоид. Индукцию магнитного поля в нем находим по току I_c , протекающего по соленоиду

$$B = \mu_0 n I_c \quad \text{и} \quad B_{кр} = \mu_0 n I_{кр}, \quad (5)$$

n – число витков на единицу длины соленоида, μ_0 – магнитная постоянная.

Учитывая соотношение (5) равенство (4) можно переписать в виде

$$kU = \frac{q}{m} I_{кр}^2, \quad \text{где} \quad k = \frac{8}{\mu_0^2 n^2 r^2}. \quad (6)$$

Уравнение (5) представляет собой уравнение прямой, проходящей через начало координат. Оно позволяет вычислить отношение e/m . Для этого необходимо построить график зависимости $kU = f(I_{кр}^2)$. Тангенс угла наклона этого графика к оси OX (ось $I_{кр}^2$) даст величину отношения e/m .

Порядок выполнения работы:

1. Собрать электрическую схему, приведенная на рис.2, где: D – вакуумный диод с анодом A и катодом K , D – соленоид, mA , A – амперметры, V – вольтметр, R – реостаты. Питание диода осуществляется от источника питания ВУП - 22. Нить накала диода питается от выхода " «6,3В» через блок стабилизации на ВУПе. Обмотка соленоида питается от выхода выпрямителя с регулируемым напряжением.

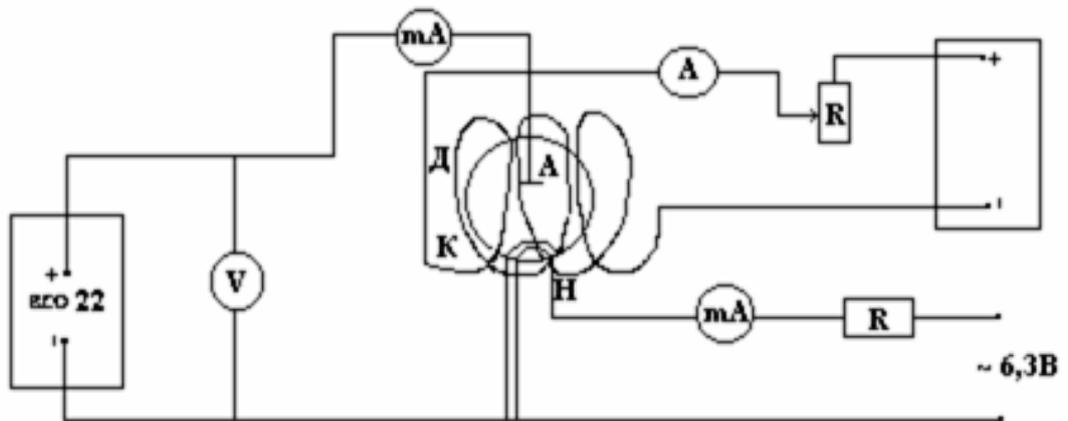


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема установки.

Сила тока, потребляемая соленоидом, измеряется с помощью амперметра. Ток через соленоид изменять, регулируя величину напряжения на выходе блока питания.

Перед началом работы установить потенциометры, регулирующие напряжения на выходе ВУПа, в крайнее левое положение.

2. Включить ВУП – 22 и с помощью потенциометра установить анодное напряжение U в пределах рабочего диапазона "10 – 25 В".

3. Вращая ручку регулирования на ВУПе добиться, чтобы стрелка амперметра, измеряющего анодный ток I_a , находилась в пределах шкалы (при $I_c = 0$). Записать значения U , I_a и I_k в таблицу 1.

Таблица 1.

U, В							
U_1		U_2		U_3		U_4	
I_a , дел	I_c , mA						

5. Ручкой регулировки выхода увеличивать ток соленоида через каждые 0,1 А до 1,5 А и одновременно следить за силой анодного тока I_a . Ток соленоида увеличивать до достижения критического режима, т.е. добиться значительного уменьшения анодного тока при увеличении тока соленоида. Значение величины I_c и I_a занести в таблицу 1

6. Указанные измерения проделать при различных значениях анодного напряжения, взятых в интервале "10 – 25 В". Для каждого значения U измерения повторить.

7. По данным таблицы 1 построить для различных U . графики зависимости $I_a = f(I_c)$, которые называют "сбросовой характеристикой". Поскольку у вылетающих из катода электронов есть некоторая начальная скорость и разброс электронов по величине этой скорости, то сбросовая характеристика не будет спадать так резко, как это следует из теории, что изображено на рис.3 пунктирной линией. Критические условия, поэтому будут достигаться для различных значений тока I_c . Это приводит к более плавному спаду сбросовой характеристики (сплошная кривая на рис.3). Эта и другие причины приводят к дополнительному сглаживанию сбросовой характеристики, что затрудняет точное определение e/m .

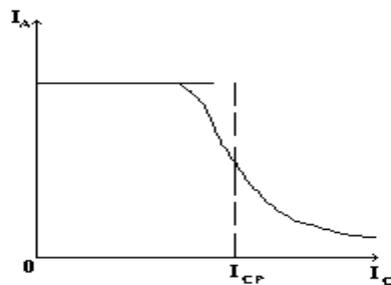


Рис. 3

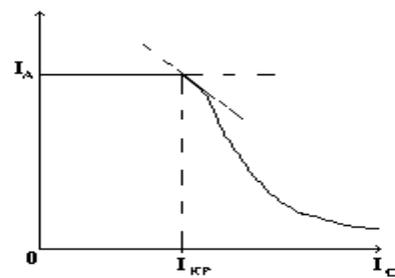


Рис.4

8. По построенным зависимостям $I_a = f(I_c)$ найти критическое значение тока соленоида $I_{кр}$, равное силе тока соленоида I_c в самом начале спада кривой тока (рис.4) Найденные значения $I_{кр}$ и соответствующие значения U занести в таблицу 2.

Таблица 2

U , В	$I_{кр}$, mA	kU	$I_{кр}^2$

9. Рассчитать и занести в таблицу 2 величины kU и $I_{кр}^2$. Значения r и n и другие данные взять из паспорта установки.

