

Р. В. Даминский

ОПЫТЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ И МАГНЕТИЗМОМ

Учебное пособие



СПЕЦИАЛЬНАЯ
ТЕМА

Р. В. Даминов

ОПЫТЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ И МАГНЕТИЗМОМ

Учебное пособие



Р. В. Даминов

ОПЫТЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ И МАГНЕТИЗМОМ

Учебное пособие



**Москва
Берлин
2018**

Оглавление

Предисловие редактора	7
Предисловие автора	8
Об опытах с электричеством и магнетизмом	9
Электризация тел	12
Взаимодействие бумажных гильз	14
Электроскоп и электрометр	15
Трибоэлектричество	17
Электростатическая индукция	18
Распределение зарядов на проводнике	20
Колесо Франклина	21
Электрический ветер	23
Электростатический маятник	25
Электрофилтрация дыма	29
Вращение шара	31
Летающая мишура	33
Электризация струи	34
Султаны	36
Силовые линии электрического поля	38
Поляризация диэлектрика	39
Вращение стержней	40
Прыгающие человечки	43
Электрет	45
Пьезоэффект	47
Емкость проводника	48
Металлобумажный конденсатор	49
Емкость плоского конденсатора	51

УДК 537.8(075)

ББК 22.3я7

Д16

Даминов, Р. В.

Д16 Опыты с электричеством и магнетизмом : учебное пособие / Р. В. Даминов – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2018. – 195 с.

ISBN 978-5-4475-9492-3

В данном пособии представлены описания опытов, часто используемых на лекциях по электромагнетизму в Казанском федеральном университете. При его написании не ставилась цель детального истолкования физики демонстрируемых явлений. Эту задачу хорошо решают учебники. Внимание было уделено описанию конструкций экспериментальных установок и технологии демонстрации публичных опытов. Последовательность изложения предопределена сложившейся традицией преподавания данного курса: электростатические эффекты в вакууме и в веществе, электрический ток в различных средах, магнитное поле и электромагнитная индукция, переменный ток и электромагнитные волны.

Книга является руководством для демонстраторов, полезна преподавателям и учителям, а также студентам и аспирантам, намеревающимся преподавать физику.

УДК 537.8(075)

ББК 22.3я7

ISBN 978-5-4475-9492-3

© Даминов Р. В., текст, 2018

© Издательство «Директ-Медиа», макет, оформление, 2018

Конденсатор переменной емкости	52
Энергия разряда конденсатора	53
Сильноточный кабель	55
Потенциал проводника с током	55
Последовательное и параллельное включения ламп	57
Джоулево тепло	58
Плавкий предохранитель	60
Задутие лампочки	63
Термопара	65
Термостолбик	67
Термоздс в полупроводнике	68
Солнечная батарея	69
Образцы кремния и германия	70
Нагревание диода	71
Электролитическая диссоциация	73
«Отливание» электричества	74
Электролиз в медном купоросе	76
Разряд электроскопа пламенем	78
Дуговой разряд	79
Искровой разряд	83
Скользкий разряд	86
Высоковольтный дуговой разряд	87
Кистевой разряд	89
Глеющий разряд	91
Спектральные трубки	93
Факельный разряд	94
Безэлектродный разряд	97
Электростатическое отклонение электронного пучка	98

Электролюминесценция	99
Опыт Эрстеда.....	100
Магнитное поле проводника с током.....	103
Поле магнита	104
Взаимодействие проводников	105
Разворот катушки в поле магнита	108
Отталкивание и притяжение катушки магнитом.....	109
Вращение контура в магнитном поле	110
Отклонение электронного луча магнитом.....	114
Искривление электронного пучка магнитным полем	115
Траектория электронов в магнитном поле	116
Экранирование магнита.....	117
Экранирование магнитной стрелки.....	118
Экранирование опилок	119
Электромагнит.....	120
Висмут и алюминий на коромысле	121
Висмутовая и алюминиевая стрелки.....	124
Пламя в магнитном поле	126
Модель доменной структуры.....	126
Скачки Баркгаузена.....	128
Точка Кюри.....	129
Гистерезис ферромагнетика.....	131
Эффект Мейснера	133
Опыты Фарадея по электромагнитной индукции.....	137
Правило Ленца.....	140
Раскрутка диска.....	142
Торможение маятника	143
Зависание кольца.....	144

Левитация катушки	145
«Машина времени»	146
Трансформатор Томсона	148
Трансформатор	150
Контактная электросварка	152
Экстратоки замыкания и размыкания	153
Осциллограммы гармонических колебаний	155
Осциллограммы звуков	156
Затухающие колебания в контуре	158
Индуктивное сопротивление	159
Емкостное сопротивление	160
Резонанс напряжений	162
Резонанс токов	164
Однофазный генератор переменного тока	166
Трехфазный генератор	168
Асинхронный электродвигатель	169
Линия Лехера	171
Свойства радиоволн УКВ диапазона	173
Направленность СВЧ излучения	179
Проникающая способность радиоволн	181
Зеркальное отражение радиоволн	182
Преломление, внутреннее отражение и деление радиоволн ..	184
Фокусировка радиоволн	188
Поляризация радиоволн	189
Интерференция радиоволн	190
Электронный парамагнитный резонанс	192



ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

В руках у вас книга, редкая по теме изложенного материала и тесно связанная с 212 летней историей Казанского федерального университета. С момента его создания исчисляется история и физического демонстрационного кабинета, предназначенного для приборного обеспечения лекций по курсу физики студентам тогда еще Императорского университета.

Парк приборов в те времена был весьма скромным и малочисленным. В 20–40 годы позапрошлого столетия, когда кафедрой теоретической и экспериментальной физики заведовал Н. И. Лобачевский, оборудование для физического кабинета закупали за границей и изготавливали в созданной для этой цели механической мастерской. Потом физический кабинет не раз претерпевал разные этапы развития. В XIX столетии его приборная база значительно расширилась благодаря заботам немецких профессоров, игравших в то время важную роль в становлении и развитии, как Казанского университета в целом, так и преподавания в нем физики и астрономии.

И уже в наше время лабораторный практикум, а с ним и лекционные демонстрации последовательно обновлялись усилиями заведующих кафедрой общей физики профессоров Р. Б. Тагирова, А. В. Аганова, Д. А. Таюрского. Поэтому в распоряжении автора книги – заведующего демонстрационным кабинетом, доцента Р. В. Даминова – имелся обширный фактический материал, включающий и его собственные разработки, для ее написания.

Теперь о том, на какого читателя рассчитана эта книга. По мнению автора, она предназначена, прежде всего, преподавателям и учителям физики, а также студентам, готовящимся стать таковыми. А после дополнения ее в будущем приложением с количественными оценками демонстрируемых в опытах эффектов, она будет востребована, как методическое пособие для самостоятельной работы студентов физических специальностей. А это является настоятельной необходимостью наших дней – поиск и освоение новых и эффективных форм обучения.

М. С. Тагиров доктор физико-математических наук, лауреат государственной премии республики Татарстан, профессор, заведующий кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии Института физики Казанского федерального университета

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Среди учебных дисциплин курс физики выделяется огромным арсеналом средств наглядного обучения, большую часть которого составляют учебные эксперименты (опыты). В методических пособиях и патентах сегодня представлены десятки тысяч разнообразных технических решений учебных опытов по физике. Однако даже при углубленном изложении курса физики и при достаточном его техническом обеспечении преподавателю удастся реализовать в рамках учебной программы не более трехсот-четырёхсот опытов.

Парк опытов физического кабинета формируется усилиями нескольких поколений демонстраторов и преподавателей и зависит от множества объективных и субъективных факторов. Физические опыты в Казанском университете демонстрируются более двухсот лет, практически с момента его образования в 1804 году. Многолетняя практика использования учебного оборудования позволяет утверждать, что далеко не все сделанные по описаниям или приобретенные опытные установки эффективны в реалиях конкретного учебного процесса. Некоторые оказываются излишне сложными, у других недостаточна наглядность демонстрируемого эффекта, иные не вполне удобны в работе...

В данном пособии представлены описания опытов, часто используемых на лекциях по электромагнетизму в Казанском федеральном университете. При его написании не ставилась цель детального истолкования физики демонстрируемых явлений. Эту задачу хорошо решают учебники. Внимание было уделено описанию конструкций экспериментальных установок и технологии демонстрации публичных опытов. Последовательность изложения predetermined сложившейся традицией преподавания данного курса: электростатические эффекты в вакууме и в веществе, электрический ток в различных средах, магнитное поле и электромагнитная индукция, переменный ток и электромагнитные волны.

Эта книга написана, как руководство для демонстраторов. Полезна она преподавателям и учителям, а также студентам и аспирантам, намеревающимся преподавать физику.

ОБ ОПЫТАХ С ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ И МАГНЕТИЗМОМ

Специфика учебных демонстраций по электромагнетизму в том, что изучаемые объекты: электрические заряды, электрический ток, электрическое и магнитное поля, электромагнитные волны и пр. наблюдатели не могут воспринимать непосредственно органами чувств, как это бывает на опытах по механике или же оптике. Поэтому для визуализации изучаемых явлений в большинстве опытов приходится применять измерительные приборы и различные приспособления, в результате чего конструкции экспериментальных установок получаются несколько сложнее, чем в других разделах физики. Если же экспериментальная установка состоит из нескольких (трех или более) приборов, связанных между собой проводами, то наглядность демонстрации на такой установке становится сомнительной. Чтобы отчасти компенсировать потерю наглядности, схему опыта целесообразно пояснить соответствующим рисунком.

Демонстратор должен всегда иметь в виду, что опыты с электричеством могут быть весьма опасными, поскольку ему приходится иметь дело с неизолированными деталями установок, находящихся под напряжением в десятки и даже сотни тысяч вольт, а также с токами в десятки ампер. Учитывая же, что подобные опыты иногда надо демонстрировать в темноте и что некоторые токонесущие элементы опытных установок в силу специфики демонстраций должны быть оголены, демонстратор должен досконально знать их конструкцию, быть внимательным и всегда соблюдать осторожность в работе.

Успех демонстрационного опыта обусловлен выполнением ряда методических и технических требований: наглядности, убедительности, эффектности, воспроизводимости, скорости, надежности и прочих не менее важных условий. В отношении же последнего из перечисленных требований – надежности воспроизведения эффекта – следует заметить, что опытам по электромагнетизму, в сравнении с опытами по

другим разделам физики, свойство «капризности» присуще более всего. Так, например, некоторые опыты по электростатике, хорошо удававшиеся перед занятием, после заполнения аудитории учащимися могут не получиться из-за возросшей влажности воздуха, обуславливающей быструю утечку электрических зарядов. Поэтому поверхности электростатических приборов и приспособлений должны быть чистыми и сухими.

Также надо иметь в виду, что и излишняя сухость воздуха может привести к неудаче электростатического эксперимента: «султан» не распушается, лепесточки электроскопа становятся нечувствительными, палочки для электризации плохо электризуются... Дело в том, что способность диэлектрических тел принимать на себя избыточные электрические заряды во многом зависит от наличия на их поверхности адсорбированной из воздуха влаги, проводящей эти заряды. Поэтому недопустимо долго реагирующий на зарядание «султан», становится более чувствительным, если до зарядания его поднести ко рту и сделать на него несколько выдохов.

Порой случается, что при вращении рукоятки электрофорной машины она не вырабатывает электричество. В этом случае машине надо сообщить начальный заряд. Для этого достаточно прикоснуться к одному из вращаемых дисков машины предварительно наэлектризованной палочкой.

Успех опытов, в которых демонстрируется воздействие магнитного поля на магнитные стрелки (опыт Эрстеда, магнитная экранировка и др.) или производятся манипуляции с постоянными полосовыми магнитами (опыты Фарадея, опыт Ленца и пр.) зависит от намагниченности этих стрелок и магнитов. Поэтому следует обратить внимание на правильное хранение магнитов во избежание их размагничивания или перемагничивания.

В России принята стандартная окраска полюсов магнитов: северные полюса окрашены в синий цвет, а южные – в красный. U-образный магнит хранить надо с якорем (брусочком из магнитомягкого железа), замыкающим его полюса. Пря-

мые магниты хранят парами, замкнув якорями их разноименные полюса. Если же магниты сложены беспорядочно или же якорями замкнуты их одноименные полюса, то намагниченность магнитов быстро пропадает. Быстро размагничиваются также и магнитные стрелки. Поэтому время от времени возникает необходимость в восстановлении магнитных свойств этих предметов.

Чтобы намагнитить размагнитившуюся стрелку, ее вносят на пару секунд внутрь цилиндрической катушки, по виткам которой течет постоянный ток, и вынимают. Если же после этого намагниченность стрелки не соответствует ее окраске (на конце, окрашенном в синий цвет, образовался южный полюс, а на красном, соответственно, – северный), то действие повторяют, но стрелку при этом вставляют в катушку уже другим концом. Аналогично действуют и при намагничивании размагнитившегося прямого магнита.

Намагничивание можно осуществлять также с помощью мощного постоянного магнита относительно больших размеров. В этом случае стрелку просто лишь подносят к одному из полюсов этого магнита и затем убирают, держа ее вдоль предполагаемой линии индукции поля магнита. Сближаемые полюса (стрелки и магнита) при этом должны быть разноименными.

Успех опыта зависит от надежности электрических контактов в экспериментальной установке. Контакты могут нарушаться вследствие окисления или выгорания контактирующих поверхностей, из-за самопроизвольного откручивания резьбовых соединений, выпадения штекеров из клемм, вследствие скрытого изоляцией перелома соединительного провода и прочих причин. Нарушение же контактов в электрической цепи не всегда может быть выявлено одним лишь осмотром ее внешнего вида. Поэтому демонстратор должен взять за правило всегда проверять экспериментальные установки на их работоспособность перед демонстрацией опытов.

При проведении опытов с электромагнитными волнами метрового и дециметрового диапазонов следует принять во внимание расположение в окрестности демонстрационной установки отражающих и поглощающих эти волны металлических предметов. Таковыми могут быть корпуса приборов, металлический мебельный каркас, писчая доска, электропроводка и прочее. Их присутствие в зоне проведения опытов способно существенно исказить желаемый результат.

В арсенале физического кабинета, располагающего достаточно полной коллекцией учебных приборов, может находиться несколько различных устройств для показа одного и того же свойства изучаемого объекта. Поэтому, готовясь к занятию, преподаватель должен заблаговременно наметить предполагаемые к показу опыты, знать и учитывать особенности конструкции опытной установки, а перед демонстрацией прорепетировать свои действия с ней.

Также надо иметь в виду, что поучительность демонстрации определяется не количеством одномоментно показанных опытов, а их методическим наполнением. Сюда относятся объяснения и комментарии, сделанные по ходу демонстрации, последовательность действий с демонстрационными принадлежностями, их расположение на демонстрационном столе, подготовленность наблюдателей и их эмоциональное состояние, а также артистизм манипуляций экспериментатора и эффектность представления результата. Но эта тема находится уже за рамками содержания данной книги.

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ

Еще в VI в. до н.э. древнегреческий философ Фалес Милетский описал способность потертого о мех янтаря притягивать к себе соломинки, волосы, нитки и прочие мелкие предметы. В 1600 году английский врач Уильям Гильберт свойство натертых тел притягивать к себе легкие предметы назвал электричеством, исходя из греческого названия янтаря – «электрон», означающего «притягивающий к себе, увлекающий».

Поскольку проскакивающие между наэлектризованными телами искры выглядели, как миниатюрные молнии, то электричество в старину называли ещё и «грозовой материей». В зависимости же от того, с какими объектами были связаны наблюдаемые эффекты, различали еще электричество животное, атмосферное, серное ...

В 1729 году французский ботаник Шарль Дюфё установил, что существует всего два вида электричества, которые он назвал «смоляным электричеством» и «стеклянным электричеством». Первую теорию электричества создал в 1747 году американец Бенджамин Франклин. Электричество он рассматривал, как некую неосязаемую жидкость – «флюид». Он же ввёл понятия положительного и отрицательного зарядов. Изучение электричества перешло в категорию точной науки с открытием Шарлем Кулоном закона взаимодействия точечных зарядов.

Известно много простых опытов по электризации. Вот один из них. Нарезанную небольшими кусочками бумагу насыпают на стол. Эбонитовую палочку натирают куском кожи (при этом на эбоните образуются отрицательные заряды) и приближают к бумажкам, в результате чего часть бумажек притягивается к палочке и прилипает к ней. Затем опыт повторяют, приблизив к бумажкам потертую о сукуно стеклянную палочку (на стекле положительные заряды), наблюдаемый эффект аналогичен предыдущему. Делают вывод: электростатическое взаимодействие проявляется одинаково у зарядов разного знака.

Хорошо электризуются предметы из пластмасс, резины. Прост в исполнении, например, опыт с резиновым воздушным шариком. Надутый шарик трут об одежду или волосы, а затем приставляют его потертой стороной к стене, и шарик достаточно долго остается прикрепленным к этой стене силами электростатического взаимодействия.

В качестве неизменного атрибута многих электростатических опытов – электризуемой палочки, может быть использован

отрезок поливинилхлоридного кабель-канала, в который электрики обычно укладывают провода внутренней электропроводки.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БУМАЖНЫХ ГИЛЬЗ

Опыт демонстрирует взаимодействие тел, заряженных одноименными электрическими зарядами. Сила этого взаимодействия описывается фундаментальным законом, открытым в 1785 году французским физиком и военным инженером Шарлем Кулоном. Поэтому взаимодействие (притяжение или отталкивание) заряженных электричеством тел называют еще кулоновским.

Демонстрационный прибор состоит из двух горизонтальных металлических перекладин на стеклянных стойках, установленных на деревянном основании. С конца каждой пере-



Рис. 1. Шарль Кулон

кладины свисает пара тонких капроновых нитей, к концам которых привязано по одной гильзе – бумажной оболочке сигареты. Гильзы, при отсутствии на них избыточных зарядов, располагаются близко друг к другу, а нити, на которых они подвешены, при этом параллельны и вертикальны.

Стеклянную палочку натирают сукном и касаются ею свободно висящих гильз, которые при этом прилипают на некоторое время к палочке. Продолжительность этой стадии опыта зависит от влажности воздуха и может длиться от долей секунды до минуты. При этом часть зарядов (положительного знака) перемещается с палочки на гильзы. После того, как гильзы зарядятся, они отскакивают как от палочки, так и друг от друга так далеко, насколько им позволяют нити и собственный вес.