Для данной установки: $d_a = 10$ мм; $d_k = 0,6$ мм; $n = 15250$ м⁻¹)

10. По данным таблицы 2 построить график зависимости kU от $I_{кр}^2$, который, согласно уравнению (6) должен представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат. Тангенс угла ее наклона к оси OX равен величине e/m

11. Сравнить полученное значение e/m с табличным значением e/m для электрона и определить относительную погрешность измерений.

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М: ВШ,1983. §9, §§ 34,39.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3 (электричество). – М: Наука, 1977. §§40, 49, 55,86. Гл. III.
3. Калашников С.Г. Электричество. - М: Наука,1985, гл. XVIII, §§178-182
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2, М.; Наука, 1982. Гл. X, §§72-74, - С.201.
5. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. – М.: 2007. Т.2. §§ 214, 218 – 219. С. 365, 382
6. Настоящее учебное пособие, часть 1. §§1,13,14. С.6, 108, 114.

Задача 14.
СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ
ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В ПЕРЕМЕННЫХ
МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Цель работы: исследование процессов намагничивания и перемагничивания ферромагнитных материалов в переменном магнитном поле.

Принадлежности: тороидальный трансформатор, звуковой генератор, осциллограф, амперметр или вольтметр, трансформатор понижающий.

Магнитное поле, созданное в вакууме и в средах одним и тем же током отличаются друг от друга. Это показывает, что различные вещества в магнитном поле намагничиваются, т.е. среды сами становятся источниками магнитного поля. Результирующее магнитное поле в среде является суммой полей, создаваемых проводниками с током и намагниченной средой, и поэтому не равно полю в вакууме. Вещества, способные намагничиваться, называются *магнетиками*.

Причина намагничивания заключается в том, что во всех веществах существуют мельчайшие электрические токи, замыкающиеся в пределах каждого атома (молекулярные токи).

Если магнетик не намагничен, то он не создает магнитного поля. Это означает, что молекулярные токи расположены в нем беспорядочно, так что суммарное их действие равно нулю. При намагничивании магнетика, расположение молекулярных токов становится частично или полностью упорядоченными.

Магнитное состояние вещества охарактеризуют вектором намагниченности, определяемое как суммарный магнитный момент в единице объема, $\vec{I} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}$, (1)

Зная I в каждой точке какого-либо тела, можно определить и магнитное поле, задаваемое рассматриваемой средой.

Другой важной характеристикой магнитного поля является полная магнитная индукция \vec{B} , связанная с намагниченностью следующим образом

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{I}, \quad (2)$$

где H - вектор напряженности магнитного поля, определяемый полным током в контуре (электрической цепи); μ_0 - магнитная постоянная. Поскольку $\vec{I} = \chi \vec{H}$, то из (2) для B получим

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} = \mu \vec{B}_0, \quad (3)$$

в котором, ($\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ Гн/м), χ – *магнитная восприимчивость*, а $\mu = 1 + \chi$ – *магнитная проницаемость* среды. В системе СИ напряженность магнитного поля и намагниченность измеряют в единицах А/м, из этого следует, что магнитные восприимчивость и проницаемость – безразмерные величины

Магнитная проницаемость вещества показывает во сколько раз магнитное поле в средах отличается от магнитного поля в вакууме $\mu = \frac{B}{B_0}$.

Известны два основных эффекта воздействия внешнего магнитного поля на вещества. Это когда, вследствие закона индукции Фарадея носители заряда создают индукционный ток, магнитное поле которого направлено против начального поля. Создаваемый внешним полем магнитный момент называют *диамагнитным моментом*, а вещества, где такой магнитный момент является преобладающим – *диамагнетиками* (азот, вода, серебро и др.). В этом случае $\mu = \frac{B}{B_0} < 1$, т.е. $B_0 > B$ – в диамагнитных средах внешнее магнитное поле ослабляется.

Во-вторых, если в атоме существует результирующий магнитный момент (спиновой, орбитальный или оба), внешнее магнитное поле ориентирует их вдоль поля. Вещества с такими атомами называют *парамагнетиками* (кислород, алюминий, платина и др.). В парамагнетиках внешнее поле усиливается, $B > B_0$, $\mu = \frac{B}{B_0} > 1$.

В некоторых веществах, у атомов которых имеются результирующие магнитные моменты, вследствие электростатических (обменных) взаимодействий магнитные моменты упорядочиваются без внешнего магнитного поля самопроизвольно. Вещества, у которых вследствие таких взаимодействий магнитные моменты направлены в одну сторону, называют *ферромагнетиками*, а вещества, у которых магнитные моменты в равном количестве расположены антипараллельно – *антиферромагнетиками*. Зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля для ферромагнитных (магнитоупорядоченных) материалов

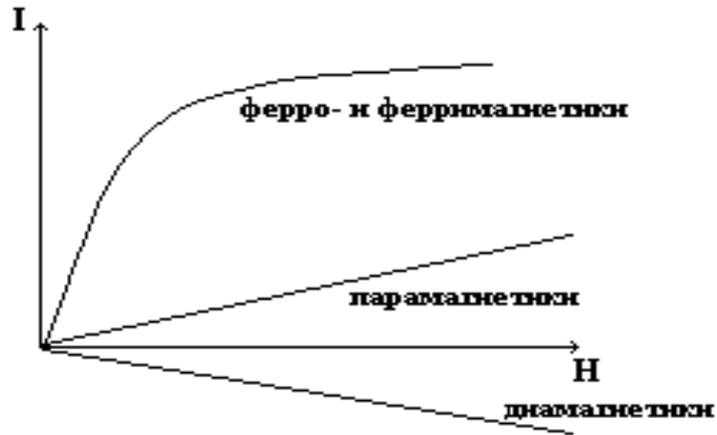


Рис.1.

Кривые намагничивания для диа-пара и ферромагнетиков имеет сложный характер, как это видно на рис.1. Такая форма для магнитоупорядоченных веществ определяется нелинейной зависимостью B от H , где магнитная проницаемость, и следовательно магнитная восприимчивость зависят от H

$$\chi = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta H} = \frac{dI}{dH}.$$

Ферромагнитными свойствами обладают железо, кобальт, никель, гадолиний и многие их сплавы. Их отличительная особенность заключается в том, что во внешних магнитных полях магнитная проницаемость ферромагнетиков может достигь десятки тысяч единиц, $B \gg B_0$, $\mu = \frac{B}{B_0} \gg 1$

Согласно современным представлениям, каждый ферромагнетик, из-за сильной ориентировки элементарных магнитных моментов, независимо от внешнего магнитного поля разбивается на большое число малых областей или доменов. Каждая из этих областей (при температурах ниже температуры Кюри) намагничена весьма сильно, но направления намагничивания в отдельных доменах различны, а именно таковы, что полный магнитный момент ферромагнетиков равен нулю. Намагничивание таких образцов заключается в росте размеров доменов намагниченных вдоль поля или близких к этому направлениях. По завершению этого процесса, связанного со смещением доменных границ, по мере роста магнитного поля, магнитные моменты вращаются и устанавливаются вдоль поля

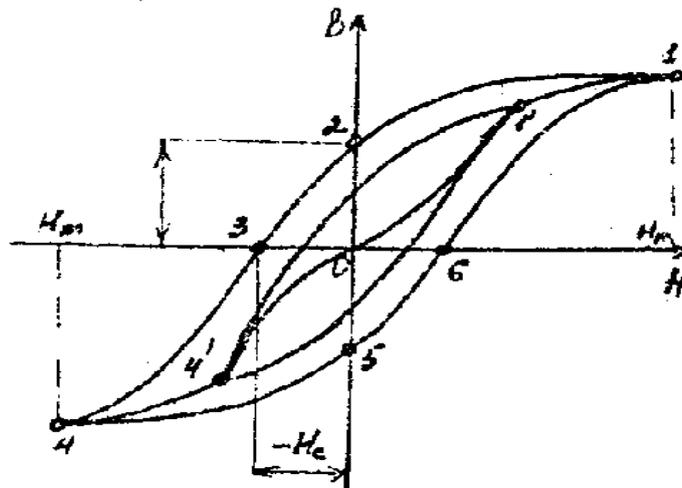


Рис. 2. Основная кривая намагничивания и петля гистерезиса.

Дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к незначительному росту намагниченности за счет парамагнитного процесса – ориентации магнитных моментов разориентированных тепловым движением атомов. С ростом внешнего магнитного поля кривая индукции доходит до насыщения.

При циклическом (периодическом) перемагничивании ферромагнетика изменение вектора индукции B в нем будет изображаться петлеобразной замкнутой кривой называемой петлей гистерезиса. Важными характеристиками магнитного материала являются остаточная намагниченность I_0 и коэрцитивная сила H_C (на рис. 3 они соответственно определяются точками B_r , B_{-r} и H_c , H_{-c}).

Остаточная намагниченность (B_r , B_{-r}) – это значение вектора индукции B внутри магнетика при $H=0$. Чтобы уничтожить эту остаточную намагниченность внутри ферромагнетика, необходимо создать определенное поле, направленное против первоначального намагничивающего поля. Это поле называют задерживающей или коэрцитивной силой ферромагнетика.

Для получения петли гистерезиса в переменном магнитном поле используется установка, схема которой изображена на рис.3.

В качестве исследуемого ферромагнетика используется кольцевой (торроидальный) магнит, а источник переменного тока, питающего первичную обмотку магнита, – звуковой генератор 3 Г – 18.

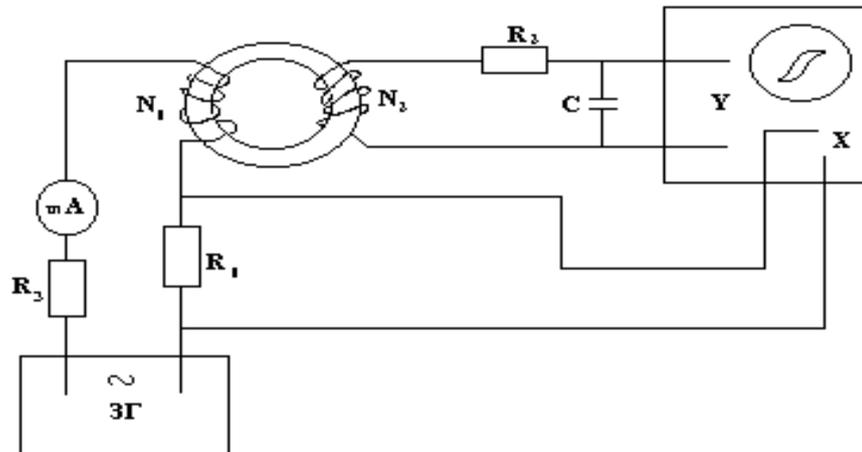


Рис.3.

Первичная обмотка кольцевого магнита с числом витков N служит для создания переменного магнитного поля \vec{H} . Величина \vec{H} связана с падением напряжения U_m на резисторе, сопротивление которого R_1 , в цепи первичной обмотки, соотношением

$$H = \frac{N_1}{l_1} \cdot i_1 = \frac{U_X}{R_1} \cdot n_1 = K_1 \cdot U_X, \quad (1)$$

где i - сила намагничивающего тока, $n_1 = N/l$ - число витков первичной обмотки на единицу длины, $K_1 = \frac{n_1}{R_1}$.

Напряжение с резистора R_1 подается на горизонтальный выход осциллографа. Таким образом, на вход X осциллографа подается напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля \vec{H} .

Для измерения индукции магнитного поля \vec{B} в ферромагнитном сердечнике применяется метод, основанный на законе электромагнитной индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

Здесь Φ - потокосцепление, $\Phi = B S N_2$, где N_2 - число витков во вторичной обмотке магнита, S - сечение магнита. Из (2) следует:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{|\varepsilon_i|}{N_2 S}. \quad (3)$$

Следовательно, напряжение во второй обмотке пропорционально производной $\frac{dB}{dt}$.