Палочку затем перемещают влево-вправо. Синхронно с палочкой перемещаются и гильзы, словно они скреплены с палочкой и между собой жесткой невидимой связью, что со стороны выглядит весьма забавно. Затем опыт можно повторить, наэлектризовав гильзы отрицательными зарядами от потертой о кожу эбонитовой палочки.

ЭЛЕКТРОСКОП И ЭЛЕКТРОМЕТР

Изучение свойств электрических зарядов и электрических полей, а также установление количественных соотношений между характеризующими их физическими величинами (количество зарядов, напряженность поля, потенциал и напряжение, емкость) невозможно без специальных измерительных приборов. Среди них наиболее простыми и наглядными являются электроскоп и электрометр. Конструкции этих приборов хорошо просматривается учащимися, для их работы не нужны дополнительные источники питания, у них нет органов управления и они всегда готовы к работе. Их применение в учебном процессе значимо еще и потому, что первые исследования в области электричества осуществлялись именно такими приборами.

Демонстрационный электроскоп (рис. 2) представляет собой стеклянный параллелепипед с изолирующей втулкой на верхней плоскости. Через отверстие во втулке пропущен металлический стержень, к средней части которого подвешены две легкие бумажные гильзы, а на верхний наружный конец навинчен маленький шарик.

При касании наэлектризованной палочкой верхней части стержня заряд с контактирующего участка палочки растекается

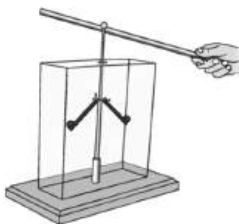


Рис. 2. Электроскоп

по стержню и гильзам. Между ними возникают силы взаимного отталкивания, приводящие к раздвиганию гильз.

По мере добавления на электроскоп новых порций заряда угол расхождения гильз соответственно увеличивается (это соответствие нелинейное). Для пополнения же заряда на электроскопе надо провести палочкой по стержню несколько раз, каждый раз поворачивая ее, чтобы снять заряды и с других участков ее поверхности. По расхождению гильз наблюдатели оценивают величину электрического заряда на электроскопе.

Другой электростатический измерительный прибор — электрометр представляет собой цилиндрический, застекленный с обеих сторон корпус, закрепленный на основании (рис. 3). Через изолирующую втулку внутри корпуса проходит металлический стержень с установленной на ней легкой металлической стрелкой. Ось стрелки расположена горизонтально и проходит немного выше ее центра тяжести, поэтому стрелка незаряженного электрометра располагается вертикально, параллельно стержню. Существуют также электрометры и без корпуса. Однако стрелка таких электрометров ввиду ее механической незащищенности может быть случайно повреждена.



Рис. 3. Электрометр

При соприкосновении заряженного тела со стержнем часть зарядов с тела перетекают на электрометр и распределяются по его стержню и стрелке. Возникающие при этом силы отталкивания между стержнем и стрелкой вызывают её поворот на угол, соответствующий величине заряда на электрометре. Нанесенная на стеклянную стенку шкала

позволяет измерить величину этого заряда посредством прикладываемой к электromетру таблицы.

При медленном поднесении заряженной палочки к электromетру легко заметить, что стрелка начинает отклоняться, когда палочка еще не касается прибора, а находится на некотором расстоянии от него. Это обусловлено явлением электростатической индукции. Чтобы это явление преждевременно не отвлекало внимание наблюдателей от основной цели опыта, палочку к электromетру надо подносить быстро.

ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

В 1663 году магдебургский бургомистр Отто фон Герике создал электрическую машину, главным элементом которой был вращаемый серный шар (рис. 4). При натирании шара ладонью машина вырабатывала электричество для воспроизведения эффектов притяжения и отталкивания тел.



Рис. 4. Отто Герике получает электричество трением о серный шар (со старинной гравюры)

При трении пары разнородных тел друг о друга на одном теле возникают избыточные положительные заряды, а на другом – в таком же количестве отрицательные заряды (явление трибоэлектричества). Для демонстрации этого эффекта используется пара дисков диаметром по 5,5 см с рукоятками. Один диск эбонитовый и оклеен сукном, а другой из плексигласа. Еще нужно два одинаковых электрометра (без кондукторов) и замыкатель – отрезок толстого провода с диэлектрической ручкой.

Диски трут друг о друга, что приводит к образованию на их трущихся поверхностях одинаковых по величине и разных по знаку электрических зарядов. Плексигласовым диском проводят по токосъемному стержню одного электрометра, а диском с сукном – по стержню второго, в результате чего электрометры заряжаются разноименными зарядами. Эту манипуляцию повторяют несколько раз до заметного отклонения стрелок электрометров.

Затем стержни электрометров соединяют проводом-замыкателем, в результате стрелки обоих электрометров опадают. Это свидетельствует о том, что заряды на электрометрах были разноименными и равными по величине. Данная демонстрация может быть использована и как экспериментальная иллюстрация закона сохранения электрического заряда – одного из фундаментальных физических законов.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ

Электростатическая индукция – это перераспределение зарядов на поверхности проводника (или поляризация диэлектрика) под действием стороннего электрического поля. В данном опыте демонстрируется зарядание электрометра в поле электризованной стеклянной палочки.

Сначала можно показать, как поднесение (без соприкосновения) электризованной палочки к кондуктору незаряженного электрометра вызывает отклонение его стрелки, причем, чем ближе палочка располагается к кондуктору, тем больше

показания электрометра. Отклонение стрелки объясняется тем, что в системе проводников, состоящей из кондуктора, стержня и стрелки, имеющиеся в них свободные электроны притягиваются к положительно заряженной стеклянной палочке. В результате на кондукторе собирается избыточный отрицательный заряд, а на нижнем конце стержня и на стрелке – избыточный положительный заряд.

При очередном поднесении палочки к электрометру пальцем свободной руки прикасаются к его кондуктору. Стрелка опускается. Отнимают от кондуктора палец, а затем удаляют палочку. Стрелка электрометра отклоняется, свидетельствуя о наличии на нем заряда (положительного).

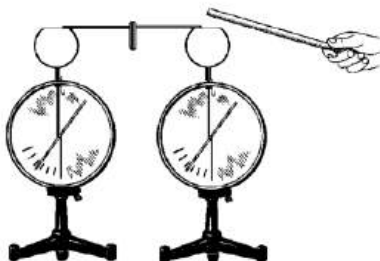


Рис. 5. Получение индуцированных зарядов

Затем показывают зарядание с помощью той же палочки одновременно двух электрометров разноименными зарядами. Для этого на стол ставят два одинаковых незаряженных электрометра, и на их кондукторы кладут перемычку – отрезок толстого провода, снабженного изолирующей рукояткой. К одному из электрометров подносят (не дотрагиваясь) заряженную стеклянную палочку, вследствие чего стрелки обоих электрометров отклоняются на одинаковый угол (рис. 5).

Взявшись свободной рукой за рукоятку, убирают перемычку, а после этого удаляют и палочку. В результате оба

электрометра оказываются заряженными, причем электрометр, располагавшийся ближе к положительно заряженной палочке, зарядился отрицательно. На удаленном же от палочки электрометре находится положительный заряд.

Величины зарядов на обоих электрометрах одинаковы. Чтобы убедиться в этом, кондукторы замыкают перемычкой, в результате чего показания обоих электрометров обнуляются.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ НА ПРОВОДНИКЕ

В проводниках свободные носители электрических зарядов могут перемещаться по всему объему этих тел. В металлических проводниках атомы, образуя кристаллическую решетку, частично теряют свои внешние электроны. Эти электроны перестают принадлежать определенным атомам и являются «собственностью» всего металлического тела. Их называют свободными электронами, так как они могут свободно перемещаться в этом теле, как внутри него, так и по его поверхности.

В незаряженном металлическом теле количество всех электронов в нем, как свободных, так и связанных атомами, равно количеству протонов в ядрах атомов тела. При удалении же части свободных электронов из тела, оно становится заряженным положительно, а при добавлении к нему избыточных электронов, оно будет заряжено отрицательно. Принято говорить, что в первом случае в теле находится избыточный положительный заряд, а во втором случае – избыточный отрицательный заряд.

Простой опыт позволяет выяснить, как распределяется избыточный электрический заряд на металлическом проводнике. На демонстрационном столе размещают два одинаковых разряженных электрометра со сферами-кондукторами и маленький металлический шарик с пластмассовой рукояткой. Для разрядки электрометра достаточно коснуться пальцами одновременно его корпуса и кондуктора. Один из электро-

метров заряжают от наэлектризованной стеклянной палочки (положительным зарядом) так, чтобы стрелка отклонилась на максимально возможный угол.

Дождавшись успокоения стрелки, берут за рукоятку шарик, вносят его в полость кондуктора заряженного электрометра и касаются им его внутренней поверхности. Затем шарик вынимают и прикасаются им к кондуктору незаряженного электрометра. Повторив эту манипуляцию еще 5–7 раз, обращают внимание учащихся на то, что показания обоих электрометров в результате остались неизменными.

После этого снова касаются шариком о кондуктор заряженного электрометра, но на этот раз дотрагиваются его наружной поверхности, а затем, как и прежде, – о кондуктор незаряженного электрометра. Бывает достаточно одного-двух повторов этого действия, чтобы заметить рост показаний ранее незаряженного электрометра и соответственное уменьшение показаний заряженного. Произошло это вследствие переноса шариком части заряда от одного электрометра на другой.

Для убедительности эксперимент можно повторить, зарядив на этот раз один из электрометров отрицательным зарядом (от эбонитовой палочки). Результат будет аналогичен прежнему. По окончании манипуляций делается вывод: избыточный электрический заряд (как положительный, так и отрицательный) располагаются на наружной поверхности металлического проводника, а внутри него избыточных зарядов нет. Объясняется это тем, что носители избыточного электрического заряды в проводнике в результате взаимного отталкивания «разбегаются» на максимально возможное удаление друг от друга, то есть на внешнюю поверхность проводника.

КОЛЕСО ФРАНКЛИНА

Из предыдущего эксперимента следует, что избыточные электрические заряды на проводнике размещаются лишь на его наружной поверхности. Если же проводящее тело имеет острые выступающие части, то заряды собираются преимущественно

на них. Возникающая при этом большая напряженность поля близ остриев способна вызвать ряд любопытных явлений. Находящийся в воздухе проводник начинает разряжаться, ионизируя его и вызывая появление «электрического ветра» – потока ионов и молекул воздуха от острия.

Явление стекания электричества с острия используется в молниеотводе – заземленном металлическом стержне, высоко поднятом над окружающими зданиями. При грозах молния «ударяет» в молниеотвод, но при этом электрический заряд, переносимый молнией, не приносит вреда, он уходит по молниеотводу в землю. На явлении стекания зарядов с остриев основано и действие ионизаторов воздуха.

В перспективных ионных двигателях, разрабатываемых для будущих межпланетных космических аппаратов, также используется ионизированный газ, разгоняемый электростатическим полем. При этом, благодаря значительной величине отношения заряда ионов к их массе, становится возможным разогнать их до скоростей более 200 км/с.



Рис. 6.
Бенджамин Франклин

Колесо Франклина – одно из ряда изобретений известного исследованиями атмосферного электричества ученого и видного государственного деятеля США Бенджамина Франклина. Его портрет изображен на стодолларовой купюре, хотя президентом штатов он не был.

Колесо состоит из восьми радиально расположенных стальных спиц, периферийные концы которых заострены и загнуты под углом 90° в одном направлении, например по ходу часовой стрелки. Для лучшей видимости к спицам прикреплены разноцветные флажки (рис. 7).

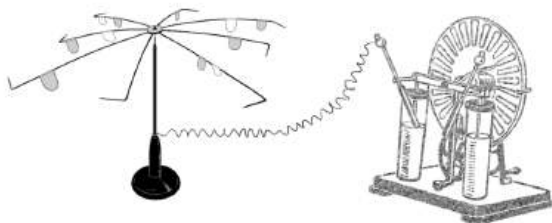


Рис. 7. Демонстрация опыта с колесом Франклина

Колесо насаживают на изолированную стойку с иглой на вершине, которую соединяют проводом с одним из выводов электрофорной машины. При электризации колеса частицы воздуха (молекулы азота, кислорода и прочие), коснувшись его, ионизируются и отбрасываются от него прочь силами электростатического взаимодействия. Этот эффект более всего выражен близ остриев, поскольку напряженность поля там наибольшая. Поток ионов от остриев колеса, в соответствии с законом сохранения импульса, вызывает появление реактивной силы, раскручивающей колесо в направлении, противоположном направлению его остриев.

Затем машину разряжают, колесо останавливают и перекидывают соединительный провод на другой вывод машины. Снова приводят машину действие, и колесо вращается в прежнем направлении.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЕТЕР

Электрический ветер (поток ионов), используемый в предыдущем опыте в качестве движителя колеса Франклина, можно и увидеть, если направить его на пламя свечи. При этом поток воздуха, увлекаемый стекающими с острия ионами, способен заметно поколебать и, при определенных условиях, затушить находящийся на его пути язычок пламени.

Используемую для хозяйственных нужд свечу предварительно надо подготовить. Она должна быть высотой 3–5 см и установлена в регулируемом по высоте подсвечнике или в штативе. Свободная часть фитиля должна быть длиной 3–4 мм, а его волокна надо распушить и две трети волокон отрезать. После этого фитиль будет тоньше, нежели обычно остающийся после тушения свечи. Это делается для того, чтобы язычок пламени получился небольшим и слабым.

Проводник с острием и свечу ставят так, чтобы острие было направлено на кончик фитиля и отстояло от него на расстоянии 3–5 мм. Проводник соединяют с одним из выводов электрофорной машины, при этом он, разумеется, должен быть электрически изолирован от своего основания (рис. 8).

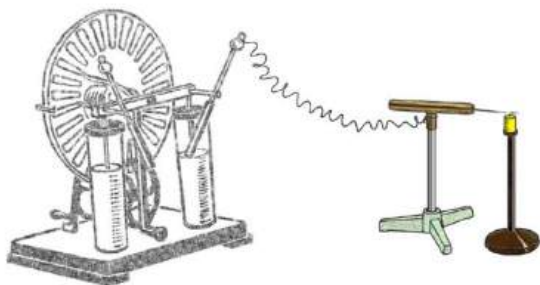


Рис. 8. Демонстрация задувания свечи электрическим ветром

Зажигают свечу, дают ей немного погореть спокойно и затем приводят в действие электрофорную машину. Язычок пламени отклоняется в сторону от острия и, поколебавшись несколько секунд, гаснет, как если бы на него подули.

Вращением рукоятки электрофорной машины подают на пластины разноименные электрические заряды. Несмотря на то, что при этом шарик пребывает в электрическом поле большой напряженности (порядка 10^6 В/м), он остается неподвижным, поскольку силовое воздействие на него не оказывается ввиду отсутствия на нем заряда.

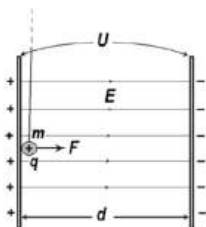


Рис. 10

Нить с шариком подводят рукой к одной из пластин с тем, чтобы шарик коснулся этой пластины, и отпускают. После этого шарик стремительно отскакивает от этой пластины и устремляется ко второй пластине. Ударившись об нее, шарик возвращается к первой пластине, затем — ко второй и далее мечется между ними. Удары шарика о пластины сопровождаются громким звоном, причем частоту

ударов можно регулировать изменением скорости вращения рукоятки электрофорной машины. Если же электрофорную машину остановить, то колебания со временем ослабевают — частота колебаний уменьшается, а сопровождающие удары звуки становятся тише. С возобновлением работы машины частота ударов возрастает, а удары становятся по-прежнему громкими.

При оценке частоты колебаний шарика можно полагать, что удерживающая его нить достаточно длинна, соударения шарика о пластины неупругие, электрическое поле в конденсаторе однородное, сопротивление воздуха пренебрежимо мало, а его диэлектрическая проницаемость равна 1.

Измеренные параметры деталей опытной установки имеют следующие значения. Расстояние между конденсаторными пластинами $d = 15$ см, диаметр шарика $D = 37$ мм, масса шарика $m = 2,4$ г.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

В опыте демонстрируют механические колебания проводящего шарика между пластинами плоского воздушного конденсатора. Шарик целлулоидный для игры в настольный теннис. В нем просверлены два маленьких диаметрально расположенных отверстия, через которые пропущена капроновая нить. На одном конце нити завязан удерживающий шарик узелок, а на другом сделана петелька. Поверхность шарика густо обмазана графитом, что делает ее электропроводящей. Для обмазки удобно использовать мягкий простой карандаш. Поскольку графит со временем стирается, то обмазку рекомендуется перед демонстрацией обновить.

Вверху высокого лабораторного штатива устанавливают горизонтально штырь, на конец которого подвешивают за петельку проводящий шарик, а в нижней части штатива крепят за рукоятку одну из пластин демонстрационного конденсатора. Вторую конденсаторную пластину устанавливают в другом штативе на расстоянии 15–20 см от первой. Эти пластины соединяют с выводами электрофорной машины. Подвешенный шарик должен располагаться в середине между пластинами (рис. 9).

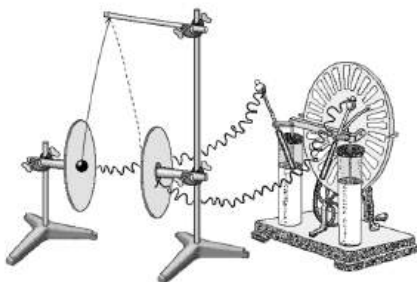


Рис. 9. Электростатический маятник

Напряжение на конденсаторных пластинах можно определить по максимальному расстоянию между ними, при котором происходит искровой пробой, которое приблизительно равно 3–4 см. С учетом того, что при нормальном давлении и влажности воздуха напряженность поля, при котором возникает его пробой, составляет приблизительно 30 кВ/см, определяется напряжение на конденсаторных пластинах: $U \approx 10^5$ В.

Воспользовавшись формулой для расчета емкости С шара, определим заряд q , которым заряжается шарик при его контакте с одной из конденсаторных пластин:

$$q = C \cdot U = 2\pi\epsilon_0 DU \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \quad (1)$$

В последующих расчетах воспользуемся приведенной на рис. 10 схемой взаимодействия шарика с полем конденсатора. На шарик с зарядом q электрическое поле напряженностью E действует с силой:

$$F = E \cdot q = \frac{U}{d} q \approx 13,3 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

Ускорение, с которым движется шарик массой m , равно:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{Uq}{md} = 55,6 \text{ м/с}^2.$$

Расстояние между пластинами шарик, двигаясь прямолинейно и равноускоренно, преодолевает за время:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}} = d \sqrt{\frac{2m}{Uq}}.$$

Тогда период колебаний равен: $T = 2t = 2d \sqrt{\frac{2m}{Uq}} = 0,147 \text{ с},$

а частота ν колебаний шарика, с учетом формулы 1, равна:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{U}{2d} \sqrt{\frac{\pi \epsilon_0 D}{m}} \approx \frac{10^3 \text{ В}}{2 \cdot 0,15 \text{ м}} \sqrt{\frac{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 0,037 \text{ м}}{2,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}} \approx 6,8 \text{ Гц}.$$

Это значение частоты колебаний шарика получено при двух существенных допущениях. Во-первых, полагалось, что воздух не оказывает сопротивления движущемуся шарiku и, во-вторых, считалось, что соударения шарика о конденсаторные пластины неупругие. Насколько же существенно влияние этих факторов на полученный результат?

Для учета силы сопротивления воздуха, обусловленного его вязкостью, следует воспользоваться известным выражением Стокса:

$$F_c = 3\pi\eta Dv,$$

где η – вязкость воздуха, равная 18 мкПа·с (при температуре 25° С), а v – средняя скорость шарика, равная приблизительно 2,3 м/с,

Вычисленное значение этой силы равно $F_c = 14 \cdot 10^{-6}$ Н, что составляет приблизительно 0,01% от силы, с которой электрическое поле действует на шарик. Соответственно, учет этой силы при расчете частоты колебаний шарика изменит ее вычисленное значение не более, чем на эти 0,01%, что в данном опыте оказывается несущественным.

Чтобы учесть упругий характер соударений шарика о конденсаторные пластины, надо провести простой опыт: расположив одну из конденсаторных пластин горизонтально и, отпустив над ней шарик без начальной скорости, проследить за тем, на какую долю начальной высоты он поднимется после отскока от пластины.

Наблюдение показало, что шарик отскакивает до высоты, приблизительно в десять раз меньшей той, с которой он был отпущен. Значит начальная скорость шарика после его отскока приблизительно в десять раз меньше его скорости перед

соударением. С учетом этого, вычисленное время движения шарика между последующими соударениями приблизительно составляет 0,072 с., а частота колебаний, соответственно, – 6,94 Гц. Следовательно, учет упругости соударений шарика о пластины конденсатора увеличивает расчетную частоту его колебаний на 2%.

ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИЯ ДЫМА

Электрическая очистка газов – один из наиболее совершенных видов их фильтрации от взвешенных частиц и аэрозолей. Этот процесс основан на ударной ионизации газа в зоне коронирующего разряда, передаче заряда ионов частицам примесей и осаждении последних на электродах.

Загрязненные газы всегда частично ионизованы из-за внешних воздействий (радиации, космического излучения, нагрева и др.), поэтому они способны проводить ток, попадая в пространство между двумя электродами. При достаточно большом напряжении на электродах ионы газа ускоряются настолько, что, сталкиваясь с нейтральными молекулами газа, ионизируют их (выбивают из них электроны), превращая в положительные ионы и свободные электроны. Вновь образовавшиеся ионы и электроны также ускоряются электрическим полем и, в свою очередь, ионизируют новые молекулы. Этот процесс называют ударной ионизацией.

Находящиеся между электродами частицы дыма, адсорбируют на своей поверхности ионы, приобретая тем самым электрический заряд. Под действием электрического поля заряженные частицы двигаются к электродам с противоположным зарядом, что приводит к образованию двух встречных аэрозольных потоков. Достигнув электродов, аэрозоли оседают на них, образуя покрывающую их пленку.

В опыте показывают процесс осаждения табачного дыма в прозрачном сосуде с электродами. Для этого нужны пятилитровая стеклянная банка с широким горлом, электрофорная машина, дымарь с направленной в него сигаретой и графопроектор – кодоскоп (рис. 11).

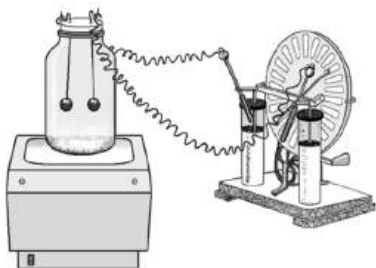


Рис. 11. Осаждение дыма в электрическом поле

Банка закрыта пенопластовой пробкой, сквозь которую пропущены две стальные спицы с металлическими шариками-электродами на концах. Банку ставят на кадровое окно графопроектора (без объектива), чтобы осветить ее снизу. Поскольку графопроектор в опыте используется лишь как осветитель, то он может быть заменен на любой другой источник направленного света, в том числе и бокового. Выводы электродов соединяют с выводами электрофорной машины.

Демонстрация начинается с зажигания сигареты в дымаре и выдувания дыма в банку. Заполненную дымом банку закрывают пробкой с установленными в ней электродами, а внимание наблюдателей обращают на то, что этот дым может находиться в банке весьма долго, если ее оставить в покое.

Выждав пару минут, запускают электрофорную машину, что приводит к появлению в банке турбулентных потоков дыма. По прошествии десяти-пятнадцати секунд работы машины полость банки становится прозрачнее, а затем дым и вовсе исчезает. Частицы дыма, разумеется, из банки не исчезли; они осели на электродах и стенках банки в виде желто-коричневой маслянистой пленки.

Успех демонстрации во многом зависит от чистоты поверхности электродов. Поэтому их, а также внутреннюю по-

верхность банки надо заблаговременно отмыть от осевшей на них пленки, если таковая осталась после предыдущей демонстрации, и высушить.

ВРАЩЕНИЕ ШАРА

В этом опыте демонстрируется работа одной из моделей электростатического двигателя, приводимого в движение си-

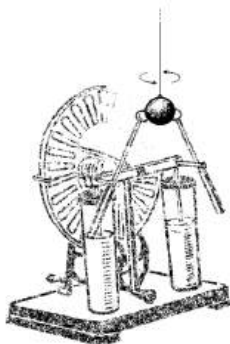


Рис. 12. Вращение шара

лой кулоновского взаимодействия между заряженными деталями демонстрационной установки. Ее конструкция проста и представляет собой пластмассовый (диэлектрический) шар диаметром 80 мм, подвешенный на тонкой капроновой нити так, что по линии своего экватора он касается выводов электрофорной машины (рис. 12). Для этого годится шар для украшения новогодней елки.

Центры шариков, которыми оканчиваются выводы электрофорной машины и центр вращаемого шара располагаются на одном уровне, причем расстояние между выводами меньше диаметра шара. Подвешен шар с помощью петельки на верхнем конце нити, накинута на горизонтально закрепленный в высоком штативе штырь. Подвеска должна обеспечивать такое положение шара, чтобы он лишь слегка касался выводов машины.

Демонстрация начинается с медленного вращения рукоятки электрофорной машины. При этом шар сначала совершает несколько малых беспорядочных движений между выводами, а затем начинает вращаться, постепенно увеличивая скорость вращения.

С прекращением работы машины прекращается и вращение шара. При возобновлении генерации зарядов машинной шар снова вращается, однако направление его вращения может быть уже иным.

Чтобы объяснить причину вращения шара и непостоянство направления этого вращения обратимся к представленному на рисунке 13 плану размещения основных деталей опытной установки. Участки поверхности шара, соприкасающиеся с выводами электрофорной машины, заряжаются от них соответствующим зарядом.

В силу различных причин эти участки располагаются не абсолютно симметрично по отношению к выводам машины. Это может быть последствием, например, толчков, которые шар получает от контактирующих с ним выводов во время вращения машины.

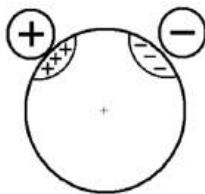


Рис. 13. К объяснению вращения шара

Незначительное различие в расстояниях между заряженными участками шара и выводами машины обуславливает соответствующее различие сил кулоновского взаимодействия между ними. Это приводит к появлению некоторого вращательного момента относительно центра шара и, соответственно, нити, на которой он висит. Поэтому шар проворачивается на некоторый угол, а затем снова соприкасается с выводами машины. Вновь образовавшиеся на шаре заряженные участки, взаимодействуя с выводами машины, добавляют шару вращательный импульс. В результате шар вращается все быстрее и быстрее.

ЛЕТАЮЩАЯ МИШУРА

Этот красивый опыт, схожий с цирковым фокусом, впервые продемонстрировал преподаватель и демонстратор Казанского педагогического университета Равиль Насыров в популярном телевизионном шоу «Минута славы» в 2007 году.

Из полосок блестящей цветной мишуры, предназначенной для украшения новогодней елки, склеена объемная легковесная фигура, например, кольцо или подобие сферы с поперечником 20–40 см. Мишура сделана из цветного лавсана с блестящим алюминиевым покрытием. Электризуют мишуру от диэлектрической палочки, в качестве которой удобно использовать отрезок жесткой поливинилхлоридной трубки длиной около 80 см (рис. 14). Такие трубки используют в электротехнике в качестве кабель-канала.

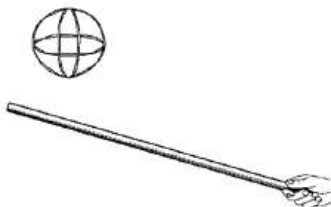


Рис. 14. Левитация электризованной мишуры

Сначала электризуют конец палочки, потерев его куском кожи. Затем, держа палочку на уровне головы, подносят к ней сверху кольцо из мишуры, удерживая его кончиками пальцев. Кольцо при этом не должно касаться палочки. Находясь в поле этой палочки, кольцо поляризуется и вытягивается под действием электростатических сил в направлении конца палочки.

Искривление и разбрызгивание струи объясняется так. Электростатическое поле палочки индуцирует в находящейся под ней струе заряд, противоположный заряду на палочке. Взаимное же притяжение палочки и ближайшего к ней участка струи и приводит к искривлению последней. Происходящий при этом распад струи на отдельные капли обусловлен также электростатическим взаимодействием между одноименно заряженными частицами воды.

Надо иметь в виду, что при демонстрации этого опыта на палочку неизбежно попадают капельки воды, которые ухудшают и, более того, способны временно нарушить способность палочки электризоваться. Поэтому данный опыт рекомендуется показывать в чередке других электростатических опытов последним. А чтобы восстановить электрические свойства палочки, ее надо после демонстрации насухо вытереть и просушить.

Эффект электростатического разбрызгивания струи можно показать еще и так. В воду погружают оголенный конец длинного провода, соединенного другим концом с одним из выводов электрофорной машины, как показано на рисунке пунктиром. Машину устанавливают на достаточном удалении от струи, чтобы на нее не попадали капли воды. Палочка же в опыте не используется.

Сначала выпускают воду без ее электризации и обращают внимание наблюдателей на характер струи, у которой лишь в самом конце видно незначительное разбрызгивание. Затем медленно раскручивают машину; струя сразу же разбивается на капли и широко разбрызгивается вследствие взаимного отталкивания одноименно заряженных капель. После разрядки машины путем соединения ее выводов, струя приобретает изначальную форму.

Кольцо отпускают, оно устремляется к палочке и получает от нее электрический заряд, который, благодаря алюминиевому покрытию кольца, быстро растекается по нему. Зарядившись, кольцо отскакивает прочь от палочки. В это мгновение надо успеть подвести палочку под кольцо, и тогда оно зависает на расстоянии 20—40 сантиметров над палочкой.

Делая затем палочкой разнообразные пассы вверх, вниз, вправо, влево, заставляют кольцо соответственно перемещаться и совершать перевороты. Во время демонстрации наэлектризованный конец палочки должен находиться над головой демонстратора. В противном случае кольцо может «прилипнуть» к наэлектризованной одежде.

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ СТРУИ

В опыте демонстрируется воздействие наэлектризованной палочки на водяную струю. Для этого собирают установку по рисунку 15, но без электрофорной машины, показанной пунктиром. Регулируя кран, получают тонкую и при этом достаточно заметную струю воды. Пока вода течет, электризуют палочку, например, стеклянную, которую, наэлектризовав, подносят к струе сверху. Струя под палочкой чуть изгибается вверх, а затем, падая вниз, распадается на отдельные брызги.

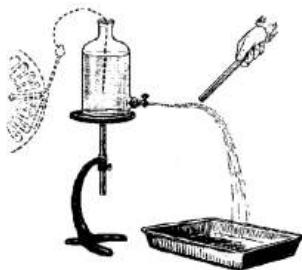


Рис. 15. Воздействие заряженной палочки на струю воды

СУЛТАНЫ

«Султан» — это множество узких полосок тонкой бумаги, один конец которых закреплен на изолированном металлическом штыре, а другой конец свободен. При зарядании султана свободные концы полосок из-за взаимного отталкивания расходятся в стороны, располагаясь вдоль силовых линий поля в окрестности султана.

В эксперименте используются два одинаковых султана, электрофорная машина, стеклянная палочка и кусок сукна для ее электризации. К каждому выводу машины подсоединяют проводом по султану. В исходном состоянии султаны должны находиться по отношению друг к другу и к электрофорной машине на расстоянии не ближе 50 см.

С началом работы машины полоски обоих султанов поднимаются и, спустя несколько секунд, располагаются радиально, образуя собой две шарообразные многолучевые звезды (рис. 16 а, 16 б). Внимание наблюдателей обращают на то, что по расположению полосок султанов можно судить о геометрии силовых линий (линий напряженности) поля точечного заряда, как положительного, так и отрицательного.

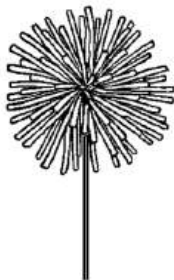


Рис. 16 а



Рис. 16 б

Далее надо наэлектризовать стеклянную палочку, потерев ее о сукно. Наэлектризованную положительным зарядом палочку подносят сверху к одному из султанов, и его торчащие вверх полоски отклоняются прочь от нее. Это свидетельствует об одноименности зарядов на султани и палочке.

Затем эту палочку подносят также сверху к другому султани. Полоски этого султана, наоборот, устремляются по направлению к палочке. Это означает, что данный султан заряжен отрицательно. Наконец султаны сближают, и тогда полоски разноименно заряженных султанов устремляются друг к другу (рис. 17 а).

После этого машину разряжают, замкнув ее выводы друг с другом; и полоски султанов опадают. Затем оба султана соединяют с каким-нибудь одним выводом машины. При ее работе на оба султана подаются уже одноименные заряды. Заново поднявшиеся султаны выглядят по-прежнему. Однако при их сближении картина расположения полосок разительно меняется из-за действия сил взаимного отталкивания. Большинство полосок изгибается, отображая искривление силовых линий в промежутке между султанами (рис. 17 б).



Рис. 17 а



Рис. 17 б

СИЛОВЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Кадровое окно графопроектора (кодоскопа) закрывают пластиной из линолеума с круглым отверстием, в которое ставят чашку Петри (невысокую плоскодонную кювету из стекла). В чашку наливают конденсаторное или трансформаторное масло и устанавливают пару цилиндрических электродов. Чтобы электроды во время демонстрации не смещались, их фиксируют с помощью специальной рамки. Электроды соединяют гибкими проводами с выводами электрофорной машины. Включают графопроектор и проецируют на экран чашку с ее содержимым.

На масло в чашке равномерно насыпают щепотку манной крупы, которая, плаывая на поверхности масла, отображается на экране в виде множества равномерно рассеянных в поле зрения маленьких черных пятен. Медленно делают несколько оборотов электрофорной машины, подавая тем самым на электроды небольшое напряжение (2–3 кВ). Образовавшееся в окрестности электродов электрическое поле поляризует крупинки, и тогда они, динамично перемещаясь, выстраиваются цепочками вдоль силовых линий поля, образуя характерную для диполя картину (рис. 18 а). Конфигурации полей, соответствующих другим электродам, представлены на рис. 18 б и рис. 18 в, причем последняя характерна для поля плоского конденсатора.

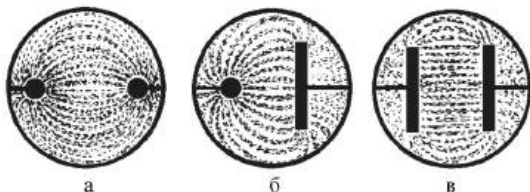


Рис. 18. Конфигурации электрических полей различных электродов

Рукоятку электрофорной машины при проведении этого опыта вращать следует медленно с тем, чтобы на электроды подавалось относительно небольшое напряжение. В противном случае картина распределения крупинок получается неустойчивой, а между электродами могут проскакивать искры, отвлекающие внимание наблюдателей.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКА

Поляризация диэлектрика – смещение связанных положительных и отрицательных зарядов диэлектрика в противоположные стороны под действием внешнего электрического поля. В результате поляризации в диэлектрическом теле образуется пара противоположно заряженных участков (полюсов), которые под действием того же поля при определенных условиях создают вращающий тело момент.

В качестве диэлектрика применен поролон, используемый для набивки мягкой мебели. Через середину поролонового бруска размером 24 см × 5 см × 4 см продернута капроновая нить, на концах которой сделаны петельки. В эти петельки продевают стержень, который закрепляют в горизонтальном положении в лапке штатива так, чтобы брусок оказался подвешенным на бифилярном подвесе. Параллельно бруску по разные от него стороны симметрично устанавливают пластины плоского конденсатора, которые соединяют с выводами электрофорной машины.

При подаче на конденсаторные пластины разноименных зарядов от электрофорной машины брусок поворачивается на 90°. Если же заряды с пластин убрать, замкнув между собой выводы машины, то брусок занимает первоначальное положение (рис. 19).