Для того, чтобы подать на выход вертикального усилителя осциллографа напряжение, пропорциональное \vec{B} , необходимо между

вторичной обмоткой и осциллографом включить интегрирующее звено – RC ячейку. (R_2 C на рис. 4).

С учетом, что $\varepsilon_2 = i_2 R_2$ и $q = \int i_2 dt = C U_y$, для \vec{B} из (3) получим:

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int \varepsilon_1 dt = \frac{R_2}{N_2 S} \int i_2 dt = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y = K_2 U_y, \quad (4)$$

где K_2 - коэффициент, равный $\frac{R_2 C}{N_2 S}$. Таким образом, напряжение на конденсаторе C , подаваемое на выход Y осциллографа, пропорционально индукции магнитного поля в ферромагнитном сердечнике, \vec{B} .

Для вычисления B и H напряжения U_x и U_y выразим через экспериментально измеряемые величины: чувствительность C_x горизонтального и C_y - вертикального каналов осциллографа

$$U_x = X/C_x; \quad U_y = Y/C_y. \quad (5)$$

где X и Y – число делений сетки экрана, на которое отклоняется электронный луч вдоль осей X и Y от среднего положения на экране. С учетом соотношений (5) уравнения (1) и (4) принимают вид:

$$H = k_1 (X/C_x) = \alpha X \quad (\alpha = k_1/C_x), \quad (6)$$

$$B = k_2 (Y/C_y) = \beta \cdot Y \quad (\beta = k_2/C_y), \quad (7)$$

Порядок выполнения работы:

1. Собрать электрическую схему, приведенную на рис.3.
2. Включить осциллограф и блок питания в сеть и дать им прогреться в течение 5-10 мин.
3. Ручку резистора R установить в крайнее левое положение, что соответствует отсутствию тока в намагничивающей обмотке трансформатора.

4. Ручками управления лучом осциллографа установить светящееся пятно в центре экрана. Ручки "Усиление X" и "Усиление Y" должны быть при этом в крайнее левом положении (усиление равно нулю).

1. С помощью резистора R установить в намагничивающей обмотке ток, необходимый для насыщения ферромагнетиков. В этом же режиме с помощью ручек "Усиление" добиться того, чтобы петля гистерезиса имела правильную форму и занимала всю площадь экрана.

2. Вернуть ручку резистора R в крайнее левое положение.

3. Резистором R постепенно увеличивать амплитуду тока намагничивающей цепи и при каждом значении этого тока фиксировать координаты x и y положения крайних точек (1 и 4 на рис.2) кривой гистерезиса. Измерения провести для 8-10 значений тока, доведя кривую гистерезиса до предельной. Силу намагничивающего тока желательно увеличивать таким образом, чтобы напряженность поля возросла на одну и ту же величину. Результаты измерений занести в таблицу 1.

4. На одном графике построить основную кривую намагничивания $B=f(H)$ и зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля, H . По графику кривой $\mu=\mu(H)$ определить максимальное значение магнитной проницаемости μ_{max} .

5. Из построенной кривой намагничивания определить графическим методом порядок величины начальной магнитной проницаемости:

$$\mu_H = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{tg} \alpha . \text{ Учесть это значение при построении кривой } \mu = \mu (H).$$

6. Воспользовавшись перенятой на миллиметровую бумагу предельной петлей гистерезиса, найти среднее значение координат точек H_c и B_r в делениях сетки экрана осциллографа:

$$\langle X_c \rangle = \frac{|+X_c| + |-X_c|}{2}, \quad \langle Y_c \rangle = \frac{|+Y_c| + |-Y_c|}{2}$$

Данные занести в таблицу 1.

7. Полученные экспериментально или рассчитанные по формуле значения μ_{max} , μ_H , H_c и B_r занести в табл. 2 и сравнить со справочными данными.

8. Рассчитать абсолютные и относительные погрешности измерений μ_{max} , μ_H , H_c , B_r и сравнить абсолютные погрешности с отклонениями результатов измерений от справочных данных.

Таблица 2.

Величина	μ_{max}	μ_H	H_c	B_r
Данные: справочные эксперимент альные				
Отклонения				

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. - М: Наука, 1983. §42 – С.298.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М: Наука, 1977. Т.2. §40,50,53,55,57-61,68,92.
3. Калашников С.Г. Электричество. - М: Наука, 1985. Гл. XI. §§108,109-112.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. - М: Наука, 1977. Т.3. §58,61,64,74-70,129.
5. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. – М:2007. Т.2. §§ 200 – 204. С.318 – 327.
6. Настоящее учебное пособие, часть 1. §17. С.138-151.

Задача 15.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ**

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

Принадлежности: компас, круговой контур, источник питания постоянного тока, амперметр, реостаты.

Земля представляет собой огромный шаровой магнит. Поэтому в любой точке на поверхности Земли и в окружающем пространстве обнаруживается действие магнитных сил. Магнитные полюса Земли не совпадают с географическими полюсами.

Южный полюс магнитного поля Земли S_M расположен в Арктике около северного географического полюса N_3 Земли;

Северный магнитный полюс N_M расположен в Антарктиде около южного географического полюса S_3 Земли.

Схема силовых линий магнитного поля Земли показана на рис.1.

Силовые линии магнитного поля направлены от северного магнитного полюса к южному полюсу магнитного поля, N_M к S_M . На практике направление магнитных силовых линий Земли можно устанавливать с помощью магнитной стрелки.

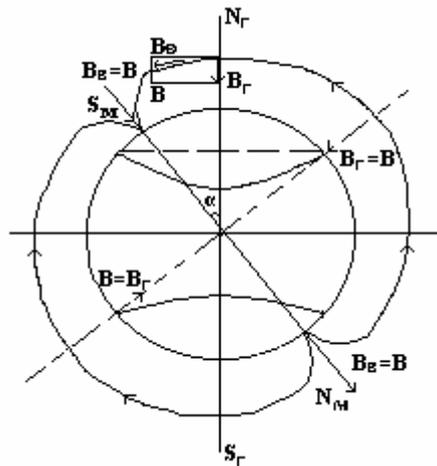


Рис.1. (на рисунке NS – географическая ось вращения Земли).