Поведение бруска можно объяснить так. В исходном состоянии брусок относительно пластин располагается не абсолютно симметрично. Эта асимметрия соответственно обуславливает асимметрию размещения на бруске индуцированных

зарядов. Взаимодействие этих зарядов с полем конденсатора приводит к образованию вращательного момента, поворачивающего брусок.

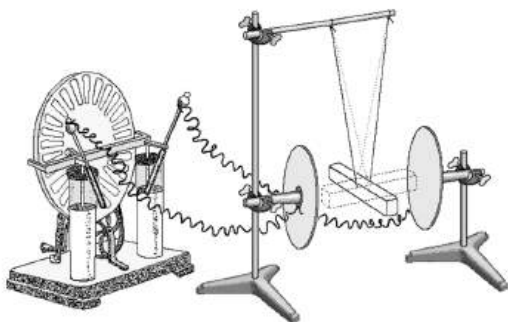


Рис. 19. Поляризация поролонового бруска

Брусок поворачивается до тех пор, пока вращательный момент кулоновских сил не уравнивается моментом сил натяжения нитей, скрутившихся в результате этого поворота. В состоянии равновесия брусок располагается параллельно заряженным конденсаторным пластинам (на рисунке показано пунктиром).

При замыкании же выводов машины поле между пластинами исчезает, и скрутившиеся нити бифилярного подвеса возвращают брусок в исходное положение.

ВРАЩЕНИЕ СТЕРЖНЕЙ

Электростатическое взаимодействие обычно демонстрируют с помощью относительно небольших и легких объектов: клочков бумаги, пенопластовых шариков, тонкой струйки воды, дыма и прочих легковесных тел. Однако можно ухит-

рителься привести в движение и значительно более массивные предметы, воздействуя на них весьма малыми силами электростатической природы.

В представленном здесь опыте используется пара стержней, а точнее бронзовый стержень постоянного прямоугольного сечения и деревянный брусок. Длина этих предметов составляет приблизительно полтора метра. На регулируемый демонстрационный столик кладут небольшую стеклянную пластинку (например, маленький кусок оконного стекла), а на нее плоско-выпуклую линзу или часовое стекло диаметром 7–10 см выпуклой стороной вниз. Совокупность такой пары стекол представляет собой простейший подшипник с достаточно малым трением.

На «подшипник» кладут один из стержней, например, металлический, и выравнивают его так, чтобы он был в равновесии и имел возможность свободно вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через центр его симметрии.

Наэлектризованную стеклянную палочку подносят сбоку к одному из концов стержня, не касаясь его. Палочка и стержень при этом должны располагаться параллельно и на расстоянии 1–3 см друг от друга (рис. 20). С приближением палочки конец стержня сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее устремляется к ней. При этом палочку медленно уводят прочь от стержня, но делают это так, чтобы расстояние между ними оставалось прежним. Как только стержень повернется на четверть оборота, палочку убирают, и стержень продолжает вращаться по инерции.

После того, как стержень повернется на два-три оборота, снова подносят к одному из его концов наэлектризованную палочку, причем подносят ее, следуя за удаляющимся концом стержня, и тем самым тормозят его. В результате скорость вращения стержня постепенно уменьшается, и он останавливается. Если теперь палочку удалять от стержня, то он, следуя за ней, раскручивается, как и прежде, но уже в направлении, противоположном начальному.

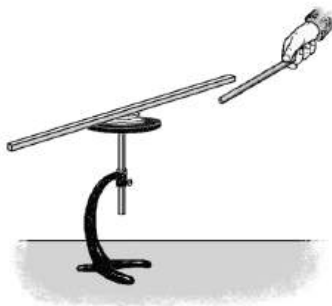


Рис. 20. Электризация стержня

Притяжение стержня, а точнее одного его конца, к заряженной (положительным зарядом) стеклянной палочке происходит вследствие образования на этом конце отрицательного заряда. Заряд этот образуется вследствие перемещения в стержне части его свободных электронов в сторону палочки под действием ее электрического поля.

Затем металлический стержень меняют на деревянный брусок и делают палочкой те же манипуляции, которые делались ранее по отношению к металлическому стержню. Как и в предыдущем случае, брусок также послушно следует за палочкой. Однако объяснение причины появления электрического заряда на деревянном бруске уже иное.

Поскольку сухая древесина – диэлектрик, то свободных зарядов, которые могли бы свободно перемещаться в ее толще, нет. Собственные заряды (заряды атомов и молекул древесины) связаны валентными связями. Эти связанные заряды под воздействием внешнего электрического поля могут лишь немного смещаться – поляризоваться, образуя при этом пару разноименно заряженных участков на противоположных сторонах диэлектрического тела.

При поднесении к концу незаряженного бруска заряженной стеклянной палочки ее поле, показанное на рис. 21 в виде окружающего ее ореола, поляризует этот брусок. При этом на ближней к палочке грани бруска индуцируется отрицательный заряд, а на противоположной дальней грани индуцированный заряд положительный.

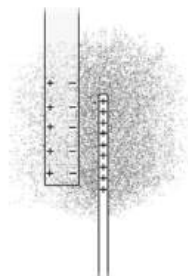


Рис. 21. К объяснению поляризации бруска

Поскольку расстояние от палочки до отрицательно заряженной грани бруска меньше, чем до его положительно заряженной грани, то, в соответствии с законом Кулона, силы притяжения бруска к палочке преобладают над силами их взаимного отталкивания. Поэтому палочка и притягивает к себе брусок, заставляя его двигаться.

Если же в опыте использовать эбонитовую палочку, заряжающуюся отрицательным зарядом, то и стержень и брусок будут притягиваться к ней так же, как к стеклянной палочке.

ПРЫГАЮЩИЕ ЧЕЛОВЕЧКИ

Этот забавный опыт был весьма популярным в кабинетах физики 19 столетия. Между горизонтально расположенными пластинами воздушного конденсатора помещают вырезанные из бумаги фигурки человечков высотой около 5 см. При

подаче на пластины высокого напряжения от электрофорной машины человечки привстают, слипаются друг с другом и забавно мечутся вверх-вниз между пластинами.

То, что бумажные человечки встают, то есть располагаются вертикально вдоль линий напряженности электрического поля, обусловлено их поляризацией, поскольку они являются диэлектрическими телами. Получив же от нижней пластины часть ее заряда, человечки перемещаются к верхней противоположно заряженной пластине и, перезарядившись от нее, устремляются вниз. Такие движения повторяются, причем не обязательно периодически.

Аналогично ведет себя проводящий шарик в описанном ранее опыте «Электростатический маятник». Метания человечков обусловлены их частичной проводимостью. Для усиления этого свойства иногда бывает полезным нанесение на бумажные фигурки штрихов простым карандашом.

Две круглые латунные пластины диаметром по 25 см устанавливают одна над другой на расстоянии 7–9 см. Нижняя пластина снабжена стеклянной рукояткой, закрепленной в треноге. Верхнюю же пластину устанавливают над нижней, закрепив ее рукоятку в лабораторном штативе. Бумажные фигурки человечков кладут на нижнюю пластину. Пластины соединяют проводами с выводами электрофорной машины. С приведением машины в действие лежащие человечки вскакивают и забавно прыгают.

Следует отметить, что этот опыт несколько «капризен» и потому требует скрупулезной настройки перед демонстрацией. Он критичен к таким параметрам установки, как горизонтальность пластин, расстояние между пластинами, вид бумаги, из которой вырезаны человечки, скорость вращения электрофорной машины, а также к влажности воздуха в аудитории.

ЭЛЕКТРЕТ

Электрет – это диэлектрик, сохраняющий свою поляризацию длительное время после снятия внешнего воздействия, вызвавшего ее. Электрет является электростатическим аналогом постоянного магнита. Термин «электрет» впервые в обиход ввёл Хевисайд в 1892 г., а изучать это явление начал японский физик Ёгути в 1919 г.

Стабильный электрет можно получить нагревом (термоэлектрет), освещением (фотоэлектрет), радиоактивным облучением (радиоэлектрет), помещением в сильное электрическое поле (электроэлектрет), в магнитное поле (магнетоэлектрет), деформацией (механоэлектрет), трением (трибоэлектрет) и иными способами. Если вещичку из пластмассы, например, ручку для письма или расческу, потереть об одежду или волосы, то она станет электретом, в чем можно убедиться по притяжению ею мелких обрывков бумаги.

Удобным объектом для получения электрета является листовая плексиглас (оргстекло). В опыте используется прямоугольная плексигласовая пластина размером 40 см × 60 см и толщиной 5 мм. Электретное свойство придают не всей пластине, а лишь ее части. Для этого на горизонтально установленную пластину плоского демонстрационного конденсатора кладут лист плексигласа так, чтобы эта пластина была полностью покрыта лишь половиной листа (рис. 22). Другая половина листа при этом опирается на подставку. Сверху лист покрывают второй конденсаторной пластиной. Выводы электрофорной машины соединяют с пластинами

Машину приводят в действие, поддерживая напряжение на пластинах в течение пяти-десяти секунд, после чего машину разряжают, а провода отсоединяют от конденсаторных пластин. Плексигласовый лист демонстрируют наблюдателям, обращая их внимание на отсутствие каких-либо видимых различий между его наэлектризованной и ненаэлектризованной частями.

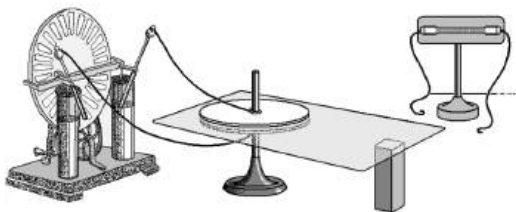


Рис. 22. Принадлежности для опыта с электретом

Затем пластины соединяют с выводами индикатора напряжения. В качестве такового используется спектральная неоновая трубка, установленная на штативе. Вместо трубки можно использовать и неоновую лампочку. Лист кладут на прежнее место, причем на пластину должна опираться его ранее наэлектризованная часть.

Взяв за изолирующую рукоятку вторую пластину, накрывают ею наэлектризованную часть листа. В момент сближения пластины с листом индикатор излучает характерный для неона оранжевый свет, что свидетельствует о протекании через него электрического тока – тока заряда конденсаторных пластин. Это свидетельствует о том, что в находящемся между пластинами плексигласе сохранилась созданная до этого поляризация, то есть он является электроэлектретом.

В момент удаления верхней пластины индикатор также светит, но в этом случае через него течет ток разряда конденсатора. Затем, быстро и часто поднимая и опуская пластину, можно сделать так, чтобы индикатор светил непрерывно. Поскольку излучаемый им свет слаб, то рекомендуется на время показа притушить в аудитории освещение.

Чтобы показать отсутствие поляризации у части листа, не побывавшей в электрическом поле, надо проделать с ней те же манипуляции, что и с наэлектризованной частью. Индикатор при этом покажет отсутствие тока.

Поляризация листа сохраняется на протяжении нескольких часов, после чего она постепенно исчезает. Такое восстановление листа обусловлено тепловым движением его молекул. Поэтому длительность релаксации листа зависит от температуры окружающей его среды.

ПЬЕЗОЭФФЕКТ

Пьезоэлектрический эффект (от греч. *piezo* – давлению) – явление поляризации диэлектрика при возникновении в нем механического напряжения (прямой пьезоэлектрический эффект). Существует и обратный пьезоэлектрический эффект – возникновение механических деформаций в теле под действием электрического поля. Прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты наблюдаются в одних и тех же кристаллах – пьезоэлектриках. Оба эффекта открыты братьями Жаком и Пьером Кюри в 1880–1881 гг.

Пьезоэлектрики используются в датчиках давления, детонаторах, источниках и приемниках звука, резонаторах высокостабильных генераторов частоты, конденсаторах и др. Чаще всего их используют в зажигалках, в которых порождающая пламя искра образуется при ударе по пьезопластинке. Передовой областью использования пьезоэлектриков является сканирующая зондовая микроскопия, где с их помощью перемещают зонд (иглу) над исследуемой поверхностью с точностью до 0,01 ангстрема.

В опыте используется шарообразный (с полостью) пьезодатчик из поликристаллического титаната бария диаметром 30 мм. Внутренняя и наружная поверхности датчика металлизированы, и к ним припаяны токоотводящие провода. Концы этих проводов соединяют с входом усилителя мощности низкой частоты. К выходу одного из каналов усиления подсоединяют маломощную лампочку накаливания, а к выходу другого – громкоговоритель. Усиление каждого из каналов подбирают заблаговременно до демонстрации опыта.

Удерживая пьезодатчик на весу за отходящие от него провода, легонько ударяют им по поверхности стола. Можно также щелкнуть по датчику ногтем. Каждое соударение сопровождается кратковременной вспышкой лампочки и громким щелчком громкоговорителя. Эффект объясняется тем, что датчик, упруго деформируясь при ударе, генерирует импульс напряжения, который, после его усиления, зажигает лампочку и возбуждает громкоговоритель.

ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ ПРОВОДНИКА

Для введения понятия электроемкости нужны два электрометра одинаковой конструкции, причем чувствительность их также должна быть одинаковой. На электрометры устанавливают сферические кондукторы: на один электрометр ставят малый кондуктор, а на другой электрометр – большой. Корпуса электрометров заземляют.

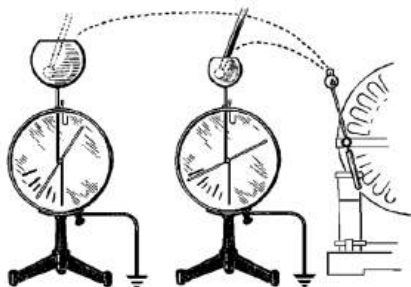


Рис. 23. Демонстрация зависимости электроемкости сферического проводника от его размера

От заряженной электрофорной машины на каждый кондуктор с помощью пробного шарика переносят одинаковые заряды (рис. 23). Делают это так. Шариком касаются сначала

вывода машины, а потом одного из кондукторов, например, малого. Затем шариком снова касаются прежнего вывода машины, а потом – большого кондуктора. Для получения ожидаемого эффекта бывает достаточно двух таких прикосновений к каждому кондуктору.

Внимание наблюдателей обращают на различие показаний электрометров. У электрометра с большим кондуктором стрелка отклоняется на меньший угол, поскольку электроемкость его кондуктора больше.

МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЙ КОНДЕНСАТОР

Вот как в одной весьма старой книге (Тит Том. Научные развлечения / М.–Л.: Изд. детской лит-ры, 1936. 368 с.) описывается изобретение конденсатора. «Первый конденсатор был невольно устроен деканом Каминского капитула в Померании фон Клейстом в 1745 г. Желая назлектризовать ртуть в стеклянной бутылки, он пропустил через пробку железный стержень до погружения его в ртуть. Затем, держа бутылку в руке, привел стержень в соприкосновение с кондуктором электрической машины. Нечаянно дотронувшись после этого другой рукой до того же кондуктора, Клейст в то же мгновение почувствовал сильное сотрясение в плече и локте.

В следующем году то же самое явление было обнаружено в Лейдене (Голландия). Профессор Мушенбрек поручил своему ассистенту Кунеусу назлектризовать воду, налитую в бутылку. Держа последнюю в одной руке, Кунеус другой рукой потянулся, чтобы удалить металлическую цепочку, соединявшую бутылку с кондуктором машины, но в этот момент почувствовал сильное мышечное сотрясение.

Лейденская банка, как назвал описываемый прибор аббат Нолле, скоро сделалась весьма популярной; всякому хотелось самому испытать электрическое сотрясение. Для быстрого удовлетворения своих посетителей Нолле предлагал им братья за руки так, что они образовывали цепь. На одном конце этой цепи становился он сам, держа в свободной руке

наэлектризованную лейденскую банку, а лицо, находившееся на другом конце, своей свободной рукой касалось проводящего стержня, пропущенного сквозь пробку банки. Так именно был произведен этот опыт в Версале в присутствии Людовика XIV и его двора. Цепь составлялась двумястами сорока гвардейцами, и каждый из них испытал мышечное содрогание, произведенное разрядом.



Рис. 24. Реконструкция опыта с лейденской банкой

Лейденская банка до такой степени вошла в моду, что ее стали готовить в форме тросточек и других вещей обихода, благодаря чему каждый получал возможность искушать терпение своих приятелей».

Демонстрация заключается в показе разобранного металlobумажного конденсатора. В корпусе этого конденсатора вырезано окно, через которое видна батарея плотно упакованных рулонов. Один из рулонов разворачивают в многослойную ленту, состоящую из пары лент алюминиевой фоль-

ги, чередующихся с парой лент промасленной бумаги. Внимание наблюдателей обращают на то, что совокупная площадь поверхности всех алюминиевых лент относительно велика, тогда как занимаемый ими объем весьма мал.

ЕМКОСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

Опыт служит экспериментальным обоснованием формулы для расчета емкости C плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами, S – перекрываемая конденсаторными пластинами площадь, d – расстояние между пластинами конденсатора.



Рис. 25

Собирают установку согласно рисунку 25. Верхняя пластина конденсатора либо удерживается за рукоятку, либо закреплена в лапке подвижного штатива, а нижняя пластина установлена на электрометре. Расстояние d между пластинами должно составлять 10–15 миллиметров. Стеклой палочкой заряжают нижнюю пластину так, чтобы стрелка электрометра отклонилась примерно до середины шкалы.

Верхнюю пластину сдвигают вбок (положение 1), не меняя ее превышение над нижней пластиной. При этом перекрываемая обеими пластинами площадь S уменьшается. Внимание наблюдателей обращают на увеличение показаний электрометра, что свидетельствует о перетекании части зарядов с нижней пластины на стрелку и стержень. Уменьшение же заряда,

находящегося на нижней пластине конденсатора, означает уменьшение его электроемкости.

После этого демонстрируют зависимость емкости конденсатора от расстояния d между пластинами. Поднимая (положение 2) и опуская верхнюю пластину, отслеживают соответствующие показания электрометра, по которым констатируют, что электроемкость совокупности этих пластин тем больше, чем меньше расстояние между ними.

Затем, при неизменном расстоянии между пластинами, вносят в промежуток между ними диэлектрическую (фторопластовую) пластину, стараясь при этом не коснуться ею нижней пластины конденсатора. По уменьшению показаний электрометра делают вывод об увеличении электроемкости пластин при внесении между ними диэлектрика.

КОНДЕНСАТОР ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Объяснив устройство демонстрационного конденсатора переменной емкости, его подсоединяют к электрометру в соответствии с рисунком 26. Подставка под конденсатором должна быть, разумеется, диэлектрической. В исходном состоянии подвижные пластины (ротор) конденсатора должны быть выведены из неподвижных пластин (статор). Емкость конденсатора при этом минимальна.

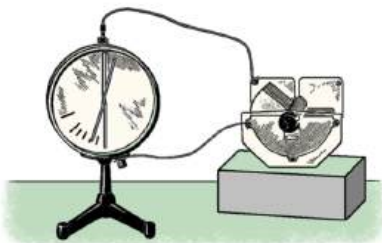


Рис. 26. Демонстрация с конденсатором переменной емкости

Заряженную электрофорную машину подносят к электрометру и, коснувшись одним из ее выводов стержня электрометра, передают ему и роторным пластинам некоторый электрический заряд. В результате стрелка электрометра должна отклониться от равновесного положения на максимально возможный угол.

Медленно проворачивая ротор, вводят его между пластинами статора. Поворот сопровождается уменьшением показаний электрометра. При полностью введенном роторе, что соответствует максимальному значению электроемкости конденсатора, показания электрометра становятся минимальными. Затем, медленно выводя ротор из статора, демонстрируют соответствующее возрастание показаний электрометра, свидетельствующее об уменьшении электроемкости конденсатора.

ЭНЕРГИЯ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

Этот эффектный опыт демонстрирует высвобождение накопленной в конденсаторе электрической энергии при коротком замыкании его выводов. Если заряд в конденсаторе достаточно велик, а сопротивление замыкающего проводника незначительно, то разряд конденсатора сопровождается резким оглушительным шумом.

В опыте используется смонтированное на тележке устройство, большую часть которого занимает конденсаторная батарея емкостью 2000 мкФ. Зарядку батареи осуществляют от двух фаз сети переменного тока напряжением 380 В через выпрямитель-удвоитель.

На рисунке 27 представлена электрическая схема демонстрационной установки. Устройство включают в специальную розетку сети электропитания. Для зарядки батареи на приборной панели устройства нажимают красную кнопку и удерживают ее в нажатом состоянии в течение нескольких секунд. При этом напряжение на выводах батареи достигает

1100 В. Несложно подсчитать, что при этом в конденсаторе заключена электрическая энергия в количестве более 1000 Дж.

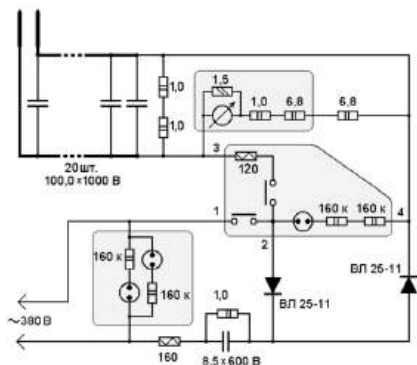


Рис. 27. Электрическая схема устройства для демонстрации импульсного разряда конденсатора

По завершении зарядки кнопку отпускают, а штепсель вынимают из розетки. Для получения импульсного разряда берут замыкатель (металлический стержень с электрически изолированной рукояткой) и замыкают им концы двух стержней (выводы батареи). Момент касания сопровождается ярко-голубой вспышкой и кратковременным оглушительным звуком, оставляющим у наблюдателей сильное эмоциональное впечатление.

Для получения разряда меньшей мощности батарею заряжают соответственно до меньшего напряжения. Если по каким-либо причинам разряд батареи замыкателем не был осуществлен, то спустя некоторое время она разрядится самопроизвольно через резистор в цепи управления.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ КАБЕЛЬ

Это наглядное пособие представляет собой отрезок закладываемого в грунт высоковольтного трехфазного кабеля, применяемого для электроснабжения жилых домов, производственных цехов и пр. Оба конца кабельного отрезка обработаны так, чтобы учащиеся увидели все детали его конструкции, ознакомились с применением проводников и диэлектриков в средствах передачи электрической энергии.

Кабель состоит из трех толстых алюминиевых шин сечением около 400 мм^2 каждая, изолированных друг от друга несколькими слоями промасленной бумаги. Эти шины заключены внутри алюминиевой оболочки, покрытой ПВХ изоляцией. Шины предназначены для передачи трехфазной переменного ЭДС, а оболочка – нулевого потенциала.

ПОТЕНЦИАЛ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Потенциал однородного проводника при отсутствии в нем электрического тока одинаков во всех его точках. Если же по проводнику ток течет, то потенциал проводника изменяется вдоль напряженности электрического поля в нем. Данный опыт призван продемонстрировать падение потенциала вдоль длинного проводника при протекании в нем постоянного тока.

В качестве проводника электрических зарядов в опыте используется деревянная рейка длиной 190 см и сечением 3 см × 3 см. К концам рейки прикреплены жесткие металлические петли. Кроме того, по всей длине рейки, на одной ее стороне, установлено 17 пар индикаторных полосок, вырезанных из папиросной бумаги. Полоски эти навешены на вбитые в рейку канцелярские скобы. Каждая пара полосок выполняет функцию отдельного электроскопа, индицирующего электрический потенциал рейки в точке его крепления.

Древесина в данном опыте используется как проводящий материал. Она, действительно, является проводником с большим удельным сопротивлением ввиду наличия в ней

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ЛАМП

В опыте демонстрируется зависимость яркости свечения ламп накаливания от способа их включения в сеть электропитания. Установка состоит из двух одинаковых ламп накаливания, ввинченных в патроны на подставках, и соединительных проводов для коммутации выводов ламп. Лампы рассчитаны на включение в сеть электропитания напряжением 220 Вольт. Желательно, чтобы номинальная мощность ламп была достаточно большой (100–500 Вт), хотя это не принципиально.

Сначала собирают электрическую цепь из параллельно соединенных ламп (рис. 29) и включают ее в сеть электропитания. Внимание наблюдателей обращают на то, что лампы при этом светят одинаково ярко. Мощность, рассеиваемая каждой лампой, соответствует номинальному значению, обозначенному на ее корпусе.

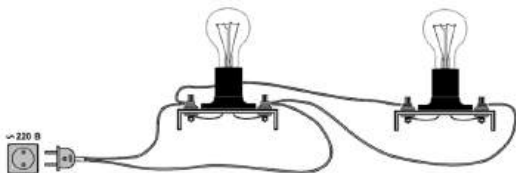


Рис. 29. Параллельное соединение ламп

Затем установку отсоединяют от сети и соединяют лампы между собой последовательно (рис. 30). Вновь образованную цепь включают в сеть питания; лампы при этом светят значительно тусклее, нежели в первом случае.

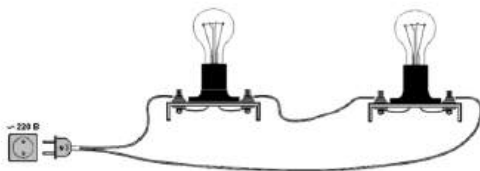


Рис. 30. Последовательное соединение ламп

Используя закон Ома и закон Джоуля-Ленца можно подсчитать, что тепловая мощность, рассеиваемая лампами при их последовательном соединении, приблизительно в четыре раз меньше мощности, рассеиваемой теми же лампами, соединенными параллельно.

В отношении же яркости свечения ламп соответствующие количественные оценки здесь дать затруднительно ввиду проявления ряда объективных и субъективных факторов, а именно, нелинейной зависимости излучения лампы от силы тока в ней и особенностей яркостной и спектральной чувствительностей человеческого глаза.



Рис. 31. Георг Ом

ДЖОУЛЕВО ТЕПЛО

Джоулево тепло – это количество теплоты, выделяемой в металлическом проводнике при протекании по нему электрического тока. Выделяемая при этом тепловая мощность равна произведению квадрата силы тока в проводнике на его сопротивление. В опыте демонстрируется зависимость выделяемой в проводнике тепловой мощности от его сопротивления.

Опытная установка (рис. 32) представляет собой деревянную раму с множеством соединенных друг с другом провод-

ников двух видов: медных и нихромовых. Проводники выполнены в виде цилиндрических спиралей одинаковых размеров из оголенных проводов одинакового сечения. Все спирали соединены в единую цепь последовательно и поочередно: медная – нихромовая – медная – нихромовая – ... Концы электрической цепи заведены на штепсель для подключения к розетке электросети 220 В.

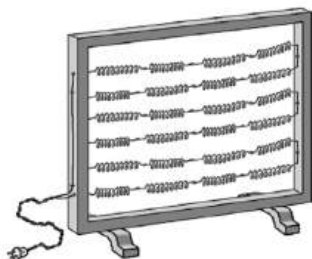


Рис. 32. Установка для демонстрации джоулевого тепла

Для демонстрации опыта достаточно подать электропитание на установку и выключить освещение в аудитории. Через пять-семь секунд нихромовые спирали раскаляются докрасна; находящиеся же в промежутках между ними медные спирали в темноте не видны.

Для усиления эффектности результатов опыта перед включением установки рекомендуется навесить на некоторые разнородные спирали бумажные полоски. Полоски на нихромовых спиралях в ходе опыта загораются, а полоски на медных спиралях остаются целыми до конца демонстрации.

При пояснении результата опыта надо отметить, что, поскольку спирали соединены последовательно, то сила тока в них одинакова. Поэтому тепло, выделяемое в одинаковых размерах спиралей, зависит лишь от их сопротивления.

Поскольку сопротивление нихромовых спиралей много больше сопротивления спиралей из меди, то и тепловая мощность, выделяемая в нихромовых спиралях, соответственно больше мощности, выделяемой в медных спиралях.

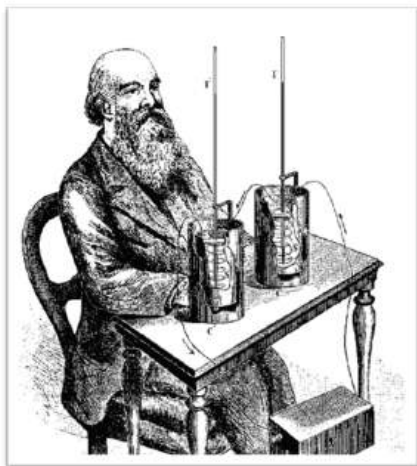


Рис. 33. Джеймс Джоуль (со старинной гравюры)

ПЛАВКИЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬ

Предохранитель – это элемент для защиты электрического прибора или электрической цепи от аварийного режима, возникающего при протекании через них недопустимо большого тока, например, тока короткого замыкания.

Работа плавкого предохранителя основана на свойствах «плавкой перемычки». Электрическое сопротивление пере-

мычки достаточно мало, поэтому в нормальных условиях она играет роль обычного проводника. При превышении силы тока в цепи номинального значения, на которое рассчитана перемычка, количество выделяемого в ней джоулевого тепла растет. Это приводит к увеличению сопротивления перемычки и, соответственно, к дополнительному её разогреву. Процесс развивается лавинообразно и приводит к расплавлению и последующему разрушению перемычки. В результате защищаемая электрическая цепь, в соответствии с известным принципом «рвется там, где тонко», разрывается и обесточивается.

Чем больше величина силы тока в цепи, тем быстрее плавится перемычка. Это свойство позволяет использовать плавкие предохранители для надежной защиты цепей даже от токов короткого замыкания, которые зачастую являются причиной пожаров. Несмотря на то, что плавкие предохранители известны и применяются почти полторы сотни лет, некоторые их характеристики и поныне остаются непревзойденными другими системами защиты электрических цепей.

Демонстрационная установка представляет собой смонтированную на диэлектрической панели электрическую цепь, которая содержит установленную в патрон лампу накаливания номинальной мощностью 150–200 Вт, толстые оголенные провода из меди и, собственно, сам предохранитель (рис. 34). Последний представляет собой вырезанную из тонкой алюминиевой фольги полоску шириной 4–5 мм и длиной около 5 см. Концы этой полоски зажаты в металлических зажимах.

Установку подключают к розетке электросети напряжением 220 вольт, в результате чего лампа ярко светит. В руку берут замыкатель – металлический стержень, снабженный рукояткой из изоляционного материала, и кладут его на соединенные с патроном провода, сделав тем самым короткое замыкание в цепи.

В момент замыкания стержнем токонесущих проводов в месте расположения полоски-предохранителя возникает яркая

бело-голубая вспышка с разлетающимися в разные стороны светящимися брызгами, а лампа гаснет. Спустя мгновение оказывается, что полоска исчезла, а на ее месте остается легкое дымное облачко.

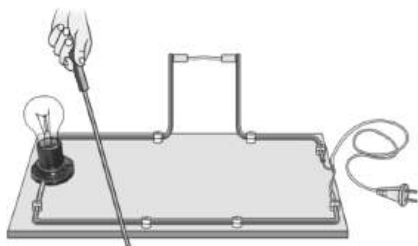


Рис. 34. Установка для демонстрации работы предохранителя

В результате перегорания полоски-предохранителя цепь оказывается разомкнутой и обесточенной, причем все остальные ее элементы остаются исправными и готовыми к последующей работе.

Во время демонстрации этого опыта надо быть очень внимательным и осторожным и аккуратно выполнять надлежащие меры безопасности. Во-первых, надо иметь в виду, что провода в установке оголены и после срабатывания (перегорания) предохранителя пребывают под напряжением. Поэтому касаться руками включенной в сеть установки следует с учетом этого обстоятельства.

Во-вторых, в момент перегорания предохранителя от него во все стороны разлетаются искры и раскаленные брызги металла. Поэтому для безопасности проведения опыта следует надеть защитные очки или маску.

ЗАДУВАНИЕ ЛАМПОЧКИ

Этот забавный опыт основан на зависимости величины электрического сопротивления металлического проводника от его температуры. Зависимость эта линейная. Поэтому, если такой проводник подключить к источнику постоянной ЭДС, то сила тока, протекающего через проводник, будет тем больше, чем меньше его температура.



Рис. 35. Установка «Задувание лампочки»

Демонстрационная установка (рис. 35) представляет собой цепь из двух последовательно соединенных ламп, питаемых от регулируемого источника постоянной или переменной ЭДС 8–15 вольт. В качестве такового можно использовать регулируемый источник постоянного напряжения или лабораторный автотрансформатор. Одна из этих ламп представляет собой миниатюрную лампочку накаливания, использовавшуюся до эры светодиодов в карманных фонариках и рассчитанную на номинальное напряжение 2,5 В. Вторая лампа – также лампа накаливания; она рассчитана на включение в промышленно-бытовую электросеть напряжением 220 В и имеет номинальную мощность 100 Вт. Следует упомянуть, что конструкция современных ламп накаливания – одна из множества коммерчески успешных разработок известного американского изобретателя Томаса Эдисона.

У более мощной лампы аккуратно удален стеклянный баллон, поэтому ее спираль открыта и доступна. Обе лампы вкручены в патроны, смонтированные на панели демонстрационной установки. Чтобы предотвратить случайную порчу хрупкой спирали вскрытой лампы во время хранения или при транспортировке прибора, предусмотрен съемный защитный колпак (стеклянная банка). Для наглядности на передней панели установки изображена ее электрическая схема.

При подаче на установку электропитания напряжением 6–10 В маленькая лампочка должна светить тускло. Спираль мощной лампы при этом не светит, так как напряжение на ней много меньше номинального для этой лампы значения 220 В. Однако, поскольку по этой спирали ток, хоть и незначительный, но все же течет, то она разогрета.

С расстояния 30–40 см дуют на установку. Это приводит к тому, что маленькая лампочка при обдувании установки светит заметно ярче. С прекращением обдувания ее свечение вновь становится тусклым.



Рис. 36. Томас Эдисон

Объяснение эффекта следующее. Оголенная спираль при ее обдувании остывает. Уменьшение же температуры спирали приводит к соответствующему уменьшению ее электрического сопротивления, что, в соответствии с законом Ома, обуславливает увеличение силы тока в цепи. Возрастание же тока в цепи приводит по закону Джоуля-Ленца к увеличению рассеиваемой в ней тепловой мощности. На относительно мощной оголенной спирали это увеличение сказывается незначительно, а вот на малой, слаботочной лампочке – существенно, что приводит к увеличению яркости ее свечения.

Затем можно продемонстрировать обратный эффект – снижение яркости свечения лампочки вследствие нагрева оголенной спирали. Для этого на источнике устанавливают такое выходное напряжение, при котором лампочка светит достаточно ярко. Затем под спираль большой лампы подводят язычок пламени горячей спички или зажигалки. Спираль от пламени нагревается, ее сопротивление возрастает, ток в цепи уменьшается, и маленькая лампочка светит заметно тусклее.

ТЕРМОПАРА

В 1821 г. немецкий физик Томас Зеебек открыл явление, названное впоследствии его именем, заключающееся в том,



Рис. 37. Томас Зеебек

что в замкнутой цепи, состоящей из разных проводниковых материалов, появляется ЭДС (так называемая термо ЭДС), если места контакта этих материалов находятся при разных температурах. В простейшем виде, когда электрическая цепь состоит из двух различных проводников, она носит название термоэлемента, или термопары.

Сущность эффекта Зеебека заключается в том, что средняя энергия свободных электронов в проводнике зависит от его температуры. Поэтому, если вдоль проводника имеется перепад температур, то на его горячем конце свободные электроны имеют большие средние энергии и средние скорости по сравнению с его холодным концом, что обуславливает поток электронов в проводнике от его горячего конца к холодному.

В результате на холодном конце проводника образуется отрицательный электрический заряд, а на горячем – положительный заряд. Так как у проводников из разных материалов

эти заряды различны, то при соединении двух из них в пару появляется разностная термо ЭДС, величина которой зависит как от разности температур между нагретым и холодным контактами, так и от материала проводников.

Термопары являются самыми высокотемпературными (особенно, пара вольфрам–рений) контактными датчиками температуры, и незаменимы, например, в металлургии при контроле температуры расплавленных металлов. Преимущества термопар: высокая точность измерений (до $\pm 0,01^\circ\text{C}$), большой температурный диапазон (от -200°C до $+2500^\circ\text{C}$), простота, дешевизна, надежность эксплуатации.