Если подвесить магнитную стрелку на нити так, чтобы точка подвеса совпадала с центром тяжести стрелки, то последняя устанавливается по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли. В северном полушарии южный конец будет наклонен к Земле, и стрелка составит с горизонтом *угол наклона θ* . Вертикальная плоскость, в которой расположится стрелка, называется *плоскостью магнитного меридиана*. *Угол α между магнитным и географическим меридианом называется магнитным склонением.*

Вектор магнитной индукции \vec{B}_3 Земли невелики и изменяются от $0,42 \cdot 10^{-4}$ Тл на экваторе до $0,7 \cdot 10^{-4}$ Тл у магнитных полюсов.

Вектор индукции магнитного поля Земли можно разложить на две составляющие: *горизонтальную* \vec{B}_g и *вертикальную* \vec{B}_v .

Укрепленная на вертикальной оси магнитная стрелка устанавливается в направлении горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли.

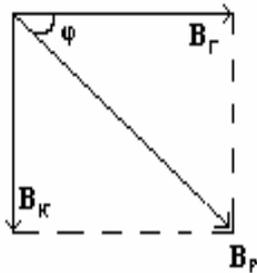


Рис.2.

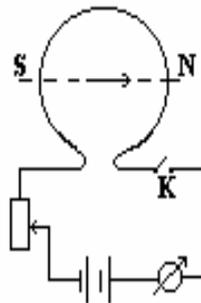


Рис.3 а.

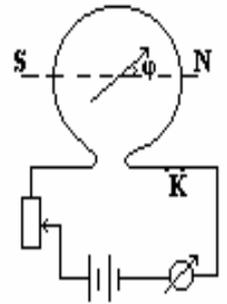


Рис.3 б.

Магнитное склонение θ , склонение α и горизонтальная составляющая магнитного поля \vec{B}_g являются основными параметрами магнитного поля Земли.

Первый способ определения \vec{B}_g

Горизонтальную составляющую магнитного поля Земли определяют с помощью прибора, называемого *тангенс - гальванометром*. Он состоит из катушки - нескольких круговых проводников, расположенных вертикально в плоскости магнитного меридиана (диаметр круга проводника и число витков указываются на приборе). В центре помещается магнитная стрелка. Она должна быть малой, чтобы можно было принимать действующую на полюса стрелки индукцию равной индукции в центре кругового тока.

Плоскость контура устанавливается перпендикулярно горизонтальной плоскости так, чтобы она совпала с направлением магнитной стрелки. Ток, протекающий по контуру, создает магнитное поле \vec{B}_k , действующее на магнитную стрелку и направленное перпендикулярно горизонтальной составляющей земного поля $\vec{B}_p = \vec{B}_g + \vec{B}_k$ (см. рис.2).

Под действием горизонтальной составляющей индукции поля Земли и индукции поля контура стрелка установится по направлению равнодействующей индукции \vec{B} .

$$\text{Из рис.2 видно, что } B_k = B_g \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

Индукция магнитного поля контура B_k в центре равна

$$B_k = \mu_0 \frac{mi}{2r}, \quad (2)$$

где m - число витков контура, i - ток, протекающий в контуре (на рис.3 а) и б) условные направления токов указаны в кружках), r - радиус контура.

Из (1) и (2) следует равенство $\mu_0 \frac{\omega i}{2r} = B_k \cdot \operatorname{tg} \varphi$ или

$$B_k = \mu_0 \frac{\omega}{2r} \frac{i}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (3)$$

где $C = \frac{\mu_0 \omega}{2r}$ является постоянной величиной для данного прибора и называется постоянной тангенс - гальванометра. В результате для тангенс - гальванометра имеем

$$B_k = C \frac{i}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (4)$$

Откуда для тангенса угла находим $\operatorname{tg} \varphi = \frac{C}{B_k} i$.

Отметим, что формула (4) является приближенной, т.е. верной только в том случае, когда размер магнитной стрелки много меньше радиуса контура r . Можно также показать, что наименьшая ошибка при измерениях тангенса угла получается при углах отклонения стрелки близкой 45° .

Описание тангенс - гальванометра.

Тангенс - гальванометр состоит из катушки, укрепленной на вращающейся подставке. В центре катушки устанавливается компасная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси. Отсчет по прибору - это отсчет делений на шкале компаса. Электрическая схема установки приведена на рис.4.

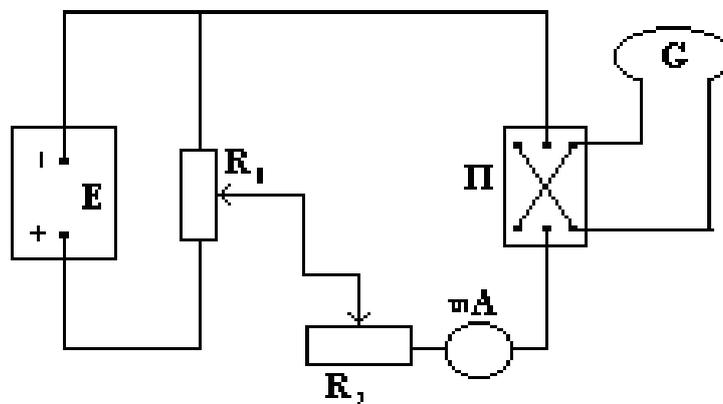


Рис.4.

Здесь: mA - миллиамперметр, Π - переключатель, G - тангенс - гальванометр, R_1, R_2 - реостаты, E - источник постоянного тока.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис.4. Поворачивая подставку тангенс - гальванометра, установить витки его катушки в плоскости магнитного меридиана. Для правильной его установки по диаметру круга проводника тока натянута тонкая нить.