Для показа явления генерации термо ЭДС собирают установку согласно рисунку 38. Пока температура всех элементов электрической цепи одинакова, стрелка вольтметра находится на нулевом делении шкалы. При поднесении пламени горячей спички или зажигалки под контакт термопары стрелка вольтметра заметно отклоняется, показывая наличие электродвижущей силы на выводах термопары.



Рис. 38. Демонстрация генерации термо ЭДС

Охлаждение контакта термопары также вызывает появление на ее концах электродвижущей силы. Для демонстрации удобно воспользоваться жидким азотом. При поливании контакта азотом из термоса стрелка вольтметра отклоняется в направлении, противоположном предыдущему, что свидетельствует об изменении полярности генерируемой ЭДС.

ТЕРМОСТОЛБИК

Для получения относительно больших значений термо ЭДС используют системы из множества соединенных в батарею термопар – термобатарей. В качестве примера такой термобатарей демонстрируют термостолбик.

Прибор представляет собой батарею из 50 последовательно соединенных константан-нихромовых термоэлементов, установленных в пластмассовую оправу. Одни спаи термопар не нагреваются. Они залиты парафином и закрыты створками щели, а другие, открытые для теплового облучения, покрыты тонким слоем копоти. Для повышения эффективности работы термостолбика на него надета съёмная коническая насадка.

Для демонстрации опыта соединяют выводы термостолбика с гальванометрическими клеммами демонстрационного вольтметра. При отсутствии перед термостолбиком источника теплового излучения показания вольтметра нулевые. При поднесении же к термостолбику включенной лампы накаливания вольтметр регистрирует появление ЭДС (рис. 39).



Рис. 39. Демонстрация работы термостолбика

ТЕРМОЭДС В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Носителями свободных зарядов в полупроводниках являются электроны и дырки, причем их концентрация быстро увеличивается с повышением температуры. Если разные участки полупроводникового образца пребывают при различных температурах, то заряды из более нагретой области, где их концентрация велика, перемещаются в область меньшей концентрации – в холодные части образца. Поэтому в полупроводниках с дырочным механизмом проводимости теплый конец окажется заряженным отрицательно, а холодный – положительно; в полупроводниках же с электронной проводимостью – наоборот.

В массивный латунный брусок (рис. 40) впаяна толстая прямоугольная пластина германия. Брусок соединен проводом с одной из клемм демонстрационного вольтметра, а его вторая клемма соединена со стальным стержнем. С одной стороны стержень оканчивается плоским косым срезом, а с другой – рукояткой.

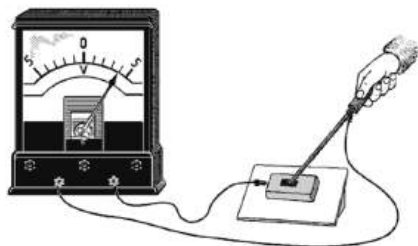


Рис. 40. Демонстрация термотока в полупроводнике

Сначала демонстрируют отсутствие тока в цепи при отсутствии температурного градиента в полупроводнике. Для этого конец стержня прижимают к германиевой пластине, за-

мыкая тем самым электрическую цепь. Стрелка измерительного прибора при этом постоит на нулевом делении.

Затем конец стержня нагревают в пламени спиртовки или таблетки сухого горючего. Можно воспользоваться и предварительно разогретой электроплиткой. Однако нагрев стержня на ней требует большего времени. Нагретый стержень, как и прежде, прижимают к германиевой пластине, что вызывает отклонение стрелки вольтметра. Появление тока в цепи обусловлено генерацией свободных зарядов в нагретом стержневом участке полупроводниковой пластины и последующим растекании этих зарядов к ее более холодным периферийным участкам, контактирующим с латунным бруском.

СОЛНЕЧНАЯ БАТАРЕЯ

Термином «солнечная батарея» принято называть полупроводниковое устройство для преобразования световой энергии солнечного излучения в энергию постоянного электрического тока. Батарея состоит из нескольких соединенных меж собой солнечных элементов, действие которых основано на явлении внутреннего фотоэффекта. Количество элементов в батарее может достигать нескольких сотен тысяч, занимая площадь в тысячи квадратных метров и генерируя мощность до мегаватта.

Мощность солнечного излучения на земной орбите составляет 1350 Вт/м^2 . В то же время ее значение в Европе днём в очень облачную погоду может быть менее 100 Вт/м^2 . С помощью наиболее распространённых солнечных батарей можно преобразовать эту энергию в электричество с эффективностью 10–24%. Достоинства солнечных батарей заключены в их простоте и надёжности, малой массе и миниатюрности, экологичности и долговечности.

Наибольшее применение получили конструкции элементов с *p-n* переходами и гетеропереходами, представляющие собой плоскую (базовую) полупроводниковую пластину с тонким слоем полупроводника, имеющего тип проводимости,

противоположный типу проводимости базовой области. При облучении светом в полупроводнике генерируются дополнительные свободные заряды, перемещающиеся под действием электрического поля перехода, что приводит к образованию на внешних выводах элемента электродвижущей силы (фото ЭДС).

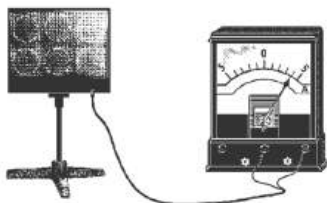


Рис. 41. Демонстрация действия солнечной батареи

Демонстрация опыта с солнечной батареей весьма проста. Выходные контакты установленной на штативе солнечной батареи соединяют с входом демонстрационного амперметра (рис. 41). При освещении панели солнечной батареи любым источником белого света стрелка амперметра показывает протекание в цепи электрического тока. При изменении освещенности панели соответственно изменяется и показание амперметра. Изменять же освещенность можно, перекрывая световой поток, падающий на панель батареи, либо поворотом самой панели. Хранить батарею рекомендуется в светонепроницаемом чехле.

ОБРАЗЦЫ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ

Чистые и легированные различными примесями монокристаллы кремния и германия широко используются в полупроводниковой электронике. Однако видеть в повседневной действительности и, тем более, держать в руках образцы этих

веществ доводится редко. Целью данной демонстрации является показ большеразмерных образцов чистых монокристаллов названных элементов.

Внешне эти образцы очень похожи друг на друга. Обоим свойственна темно-серая окраска, причем скол имеет черный металлический блеск. Эти вещества хрупки, как стекло, достаточно тверды, но при этом легко шлифуются и полируются. Получают их обычно методом безтигельной зонной плавки с вытягиванием монокристалла из расплава.

Помимо электроники эти вещества широко используются еще и в инфракрасной оптике, поскольку они прозрачны в области длин волн 1–9 мкм (Si) и 8–14 мкм (Ge).

НАГРЕВАНИЕ ДИОДА

Одно из предназначений полупроводниковых диодов – выпрямление переменного тока. Когда к диоду приложено напряжение в прямом направлении, ток через него течет, поскольку сопротивление диода при этом незначительно.

Если же к диоду приложено обратное напряжение, то его сопротивление становится очень большим, а, значит, текущий через него электрический ток – очень малым. Поскольку ток этот течет в обратном направлении, то его называют обратным током. Хотя существование обратного тока в выпрямительных схемах является эффектом вредным, но, ввиду малости его величины в номинальных диапазонах температур и токовых нагрузок, допустимо приемлемым.

Иначе обстоит дело, когда диод эксплуатируется при предельно высокой температуре. В этом случае в полупроводниковом кристалле диода многократно возрастает концентрация неосновных носителей: дырок в n области и электронов в p области, что приводит к фактическому исчезновению в кристалле p - n перехода.

В опыте (рис. 42) демонстрируют осциллограмму выпрямленного диодом переменного напряжения частотой 50 Гц промышленно-бытовой электросети. Демонстрацию осуществляют

в двух температурных режимах: номинальном и за пределами высоко. Установка состоит из осциллографа и подключенного к нему планшета с диодом. Диод на планшете установлен между зажимами, что позволяет оперативно заменить его в случае перегорания. Ток на диод подают через делитель напряжения, смонтированный на тыльной стороне планшета.

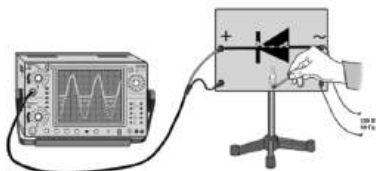


Рис. 42. Демонстрация выпрямления переменного тока

Перед демонстрацией установку настраивают. Планшет подключают к розетке электросети, а выпрямленное напряжение от него подают на осциллограф. Осциллограф настраивают на такой режим усиления и развертки, чтобы изображение на его экране было статичным и отображало входной сигнал на протяжении двух-трех периодов.

Сначала отображают осциллограмму выпрямленного напряжения, имеющей вид верхней половины гармоник. Затем зажигают спичку и медленно подводят ее пламя под диод, отслеживая по экрану трансформацию осциллограммы. Пламя не должно касаться диода во избежание его порчи.

Вследствие нагрева диод утрачивает выпрямительные свойства. Это обусловлено тем, что концентрация неосновных носителей электрических зарядов в его полупроводниковом кристалле с ростом температуры многократно увеличивается, и он становится попросту проводником. На экране осциллографа этот процесс сопровождается плавной трансформацией осциллограммы напряжения на выходе выпрямителя от ее начальной формы до гармонической.

При отведении пламени в сторону диод постепенно остывает, соответственно и выпрямляющее свойство его p - n перехода восстанавливается. Осциллограмма при этом принимает исходную форму половины гармоники, характерной для работы однополупериодного выпрямителя.

В течение опыта нагревание диода рекомендуется повторить. Для динамичности же его демонстрации целесообразно использовать диод небольших размеров (2–3 мм).

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКАЯ ДИССОЦИАЦИЯ

Электролитическая диссоциация – это распад молекул вещества на ионы при его растворении. Явление характеризуется степенью диссоциации – величиной, показывающей, какая часть молекул подверглась этому распаду, и которая зависит от температуры, концентрации раствора и диэлектрической проницаемости растворителя.

В стакан с дистиллированной водой погружают пару медных пластинчатых электродов, установленных в пластмассовую панель – крышку стакана. Электроды соединяют последовательно с лампой накаливания и включают в цепь переменного тока 220 В. Поскольку дистиллированная вода неэлектропроводна, то лампа не светит. Чтобы убедиться в том, что на электроды подано напряжение, их замыкают отрезком провода с ручкой из диэлектрика – лампа загорается.

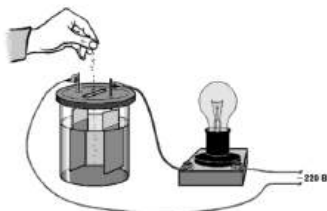


Рис. 43. Демонстрация электролитической диссоциации

Затем в стакан насыпают щепотку поваренной соли (рис. 43), и через пару секунд лампа начинает светить. Яркость свечения ее спирали нарастает плавно ввиду постепенности растворения соли. Стеклопалочкой размешивают воду – лампа светит ярко.

Появление электрического тока в цепи свидетельствует об образовании в стакане электролита, характеризующегося появлением в воде свободных зарядов – носителей электрического тока, а именно, положительных ионов натрия и отрицательных ионов хлора.

Однако не все растворимые вещества диссоциируют. Чтобы убедиться в этом, вышеописанные манипуляции повторяют, насыпая в дистиллированную воду, вместо поваренной соли, сахарный песок (1–2 чайных ложки). Лампа при этом не светит, поскольку электрический ток через раствор сахара не течет, хотя напряжение на погруженные в него электроды подано. В этом удостоверяются замыканием электродов отрезком провода.

«ОТЛИВАНИЕ» ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Для наблюдателя, не знакомого с секретом этого опыта, результат его демонстрации представляется весьма необычным, хотя явление, на котором он основан, широко известно и часто используется.

К ручке алюминиевого чайника с водой прикреплен конец отрезка монтажного провода, а к столовой ложке из нержавеющей стали – конец другой проволоки. Свободные концы проволок соединены с входными клеммами демонстрационного амперметра. Для удобства крепления провода к ложке в ее ручке просверлено небольшое отверстие. Ложку опускают в большой стеклянный стакан. Стрелка амперметра покоится на нулевом делении его шкалы.

Взяв чайник в руку, поливают вытекающей из его носика струей ложку (рис. 44). Амперметр при этом показывает наличие в проводах электрического тока. Вытекание преры-

вают, и ток в цепи не течет. Истечение воды из чайника возобновляют, электрический ток возобновляется. Поднимая и опуская чайник, а также изменяя его наклон, регулируют параметры струи: ее длину, сечение и скорость с которой она падает на ложку, расход воды.

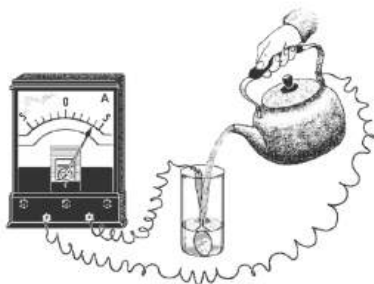


Рис. 44. «Отливание» электричества из чайника

Все эти манипуляции со струей сопровождаются соответствующими изменениями показаний амперметра. Возникает интрига, предполагающая необходимость объяснения результатов опыта и прежде всего дать ответ на вопрос: «Почему истечение воды из чайника вызывает появление электрического тока?»

Объяснение показанному явлению простое. Демонстрационная установка являет собой химический источник тока с электродами в виде ложки и чайника и электролитом в виде подсоленной воды. Важно, чтобы электроды были изготовлены из разных металлов. ЭДС такого источника вырабатывается за счет энергии окислительно-восстановительных реакций указанных реагентов и в данном случае равна приблизительно 0,6 В. Отсутствие же электрического тока при прерывании струи обусловлено тем, что электрическая цепь при этом разомкнута.

По завершении демонстрации соленую воду следует слить в пластиковую бутылку, в которой она может храниться годами, а чайник, стакан и ложку надо ополоснуть водопроводной водой.

ЭЛЕКТРОЛИЗ В МЕДНОМ КУПОРОСЕ

Электролиз – процесс выделения на электродах составных частей электролита при протекании по нему постоянного тока. Электролиз лежит в основе промышленного производства алюминия, хлора, едкого натра... Путем электролиза воды производят водород и кислород. Электролиз применяют при обработке металлов и для создания на них антикоррозионных и декоративных покрытий из никеля, хрома, золота и др., при очистке сточных вод, для извлечения металлов из руд, а также в ряде других технологических циклов.

В данном опыте демонстрируют выделение меди на одном из графитовых электродов, погруженных в ярко-синий раствор сернокислой меди (медный купорос), при протекании через раствор постоянного тока. Сначала наблюдателям демонстрируют электроды – пару черных стержней, установленных в крышке электролитической ванны. Ванной является стеклянный химический стакан емкостью до одного литра. В стакан наливают раствор медного купороса, а затем в него погружают электроды. К выводам электродов подцепляют выводы источника постоянного тока, имеющего выходное напряжение 10–12 В и выдерживающего ток нагрузки до 5 А (рис. 45).

Через электролит пропускают ток в течение 20–30 секунд. Выключив затем источник тока, отсоединяют провода от электродов, вынимают их из стакана и показывают наблюдателям. На электроде, который был соединен с отрицательным полюсом источника, будет хорошо виден налет меди характерного розово-оранжевого цвета.

Чтобы очистить электрод от покрывающего его слоя меди для последующего использования необходимо потереть его абразивной «шкуркой» до восстановления первоначального черного цвета.

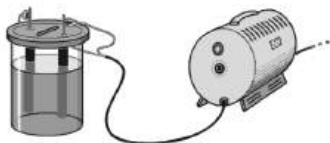
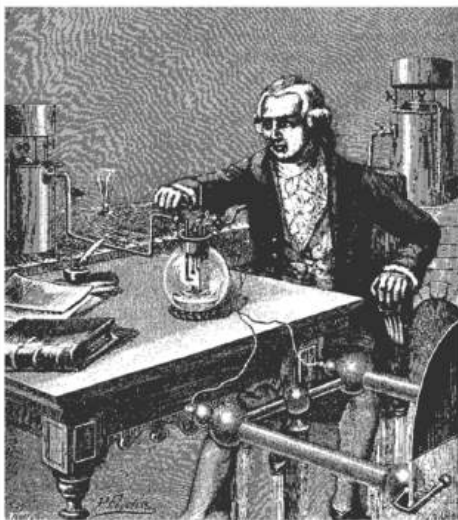


Рис. 45. Демонстрация электролиза медного купороса



Аппарат, получающий возду путём пропускания электрического тока из смеси водорода и кислорода. Названные газы применяются для возбуждения приборов, называемых телеметрами. Соединя эти приборы с проводами и кабелями отъ заблуждения.

Рис. 46. Со старинной гравюры

РАЗРЯД ЭЛЕКТРОСКОПА ПЛАМЕНЕМ

Опыт наглядно показывает условия протекания так называемого «тихого разряда» — начальной стадии несамостоятельного газового разряда. Он происходит в газе с давлением порядка атмосферного при непрерывном действии внешнего ионизатора и небольшой напряженности электрического поля.

Электрометр, снабженный сферическим кондуктором, заряжают от палочки или от электрофорной машины, а затем выжидают около минуты, давая возможность стрелке успокоиться, а зрителям убедиться, что при отсутствии какого-либо воздействия на электрометр его показания стабильно неизменны.

В удалении от электрометра, на расстоянии более одного метра от него зажигают спичку, а затем ее медленно подносят к кондуктору заряженного электрометра (рис. 47). По мере приближения спички стрелка электрометра падает; при сближении же до расстояния 15–20 см электрометр разряжается полностью. Опыт целесообразно повторить, изменив порядок поднесения зажженной спички к электрометру, например, сделав кратковременную остановку или отдалив ее от электрометра после его частичной разрядки.

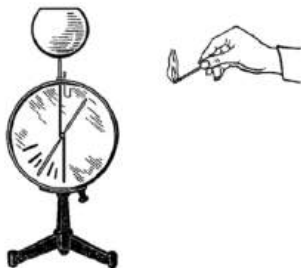


Рис. 47. Демонстрация тихого разряда

Пламя спички (плазма) здесь является ионизатором, представляющим свободные электрические заряды (ионы), образующиеся при горении спички. Этими зарядами и обеспечивается ток от электрометра к окружающим его телам.

Вместо спичек в опыте можно использовать свечу или же карманную зажигалку.

ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Электрическая дуга – разновидность самостоятельного разряда, в котором разрядные явления сосредоточены в узком ярко светящемся плазменном шнуре. При горизонтальном расположении электродов этот шнур под действием восходящего потока нагретого разрядом газа принимает форму дуги.

Электрическая дуга впервые наблюдалась в 1802 году русским ученым В. В. Петровым. Также её называют и вольтовой дугой в честь Алессандро Вольты, изобретшего «вольт-столб» – источник тока, благодаря которому электрическая дуга стала использоваться в качестве яркого источника света. Такая дуга является разновидностью четвёртой формы состояния вещества – плазмы, которая состоит из ионизированного газа. Присутствие в плазменном шнуре дугового разряда свободных электрических зарядов обеспечивает его хорошую проводимость.

Начало широкого применения электрической дуги связано с изобретением в 1876 году П. Н. Яблочковым угольной дуговой лампы, состоящей из двух вертикально установленных угольных электродов, разделённых гипсом, названной «свечой Яблочкова». На верхнем конце свечи закреплена перемычка из тонкой проволоки или угольной пасты. При подключении свечи к источнику тока, предохранительная проволока на конце сгорала, поджигая дугу. Дуга горела, постепенно съедая электроды и разделительный гипсовый слой.

При отключении от источника, свеча гасла, и её нельзя было запустить снова, так как никакого контакта между электродами уже не было. Необходимо было заменить свечу

новой. Преимуществом конструкции было отсутствие необходимости в механизме, поддерживающем между электродами нужное для горения дуги расстояние. Электродов хватало примерно на 2 часа. Впервые свеча была продемонстрирована в качестве уличного и театрального осветителей на Всемирной выставке в Париже в 1878 году.



Рис. 48. Василий Петров



Рис. 49. Алессандро Вольта

Дуговой разряд происходит в любом газе при давлениях порядка атмосферного и более. Температура плазмы в дуге, «горящей» в атмосферном воздухе при силе тока в несколько ампер, составляет около 5000 К, а при обдувании плазменного шнура мощным потоком газа, может достичь 50 000 К.

Электрическая дуга применяется в металлургии для получения чистых и тугоплавких металлов, в современных уличных фонарях. Особенно широко она используется в электросварке металлов. Технология электросварки была изобретена в России в 1881 году Н. Н. Бенардосом. В некоторых областях техники, например, в устройствах разрыва электрических цепей, с возникающим в них дуговым разрядом приходится бороться.

Показывать это свечение следует не дольше 5–7 секунд, поскольку в нем присутствует мощный поток ультрафиолетового излучения, неблагоприятно действующего на глаза. Поэтому после зажигания дуги демонстратору следует заслонить свои глаза ладонью. Также надо помнить, что токонесущие детали прибора оголены и потому случайные прикосновения к ним могут вызвать поражение электрическим током.

Чтобы детально рассмотреть структуру и конфигурацию плазменного шнура надо надеть на механизм привода электродов светонепроницаемый металличе-



*Рис. 52. Фотография
дугового разряда*

с кожух с боковым окном напротив рабочих концов электродов. Увеличенное и динамичное изображение дуги (рис. 52) просцируют на большой настенный экран с помощью линзы (объектива) и оборотной призмы.

Весьма эффектна электрическая дуга в воде. Стабильный дуговой разряд в воде (в том числе и в морской воде) возможен лишь при наличии специального оборудо-

вания, обеспечивающего надежную электроизоляцию и устойчивость газового пузыря в окрестности плазмы. Последнее достигается тем, что электроды для подводной сварки имеют оболочку, которая из-за охлаждения ее водой плавится позже находящегося под ней токопроводящего стержня. В результате на конце электрода образуется своеобразный козырек, удерживающий газовый пузырь в месте сварки.

Поскольку применяемые в предыдущих опытах угольные электроды не приспособлены для работы в водной среде, то получить с их помощью стабильно горящую в воде дугу невозможно. Однако начальную ее стадию с ярким свечением воспроизвести несложно.

Демонстрируют дуговой разряд с помощью прибора, основной частью которого является установленный на шасси червячный механизм перемещения электродов (рис. 51). Ток на угольные электроды подают от промышленно-бытовой сети переменного тока (220 В, 50 Гц) через реостат сопротивлением порядка 15–30 Ом.



Рис. 50. Почтовая марка к юбилею изобретения электросварки

Для зажигания дуги вращением рукоятки червячного механизма электроды сближают до соприкосновения. В момент соприкосновения электродов цепь замыкается, и по ней течет ток, вызывающий разогрев места контакта электродов и появление в

этом месте ослепительно яркого бело-голубого свечения. Через пару секунд электроды разогреваются достаточно сильно, и их плавно разводят в стороны. Самостоятельный разряд обеспечивается благодаря высокой температуре плазменного шнура. Оптимальное удаление между концами электродов составляет полтора-два сантиметра. Горение плазмы сопровождается характерным гулом и шипением.

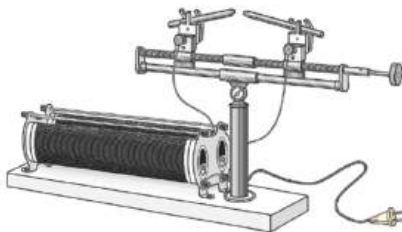


Рис. 51. Прибор для демонстрации дугового разряда

В электроизолированной лапке лабораторного штатива зажимают угольный электрод длиной 25–30 см, наклонив вниз его рабочий конец. Второй такой же электрод крепят аналогично в другом штативе. К верхним концам электродов крепят токонесущие провода, подключаемые через реостат сопротивлением 15–30 Ом к сети переменного тока 220 В. Рабочие концы электродов погружают в прозрачную прямоугольную кювету с водой, взятой из водопровода.

Перемещая один из штативов, касаются установленным в нем электродом конца другого электрода. В месте контакта возникает яркое свечение, прекращающееся через пару секунд. Для продолжительной же демонстрации надо постоянно слегка шевелить перемещаемый штатив, обеспечивая тем самым трение концов электродов друг о друга. В результате, благодаря шероховатости и пористости электродов, достигаются условия, необходимые для зажигания дуги.

ИСКРОВОЙ РАЗРЯД

Искровой разряд возникает при давлениях порядка атмосферного, когда мощность питающего источника недостаточна для поддержания стационарного разряда. Образование искры объясняется стримерной теорией пробоя газов, согласно которой из электронных лавин в разрядном промежутке сначала образуются стримеры – тонкие тускло светящиеся нитевидные каналы, содержащие ионы газа и отщепленные от них свободные электроны. Происходящее затем превращение стримеров в искровые каналы сопровождается быстрым увеличением силы тока и количества выделяющейся в них энергии.

Каждый канал быстро расширяется, в нем скачкообразно повышается давление, в результате чего на его границах возникает ударная волна. Совокупность ударных волн от расширяющихся искровых каналов порождает характерный треск.

С помощью электрической искры инициируют взрывы и горение, например в цилиндрах автомобильных двигателей, измеряют высокие напряжения, осуществляют высокоточную обработку металлов...

Искру можно показать на электрофорной машине. При работе машины между ее электродами периодически «проскакивает» ярко-голубая искра, сопровождаемая характерным треском. Эту искру можно интерпретировать, как модель грозовой молнии, а треск, соответственно, как модель грома.

Значительно большую и, соответственно, более зрелищную искру получают с помощью изобретенной в 1851 году Генрихом Румкорфом индукционной катушки – повыша-



Рис. 53. Генрих Румкорф

ющим трансформаторе с незамкнутым сердечником. Над улучшением качества индукционной катушки работали многие ученые. Первоначально катушка давала короткие искры, но благодаря Физо, присоединившему к ней конденсатор, и Фуко, разработавшему прерыватель, она получила окончательную форму и название «катушка Румкорфа». Эта катушка сохранилась в неизменности до наших дней, это важный электро-

технический прибор, с помощью которого были сделаны крупные открытия и изобретения, в том числе промышленная трансформация электрических токов, рентгеновское излучение, генерирование радиоволн.

Катушка состоит из двух цилиндрических коаксиальных обмоток с железным стержнем внутри. На первичную обмотку напряжение подают от сети переменного тока напряжением 220 В через электролитический прерыватель. Электролитом является 50% раствор ортофосфорной кислоты. К расположенным поверх катушки выводам вторичной обмотки перед демонстрацией прикрепляют пару токопроводящих стоек, на которые надевают электроды – разрядник. Расстояние между концами электродов должно составлять приблизительно 20–25 см.

При включении установки ток в цепи первичной обмотки разогревает электролит настолько, что он вскипает. Образовавшийся при этом пузырек пара ненадолго размыкает эту цепь, после всплытия же пузырька цепь замыкается снова. Кратковременное прерывание тока в первичной обмотке катушки трансформируется ею в высоковольтный импульс во вторичной обмотке, который поступает на электроды разрядника. Высокое же напряжение на разряднике обуславливает настолько большую напряженность поля в нем, что между концами его электродов возникает электрический пробой в виде характерного для искрового разряда динамично меняющегося фиолетово-голубого шнура (рис. 54).

Известно, что при нормальном атмосферном давлении и влажности электрический пробой воздуха происходит при достижении в нем величины напряженности поля приблизительно 30 кВ/см. Следовательно, напряжение между выводами катушки Румкорфа составляет $30 \text{ кВ/см} \times 25 \text{ см} \approx 750 \text{ кВ}$.

Мощность искры существенно возрастает при подсоединении к разряднику высоковольтного конденсатора и уменьшении расстояния между электродами разрядника до 3–5 см (рис. 55). Тогда в те промежутки времени, когда разряд прерывается, то есть ток между электродами не течет, этот конденсатор заряжается, а при пробое разряжается, способствуя тем самым значительному возрастанию силы тока между электродами. Процесс сопровождается повышенной яркостью свечения плазмы в искровом промежутке, сопутствующий же разряду треск становится оглушительным.

Так как напряжение на выводах трансформатора Румкорфа может достигать до миллиона вольт, то подключаемый к нему конденсатор должен выдерживать столь большую разность потенциалов. Этот конденсатор представляет собой многослойный пакет из 11 прямоугольных пластин 500 мм × 700 мм, вырезанных из листового стекла толщиной 10 мм. Обкладками же конденсатора служат вложенные между стеклами листы

алюминиевой фольги размером 350 мм × 550 мм. Электроемкость такого конденсатора составляет около 6 нФ.

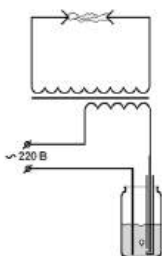


Рис. 54. Схема включения катушки Румкорфа

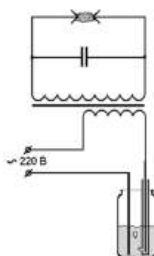


Рис. 55. Схема получения сильноточной искры

Для большей эффектности демонстрации с катушкой Румкорфа следует проводить в затемненном помещении. Однако полностью освещение выключать не надо, поскольку оно нужно для визуального контроля установки, находящейся под опасно большим напряжением. Этим обстоятельством диктуется и требование производить любые манипуляции с токонесущими деталями установки лишь после ее обесточивания до «видимого разрыва» с розеткой сети электропитания.

СКОЛЬЗЯЩИЙ РАЗРЯД

Среди разновидностей искрового разряда выделяют так называемый скользящий разряд. Он возникает вдоль поверхности раздела газа и твердого диэлектрика, помещенного между электродами. Области скользящего разряда, в которых преобладают заряды какого-либо одного знака, индуцируют на поверхности диэлектрика заряды другого знака, вследствие чего искровые каналы стелются по поверхности диэлектрика.

Пластинку толстого оконного стекла 30 см × 40 см, зажатую в лапке штатива, ставят на столешницу в вертикальном положении. По обе стороны пластины ставят электроды на изолированных стойках. Электроды соединяют с выводами катушки Румкорфа, включенной согласно схеме на рис. 56.

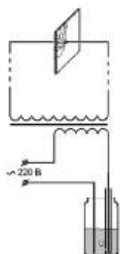


Рис. 56. Схема демонстрации скользящего разряда

Выводы катушки должны быть разведены для исключения разряда между ними. При подаче электропитания возникает искровой разряд, причем искровые каналы как бы стелются и скользят по обе стороны стеклянной пластины, огибая ее через края.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Электрическая схема установки для получения этого разряда та же, что и для искрового разряда (рис. 53). Отличие же в том, что расстояние между кончиками электродов должно составлять 3–5 см. При включении установки между электродами зажигается дуговой разряд. Плазма дуги выглядит, как пламя голубовато-фиолетового оттенка. Под действием восходящего потока нагретого воздуха она имеет форму дуги. Свечение сопровождается характерным шипением и потрескиванием.

Этот разряд выглядит значительно эффектнее, если электродам разрядника придать форму вертикально расположенных расходящихся «усиков» (рис. 57). Устанавливают электроды в изолированных стойках, располагаемых на демонстрационном столе. Напряжение на разрядник подают по высоковольтным проводам от выводов катушки Румкорфа, предварительно раздвинув их кончики на расстояние 30–40 см, чтобы исключить разряд между ними.

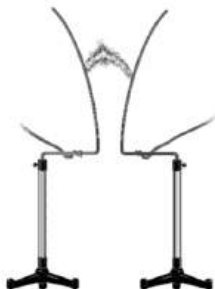


Рис. 57. Высоковольтный дуговой разряд

Изначально дуга возникает в нижней части разрядника, то есть там, где расстояние между электродами минимально. Конвективным потоком воздуха свечение перемещается вверх. Но, так как по мере подъема межэлектродное расстояние возрастает, то соответственно увеличивается и объем плазмы.

Достигнув определённой высоты, дуга самопроизвольно разрывается и сразу же возобновляется в нижней части разрядника, снова взлетает вверх, снова обрывается, возобновляется и так далее, пока замкнута цепь электропитания установки.

их витков подобраны так, чтобы плазменные шнуры кистевого разряда на электроде были максимальной длины для данной емкости конденсатора 3.

Разрядник 4 представляет собой пару медных шин, разделенных воздушным промежутком 2,5 см. Он помещен в светонепроницаемый корпус, чтобы световое излучение от него не мешало наблюдению кистевого разряда. Наконечники выводов катушки Румкорфа перед демонстрацией должны быть разведены в противоположные стороны для исключения разряда между ними.

При подаче электропитания на катушку Румкорфа 2 на ее выводах синхронно с работой прерывателя 1 появляются импульсы высокого напряжения, которые периодически заряжают конденсатор 3. При достижении напряжения на обкладках конденсатора напряжения пробоя разрядника 4 (около 70 кВ), разрядник срабатывает, и цепь, состоящая из этого конденсатора и катушки 5, замыкается, образуя колебательный контур. Выводы вторичной обмотки катушки Румкорфа при этом замыкаются, и тем самым устраняется ее влияние на работу образовавшегося колебательного контура.

Так как электроемкость и индуктивность этого контура невелики, то возникающие в нем собственные электромагнитные колебания высокочастотные. Эти колебания затем трансформируются в колебания высокого напряжения в катушке 6. При соответствии частоты колебаний длине обмотки катушки 6 в ней образуется мощная стоячая электромагнитная волна, пучность напряженности которой приходится на ее верхний конец.

Большая напряженность поля в окрестности электрода 7 ионизирует окружающий его воздух, обеспечивая стекание в него электрических зарядов с электрода в виде снопа ветвящихся фиолетовых искр длиной до 50 см, постоянно меняющих свою конфигурацию.

Разряд сопровождается характерным для искрового разряда треском. Поднесенная же к электроду длинная люминес-

КИСТЕВОЙ РАЗРЯД

При кистевом разряде пучок (кисть) множества искр в виде достаточно длинных ломанных светящихся шнуров расходится от одного электрода, не достигая второго электрода. Эта особенность позволяет рассматривать кистевой разряд, как коронный разряд с резко выраженными прерывистыми эффектами.

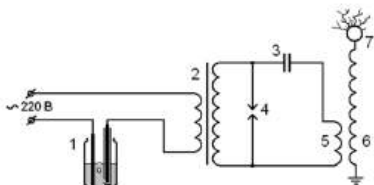


Рис. 58. Схема установки для демонстрации кистевого разряда

На рисунке 58 представлена электрическая схема установки, которая состоит из электролитического прерывателя 1, катушки Румкорфа 2, самодельного высоковольтного конденсатора 3, разрядника 4 и резонансного трансформатора Тесла. Этот трансформатор выполнен в виде двух соосно расположенных цилиндрических катушек 5 и 6.

Катушка 5, являющаяся первичной обмоткой трансформатора Тесла, содержит 5,5 витка медной трубки, намотанной с разрежением в 2 см на пластмассовом цилиндрическом каркасе диаметром 50 см и высотой 20 см. Катушка 6 (вторичная обмотка трансформатора) содержит 1700 витков провода, намотанного в один слой на стекляннй трубе диаметром 7 см и высотой 120 см. Для исключения межвиткового пробоя эта обмотка покрыта эпоксидной смолой.

Верхний конец катушки 6 заведен на электрод 7, выполненный в виде полированной сферы, а ее нижний конец заземлен. Положения трансформаторных катушек и количества

центная лампа (дневного света) светит под действием пронизывающего ее потока электромагнитного излучения, сопровождающего разряд.

ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД

Тлеющий разряд – один из видов стационарного самостоятельного электрического разряда в газах. Формируется, при низком давлении газа и относительно малом токе. При увеличении же силы тока в разрядном промежутке трансформируется в дуговой разряд.

Тлеющий разряд получил своё название из-за наличия на катоде тонкого слоя, так называемого тлеющего свечения. Это свечение обусловлено большим падением потенциала в

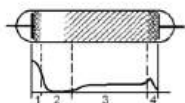


Рис. 59. Распределение напряжённости поля в тлеющем разряде

слое объёмного заряда вблизи катода (рис. 59). Вблизи анода также имеется тонкий слой объёмного заряда. Остальная часть межэлектродного промежутка занята квазинейтральной плазмой. 1 – катодный слой; 2 – катодное тёмное пространство; 3 – положительный столб; 4 – анодный слой.

Для демонстрации используется стеклянная трубка с электродами. Воздух из нее откачивают вакуумным насосом (рис. 60). Опыт демонстрируют в темноте. При атмосферном давлении газ в трубке не светится, так как приложенное к нему напряжение недостаточно для его электрического пробоя.