2. Включая ключ пропустить ток через катушку. Изменяя его величину с помощью реостатов R_1 , R_2 , снять зависимость угла $tg\varphi$ отклонения магнитной стрелки от величины проходящего по контуру тока, i . Изменение тока производить в *обоих направлениях* шагом в 0.01А. Величину тока изменять до тех пор, пока стрелка гальванометра не отклонится на 45° . Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

№ измерений	i, mA	φ_1 , град	φ_2 , град	$\langle \varphi \rangle$	$tg \varphi$	B_z Тл

3. Построить график зависимости $tg \varphi = f(i)$. По наклону получаемой прямой (обязательно проходящей через начало координат) определить угловой коэффициент λ .

$$\lambda = \frac{\Delta(tg\varphi)}{\Delta i} = \frac{C}{B_r}. \quad (5)$$

4. По известному значению постоянного прибора C и найденному по графику λ , определить B_z .

5. Оценить, исходя из формулы (3), максимальную погрешность измерения B_z считая, что $\frac{m}{2r}$ известно точно, а абсолютную погрешность в измерениях тока определяется, исходя из класса точности миллиамперметра.

Второй способ определения B_r

Поскольку катушка тангенс - гальванометра трудно точно установить в направлении *север - юг*, можно производить измерение B_z без предварительной ориентировки катушки, фиксируя углы поворота стрелки от начального положения для *обоих* направлений тока, заданной величины, в катушке (ниже, см. рис.5).

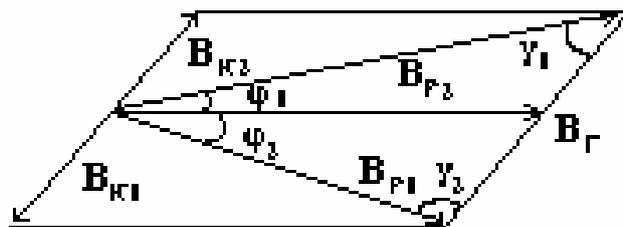


Рис 5.

Из рис.5 видно, что

$$\frac{B_{\kappa 1}}{\sin \varphi_2} = \frac{B_{\Gamma}}{\sin \gamma_2}; \quad \frac{B_{\kappa 1}}{\sin \varphi_1} = \frac{B_{\Gamma}}{\sin \gamma_1}. \quad (6)$$

При $B_{\kappa 1} = B_{\kappa 2}$, очевидно $\gamma_1 + \gamma_2 + \varphi_1 + \varphi_2 = \pi$, где $B_{\kappa 1}$ и $B_{\kappa 2}$ - индукция поля катушки при различных направлениях тока в ней. Решение этой системы дает

$$\vec{B}_{\Gamma} = \mu_0 \frac{\omega i}{2r} \frac{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{\sqrt{\sin^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_2 - 2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}}. \quad (7)$$

Воспользовавшись формулой (7), определите значение B_{Γ} без предварительной ориентировки катушки тангенс - гальванометра. Измерения провести при различных значениях тока в цепи катушки (для 3-4 значений). Полученный результат сравнить с B_{Γ} полученным первым способом.

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. - М: Высшая школа, 1983. §§38. - С.264.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3 - М: Наука, 1977. Гл. III. - С.213.
3. Калашников С.Г. Электричество. - М: Наука, 1985. Гл. VIII. - С.150.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. - М: Наука, 1978. Гл. VI - С.114-131.
5. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. - М:2007. Т.2. § 213. С.359.
6. Настоящее учебное пособие, часть 1, §13. С.108.

Задача 16. ИЗУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы: ознакомление с методом импульсного магнитного поля при разрядке конденсатора на соленоид.

Принадлежности: Осциллограф запоминающий, катушка Гельмгольца, генератор прямоугольных импульсов, вольтметр, реостаты.

Импульсные магнитные поля находят все большее применение в технике физического эксперимента и в современной технологии. Это связано с тем, что в ряде физических задач (в частности для исследований по физике плазмы, в различных разделах ядерной физики и многих других) наличия магнитного поля достаточно в течение довольно малого промежутка времени (обычно менее 0,1 с). С другой стороны, импульсный метод создания магнитного поля часто оказывается более простым, чем создание постоянного поля такой же напряженности, а при индукции более 10 Тл - остается пока единственно возможным.

Метод создания импульсного магнитного поля

Наиболее простая электрическая схема для создания импульсного магнитного поля изображена на рис.1. Магнитное поле создается током импульсного разряда накопительного конденсатора C через обмотку соленоида без сердечника с индуктивностью L и малым активным сопротивлением R . Конденсатор C предварительно заряжается через резистор R_1 от источника постоянного тока до напряжения U_0 .

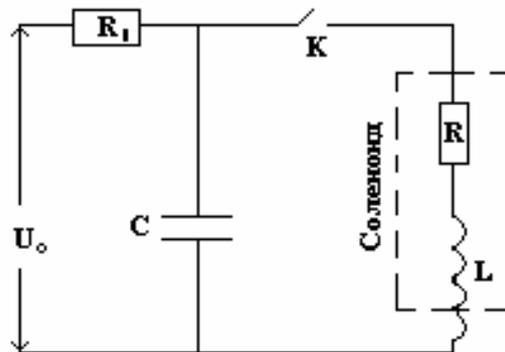


Рис.1.

После зарядки, конденсатор (с помощью ключа K) замыкается на соленоид. При этом электростатическая энергия, накопленная в конденсаторе

$$W_c = C(U_0^2)/2, \quad (1)$$

за время, приблизительно равное четверти периода колебания $T = 2\pi\sqrt{LC}$, переходит в образовавшемся L, C, R контуре в энергию магнитную:

$$W_L = L(I_0)^2/2. \quad (2)$$

При этом

$$W_c = W_L. \quad (3)$$

Для оценки W_C , которую необходимо запастись для создания магнитного поля с индукцией B_0 , будем считать поле внутри соленоида однородным. Тогда

$$W_L \approx \frac{B_0^2}{2\mu_0} Sl, \quad (4)$$

где $S = \frac{\pi D^2}{4}$, D и l - соответственно диаметр и длина соленоида.

Для более точных расчетов необходимо учитывать неоднородность поля в соленоиде конечной длины с учетом, что при этом для индукции магнитного поля в его центре имеем выражение

$$B_0 = \frac{\mu_0 n I_0 \cos \alpha}{l}, \quad \cos \alpha = \frac{l}{\sqrt{l^2 + D^2}}, \quad (5)$$

где $n = N/l$ - число витков соленоида на единицу длины.

Для более точного расчета энергии, необходим и учет потерь энергии на активном сопротивлении R , используя уравнение собственных колебаний в образовавшемся L, C , и R - контуре:

$$L\ddot{Q} + R\dot{Q} + \frac{Q}{C} = 0, \quad (6)$$

с учетом, что колебания в контуре начинаются в момент времени, когда конденсатор полностью заряжен, а ток в контуре отсутствует:

$$Q(t=0) = U_0 C, \quad I(t=0) = \frac{dQ}{dt} = 0.$$

Здесь Q - мгновенное значение заряда на конденсаторе.

При таких начальных условиях решение уравнения (6) имеет вид

$$Q = U_0 C \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cos(\omega t - \varphi), \quad (7)$$

откуда
$$I = -\frac{U_0 \omega_0}{Z \omega} e^{-\delta t} \sin \omega t, \quad (8)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2$, $\delta = \frac{R}{2L}$. $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - волновое сопротивление; $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\delta}{\omega}$.

Характерные зависимости напряжения на конденсаторе $U_C = Q/C$, тока в контуре I и напряжения на индуктивности соленоида $U_L = L(dI/dt)$ приведены на рис.2.

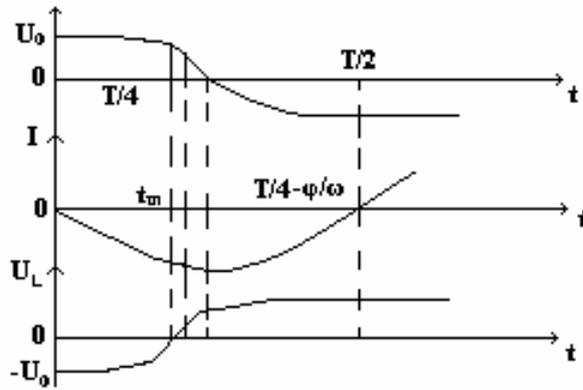


Рис.2.

Анализируя выражение (8), покажем, что максимальное значение силы тока в соленоиде I_m достигается в момент времени

$$t_m = \frac{T}{4} - \frac{\varphi}{\omega}. \quad (9)$$

При этом

$$I_0 = I(t_m) = \frac{U_0}{Z} e^{-\delta t_m}. \quad (10)$$

Таким образом, коэффициент преобразования энергии, накопленной в конденсаторе, в энергию магнитного поля может быть определен как

$$\eta = \frac{W_L}{W_C} = e^{-2\delta t_m}. \quad (11)$$

В случае малого затухания можно воспользоваться линейной аппроксимацией в формуле (11), и, учитывая, что при этом $\varphi/\omega \ll T/4$, $\omega \approx \omega_0$, получаем соотношение для коэффициента преобразования энергии

$$\eta \approx 1 - 2\delta t_m \approx 1 - 2\delta \frac{T}{4} \approx 1 - \frac{\pi R}{2Z}. \quad (12)$$

Таким образом, для достаточно полного преобразования электростатической энергии накопительного конденсатора в энергию магнитного поля соленоида необходимо выполнение неравенства

$$R \ll Z. \quad (13)$$

Метод измерения импульсного магнитного поля

Наиболее распространенным методом для определения во времени магнитного поля является метод индуктивного магнитного датчика. Датчик представляет собой катушку, помещаемую в исследуемое магнитное поле так, чтобы поперечное сечение витков было перпендикулярным направлению магнитного поля. Тогда при изменении магнитного поля в катушке будет наводиться ЭДС индукции

$$E_u = -d\Phi/dt = -S_D N_D dB/dt, \quad (14)$$

где S - площадь поперечного сечения катушки, N_D - число её витков. В случае, когда индуктивное и активное сопротивления датчика существенно меньше сопротивления внешней цепи, можно пренебречь влиянием тока,

протекающего по катушке, тогда сигнал на выход датчика будет равен E_u . Для удобства работы с датчиком этот сигнал необходимо преобразовать в напряжение U_d , пропорциональное B . Эту операцию выполняет интегрирующая RC - цепочка (рис.3, R_d , C_d), напряжение на выходе которой U_d связано с входным E_u следующим образом

$$U_d = (1/R_d C_d) \int_0^t E_u dt, \quad (15)$$

которое хорошо выполняется лишь при $t \ll R_d C_d$. Из этого следует, что постоянная времени интегрирующей цепочки $R_d C_d$ должна существенно превышать характерное время изменения магнитного поля в соленоиде $\tau = 1/\omega$, т.е. должно выполняться условие: $\tau \ll R C$.

Тогда, учитывая (14) и (15), получим

$$U_d = \frac{S_d N_d}{R_d C_d} B. \quad (16)$$

Работа выполняется на экспериментальной установке, схема которой изображена на рис.3 (монтаж схемы нужно выполнить на специальной панели, заключенной в защитный кожух).

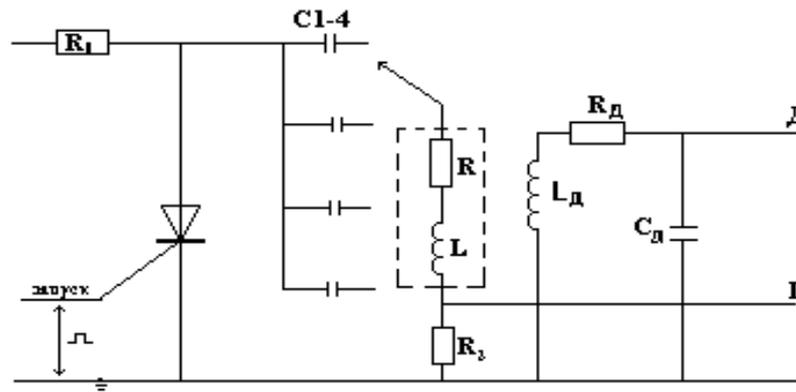


Рис.3.

В схеме для создания магнитного поля используется соленоид L , представляющий собой однослойную катушку, намотанную на каркасе диаметром 25 мм медным проводом диаметром $d = 0,75$ мм с шагом $l/n = 1,3$ мм и длиной намотки 21 см. Накопительный конденсатор состоит из секций конденсаторов, каждая из которых имеет емкость 10 мкФ. Включение каждой секции в цепь осуществляется переключкой Π . Коммутация конденсатора на соленоид осуществляется электронным ключом, собранный на тиристоре T , который открывается при подаче на его управляющий электрод запускающего импульса (разъем "запуск"). Когда ток в контуре падает до нуля, тиристор разрывает цепь. Резистор R_1 , служит для ограничения зарядного тока. Резистор $R_2 = 0,5$ Ом, включенный последовательно с соленоидом, служит для измерения тока в $R L C$ - контуре.

Датчик D предназначен для измерения напряженности магнитного поля индуктивным методом (число витков $N = 40$, площадь поперечного сечения $S_D = 1 \text{ см}^2$, индуктивность $L_D = 10 \text{ мГн}$). Параметры интегрирующей цепочки: R, C : $C_D = 10 \text{ мкФ}$, $R_D = 0,5 \text{ Ом}$.

Для наблюдения однократных редко повторяющихся сигналов, снимаемых с резистора R_2 или интегрирующей цепочки, используется запоминающий осциллограф. Для синхронизации работ осциллографа и схемы формирования импульсного поля служит импульсный генератор Г5-15.

Упражнение 1.

Исследование зависимости максимального тока в соленоиде I_o от зарядного напряжения U_o

Используя схему на рис.3, снять зависимость тока I_o от напряжения U_o . Сила тока I_o определяется с помощью осциллографа с использованием в расчете величины сопротивления резистора R_2 . Напряжение U_o меняется в пределах 0 - 300 В с помощью источника питания.

Построить график теоретической зависимости $I_o(U_o)$ в соответствии с формулой (10) и нанести на него экспериментальные точки.

Упражнение 2.

Исследование зависимости максимальной индукции магнитного поля от зарядного напряжения U_o

На вход осциллографа $У$ подать сигнал с гнезда D панели. Снять зависимость индукции B от напряжения U_o . Индукция поля B определяется с помощью осциллографа с использованием в расчете вычисленной заранее чувствительности датчика D . Напряжение U_o меняется в пределах 0 – 300 В. Построить график зависимости $B(U_o)$, используя формулы (5), (10). Нанести на график экспериментальные точки.

Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. - М: ВШ. 1983. §35,47. - С.340, §38. С. 264.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3 (электричество) - М: 1977. Гл. III, с213
3. Калашников С.Г. Электричество. - М: Наука, 1977. §81,96,97. Гл. VIII.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2 М 1978. §§47, 50. С. 141.
5. Фриш С.Э., Тимофеева А.В. Курс общей физики. – М:2007. Т.2. Гл. 8. §209. С.345.
6. Настоящее учебное пособие, часть 1, §§13,14.
7. Общий физический практикум Электричество и магнетизм. – М.: 1992. /Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Р. Киселева.

ЛИТЕРАТУРА, СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

1. Калашников С.Г. Электричество. Физматлит. - М.: 2004.
2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Т.2. СПб. 2007. Лань.
3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. Высшая школа. - М.: 1983.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. - М.: Наука, 1977.
5. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1978.
6. Парсел Э. Электричество и магнетизм. - М.: Наука, 1971.
7. Телеснин Р.В., Яковлев В.Ф. Курс физики. Электричество. - М.: «Просвещение», 1969.
8. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. - М.: Наука, 1972.
9. Зильберман Г.Е. Электричество и магнетизм. Наука. - М.: 1970. 384 с.
10. Физика – 9, 10, 11 кл. - М.: «Просвещение», 1995-1999. /Под ред. Пинского А.А.
11. Трофимова Т.И., Фирсов А.В. Курс физики. Задачи и решения. - М.: Академия, 2004. 592 с.
12. Дик Ю.И., Ильин В.А., Исаев Д.И. и др. Физика. Большой справочник для школьников и поступающих в вузы. - М.: Дрофа, 2005. 735 с.
13. Дациев М.И. Методическая разработка по электричеству и магнетизму. Махачкала. ИПЦ ДГУ, 2003. С18 – 56.
14. Гираев М.А., Дациев М.И. Методические указания к выполнению лабораторных задач: Электричество, ч.1; Магнетизм, ч.2; Переменный ток, ч.3. Махачкала, ИПЦ ДГУ, 2002 – 2003.
15. Общий физический практикум. Электричество и магнетизм. – М.: 1992. /Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Р. Киселева.
16. Москалев А.Н., Никулова Г.А. Готовимся к Единому государственному экзамену. Физика – М.: Дрофа, 2004.
17. Бутиков Е.И., Быков А.А., Кондратьев А.С. Физика для поступающих в ВУЗы.- М.: Наука, 1976.
18. Гольдфарб Н.И. Сборник вопросов и задач по физике. - М.: Дрофа, 2000.
19. Ковбушкин В.К. Методы решения задач по физике. – Л. Издательство ЛГУ, 1972.
20. Яворский Б.М., Селезнев Ю.А. Справочное руководство по физике для поступающих в ВУЗы и самообразование. – М.: Наука, 1984.
21. Старикова А.Л. Методические указания к курсу лекций по физике для студентов дневного отделения механико-математического факультета. Электростатика (обучающие тесты). Ростов-на-Дону. РГУ, 2004.
22. Калашников Н.П., Кожевников Н.М. Физика. Интернет-тестирование базовых знаний: Учебное пособие.- СПб.: Издательство «Лань», 2009.- 160с.
23. Иродов И.Э. Электромагнетизм. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 1999.