Через несколько секунд работы насоса, когда давление в трубке достаточно снизится, в ней вспыхивает свечение розово-фиолетового цвета. В этом состоянии газовый столб хорошо проводит электричество. С понижением давления положительный столб распадается на отдельные светящиеся слои – страты. Тёмные промежутки между стратами – это участки, в которых свободные электроны плазмы разряда

разгоняются межэлектродным электрическим полем. Длина этих промежутков равна средней длине свободного пробега электронов при данном давлении.

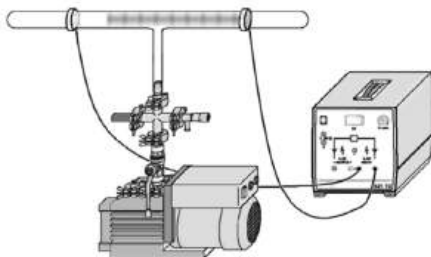


Рис. 60. Демонстрация тлеющего разряда

Причинами ионизации газа в тлеющем разряде является электронная эмиссия с катода под действием электрического поля, последующая ионизация молекул газа ударами свободных электронов, вырванными с катода и летящих по направлению к аноду, а также вторичная электронная эмиссия с катода вследствие бомбардировки катода положительными ионами газа.

Представленная на рис. 61 последовательность изображений тлеющего разряда в трубке соответствует изменению давления в ней от 7 мбар (вверху) до 0,06 мбар (внизу) при напряжении между катодом (слева) и анодом (справа) 1 кВ.

Трубки с тлеющим разрядом применяют в качестве источников света – газоразрядных люминесцентных ламп, в которых разряд происходит в парах ртути. Газоразрядные трубки используют также в декоративных целях. Тогда им придают очертания букв или узнаваемых силуэтов и наполняют газом с красивым цветом свечения (неоном, дающим оранжево-красное свечение, или аргоном с синевато-зелёным свечени-

ем). Важное применение тлеющий разряд получил в квантовых источниках света – газовых лазерах.

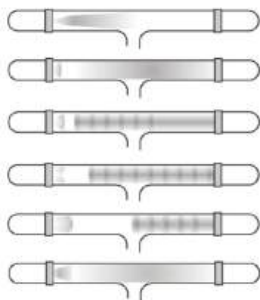


Рис. 61. Трансформация вида тлеющего разряда в трубке

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ТРУБКИ

Плазма газового разряда обычно предстает взорам наблюдателей в виде светящихся газовых тел различной конфигурации. Ее вид зависит от множества факторов: давления газа, его химического состава, напряженности приложенного к нему электрического поля, частоты изменения этого поля, силы и плотности протекающего в газе тока, геометрии электродов, формы и размеров газосодержащего сосуда, наличия магнитного поля (постоянного или переменного), вида и производительности ионизатора и еще от ряда иных, как изученных, так и пока еще неизвестных аргументов и обстоятельств.

Данный опыт призван показать, как химический состав газовой среды определяет цвет и яркость свечения образованной в ней плазмы. Для этого используется набор спектральных трубок, каждая из которых содержит определенный газ:

неон, водород, пары ртути, ... Трубка герметична; на ее торцах расположены сферические выводы электродов (рис. 62).



Рис. 62

При подаче на электроды высокого напряжения (от сотен вольт до 10 киловольт) в трубке возникает свечение – самостоятельный тлеющий разряд. Окраска образовавшейся в трубке плазмы определяется ее химическим составом: оранжево-красная у неона, зеленовато-голубая у паров ртути и т. д.

Эти трубки предназначены для наблюдения спектров излучения заключенных в них газов. Однако, показать эти спектры на экране в большой аудитории зачастую не удастся из-за малости излучаемого трубкой светового потока. Поэтому опыт со спектральными трубками обычно сводится лишь к демонстрации цвета их свечения.

Для этого используется панель, в которой установлено несколько разных трубок. Панель снабжена переключателем, которым можно последовательно подключать к высоковольтному (до 5 кВ) источнику, например, «Разряд-1» ту или иную трубку. Демонстрацию следует осуществлять в затемненной аудитории.

ФАКЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД

Открытый в 1928 году С. И. Зилитенкевичем высокочастотный факельный разряд является весьма редким проявлением электрического тока в газах. Первоначально этот разряд изучали с целью его подавления в радиотехнических цепях радиолокационных станций, как явления паразитного.

Факельный разряд имеет вид яркого бело-голубого столбика, похожего на пламя свечи или же на восходящее пламя газовой горелки. Этот одноэлектродный разряд образуется в

тех участках катушки колебательного контура, на которые приходится пучность колебаний напряжения.

Температура плазмы разряда зависит от состава газовой смеси и от ее давления. В воздухе при нормальных условиях она достигает 3000 К. Особенностью факельного разряда является то, что возникает он при мощности рассеяния свыше 2 кВт и частоте колебаний свыше 10 МГц.

Основой генератора (рис. 63) является колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности L2, воздушно-го высоковольтного конденсатора C3 переменной емкости и генераторного электровакуумного триода. Емкость конденсатора регулируется в пределах 30–90 пФ.

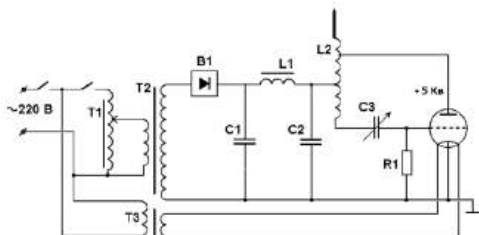


Рис. 63. Схема факельного генератора

Существенное значение для генерации имеет геометрия катушки L2. В данной установке она выполнена в виде цилиндрической спирали диаметром 6 см и высотой 20 см из медной шины толщиной 8 мм и содержит 18 витков с отводом от 5 витка. На конце катушки установлен вертикально стержень-антенна длиной 150 мм с заостренным концом, с которого происходит излучение электромагнитных волн.

Мощный генераторный электровакуумный триод типа ГУ-5Б, осуществляющий подкачку электрической энергии в колебательный контур, снабжен собственным радиатором

воздушного охлаждения. Учитывая же, что продолжительность демонстрации не превышает одной-двух минут, принудительный обдув триода не предусмотрен.

Закачка энергии в контур происходит от блока питания, состоящего из автотрансформатора Т1 типа ЛАТР-1М, анодного и накаливающего трансформаторов Т2 и Т3, высоковольтного выпрямителя В1 и сглаживающего фильтра С1-С2-Л1.

Поскольку разряд самопроизвольно не возникает, то для его инициации прикасаются к концу излучающего стержня металлическим прутом, держа его за диэлектрическую рукоятку. Когда пруток отводят в сторону, в месте его контакта со стержнем сначала возникает высокочастотный дуговой разряд, который затем перерождается в ярко светящийся бело-голубой факел (рис. 64).

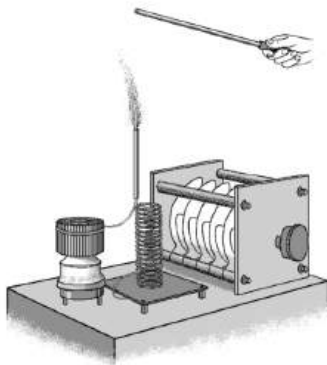


Рис. 64. Демонстрация факельного разряда

Высоту этого факела можно регулировать с помощью конденсатора С1 или автотрансформатора Т1. В первом случае при изменении емкости конденсатора изменяется частота

колебаний в контуре, а возникающая в нем стоячая волна попадает на излучатель либо своей пучностью, и тогда высота факела наибольшая, либо узлом, и тогда факел гаснет. Вращением же рукоятки автотрансформатора Т1 регулируется подаваемое на анод триода высокое напряжение и тем самым изменяется рассеиваемая при разряде мощность.

В факеле можно разглядеть разные его зоны: ярко-белое пятно на кончике излучателя, также белый шнуровидный канал и голубое пламя. Вертикальная направленность пламени обусловлена конвективным потоком нагретого им воздуха. Пламя постоянно колыхается из-за турбулентностей. Его можно затушить, подув на него.

БЕЗЭЛЕКТРОДНЫЙ РАЗРЯД

Опыт демонстрирует свечение газа в стеклянном сосуде при ионизации его потоком высокочастотного электромагнитного излучения. Источником излучения служит факельный генератор. В опыте используются стеклянные трубки, одна из которых заполнена неоном, а другая – гелием, а также люминесцентная газоразрядная лампа с парами ртути внутри.

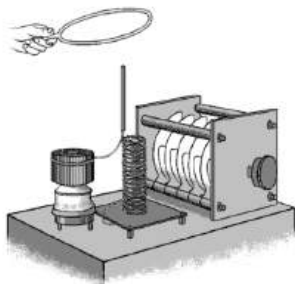


Рис. 65. Демонстрация безэлектродного разряда в газонаполненной трубке

Для проведения опыта достаточно взять в руку газонаполненную трубку и поднести ее к излучателю работающего генератора на расстояние 10–30 см. Факел на излучателе при этом должен отсутствовать. С приближением трубки к излучателю в ней возникает яркое свечение: оранжево-красного, либо голубовато-желтого цвета в зависимости от того, какая из трубок подносится (рис. 65).

Затем к излучателю подносят длинную люминесцентную лампу (дневного света). Лампа «загорается», вызывая изумление у наблюдателей, поскольку она светит в отсутствие типичного для нее обрамления элементами электропитания.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Опыт относится к теме «Электрический ток в вакууме» и предназначен для демонстрации искривления электронного пучка в однородном электростатическом поле. Опытная установка состоит из пары высоковольтных блоков питания и коммутатора с электроннолучевой трубкой (рис. 66). Один блок питает аноды и накал трубки, а второй – пару вертикально отклоняющих пластин трубки.

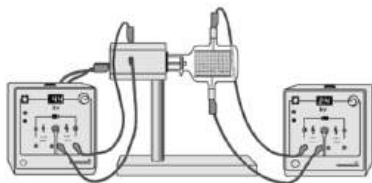


Рис. 66. Установка для демонстрации электростатического управления электронным пучком

При подаче электропитания на трубку на ее люминесцентном экране высвечивается узкая ярко-зеленая полоска,

отображающая траекторию электронного пучка. В отсутствие напряжения на отклоняющих пластинах полоска прямая и располагается горизонтально.

При включении источника питания отклоняющих пластин полоска искривляется вверх или вниз в зависимости от полярности пластин. Регулируя выходное напряжение этого источника, демонстрируют зависимость кривизны электронного пучка от напряжения на пластинах. Для лучшей видимости траектории пучка опыт следует проводить при частичном затемнении.

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

В опыте демонстрируется свечение люминофоров при облучении их потоком движущихся в вакууме электронов. Это явление используют для освещения помещений люминесцентными лампами, для визуализации изображения на экране электроннолучевой трубки (кинескопа). Используемые в них неорганические люминофоры представляют собой смесь сложного состава: алюминат стронция, активированный европием, диспрозием, иттрием.

Демонстрационная установка состоит из высоковольтного блока питания и коммутатора с электроннолучевой трубкой. В трубке установлены три металлических полоски, покрытые различными люминофорами (рис. 67).

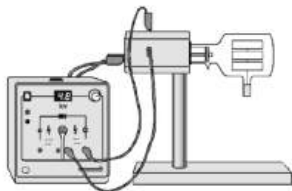


Рис. 67. Установка для демонстрации свечения люминофоров в электронном пучке

При отсутствии электропитания полоски в трубке выглядят одинаково белыми. При подаче на трубку электропитания полоски ярко светятся красным, зеленым и голубым цветами. Для эффектности опыт рекомендуется демонстрировать при частичном затемнении.

ОПЫТ ЭРСТЕДА

С древних пор существовало одно заблуждение – люди отождествляли янтарь и магнит. Причиной этого служила их общая способность притягивать предметы. Электрическую природу притяжения янтарем установил английский ученый Вильям Гильберт, который и ввел в науку слово «электрика».

Познание же тайн магнетизма началось со знаменательно-го открытия в 1820 году профессора копенгагенского университета Ханса Эрстеда. Однажды на лекции, посвященной связи электричества с теплотой, он показывал опыт по разогреву платиновой проволоки электрическим током. Эрстед заметил, что магнитная стрелка морского компаса, случайно оказавшегося близ опытной установки, при замыкании цепи дернулась и повернулась.

Детально исследовав затем это явление, Эрстед обнаружил еще один удивительный факт – при вертикальном расположении провода стрелка компаса располагалась не вдоль прямой, соединяющей ее и провод, а всегда становилась перпендикулярно этой прямой. Этот факт противоречил третьему закону Ньютона о характере взаимодействии тел, в данном случае провода



Рис. 68. Ханс Эрстед

и стрелки! Эрстед предположил, что вокруг провода с током образовывался магнитный вихрь, который увлекал за собой стрелку...

Для проведения этого фундаментального опыта надо, чтобы сила тока в проводе составляла несколько десятков ампер. Лишь при таком условии магнитная стрелка, отстоящая от провода на достаточном для демонстрации расстоянии 10–20 см, «замечает» магнитное поле тока.

В опытной установке, вместо одного токонесущего провода, используется жгут из множества изолированных проводов, заключенных в тонкостенную латунную трубку. Это обеспечивает образование в окрестности жгута, при протекании в нем относительно небольшого тока, магнитного поля, достаточного для воздействия на магнитную стрелку. Жгут в трубке является частью вертикально расположенного плоского контура. Поскольку обозреваемая часть контура скрыта в трубке, то именно она, то есть трубка воспринимается наблюдателями, как токонесущий проводник (рис. 69).

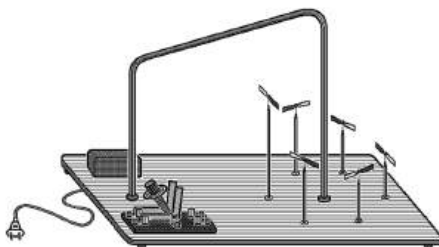


Рис. 69. Прибор для демонстрации опыта Эрстеда

Электропитание установки осуществляется от сети переменного напряжения 220 В, которое понижается трансформатором Тр (рис. 70) до величины 30 В, затем выпрямляется

мостиковым выпрямителем В и через переключатель П подается на контур К. Переключатель предназначен для реверса тока в контуре, величина которого не превышает 1 А.

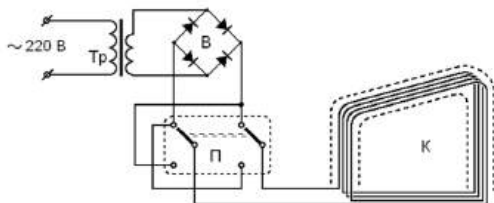


Рис. 70. Электрическая схема демонстрационной установки

Сначала демонстрируют установку при отсутствии тока в контуре. Все стрелки при этом ориентированы одинаково и располагаются вдоль магнитного меридиана Земли. При замыкании контактов переключателя магнитные стрелки поворачиваются и, после успокоения, образуют собой кольцо вокруг трубки. Северные концы всех стрелок при этом ориентированы, например, по ходу часовой стрелки, если смотреть на них сверху, в соответствии с известным «правилом буравчика». Этим наглядно подтверждается вихревая структура индукции магнитного поля.

При перекидывании замыкающих контактов переключателя направление электрического тока в контуре изменяется на противоположное. Это приводит к развороту всех стрелок на 180° . После успокоения стрелки снова располагаются по кругу, однако их северные концы ориентированы уже против хода часовой стрелки. Поскольку в ходе демонстрации провода не разогреваются в силу малости текущего в них тока, то эффект можно воспроизводить многократно.

Одной рукой прижимают панель к кодоскопу, а другой рукой берут свободный конец второго провода и наносят им скользящий удар по свободной клемме панели. При этом одновременно ребром ладони слегка ударяют по кадровому окну кодоскопа, встряхивая тем самым опилки.

При касании проводом клеммы замыкается электрическая цепь, и по контуру течет весьма большой ток. Образующееся при этом магнитное поле воздействует на опилки так, что они выстраиваются на панели вдоль его силовых линий. Затем аналогично демонстрируют конфигурации полей на остальных панелях (рис. 72).

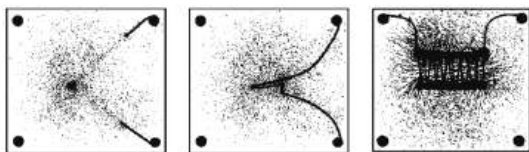


Рис. 72. Магнитные поля в окрестности прямого провода, витка и соленоида

ПОЛЕ МАГНИТА

В этом опыте визуализируют силовые линии поля в окрестности одного или нескольких постоянных магнитов. На кадровое окно кодоскопа кладут лист оконного стекла размером 30×30 см, на которое равномерно насыпают железные опилки. Изображение опилок проецируют на вертикальный экран и обращают внимание наблюдателей на то, что эти опилки располагаются бессистемно и изотропно, образуя собой однородный фон.

Стекло с опилками приподнимают, под него на кодоскоп кладут подковообразный магнит, а на него аккуратно опускают стекло с опилками, стараясь не встряхнуть их при этом. Сфокусировав изображение опилок и магнита, обращают

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Поскольку человек не способен ощущать магнитные поля, то актуальна задача представления этих полей в виде, удобном для восприятия. В данном опыте визуализируются линии индукции магнитного поля в окрестностях прямого провода, круглого витка и соленоида при протекании через них электрического тока. Эти элементы смонтированы на плексигласовых панелях (рис. 71).



Рис. 71. Панели для визуализации магнитных полей

Одну из таких панелей ставят на кадровое окно кодоскопа. Одну из ее клемм соединяют изолированным проводом с выходной клеммой лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), на котором устанавливают выходное напряжение порядка 40–50 В. К другой клемме панели второй провод от ЛАТРа не подсоединяют.

На панель равномерно насыпают мелкие железные опилки. Опилки нужной формы и размеров обычно образуются в процессе обработки железных деталей напильником. Для проведения опыта требуется около 1 см^3 таких опилок. Сыпать опилки удобно из перечницы, в которой опилки и хранятся. Изображение опилок и проводов на панели проецируют с помощью кодоскопа на белый экран. Освещение в аудитории следует выключить. Внимание наблюдателей обращают на то, что опилки на панели лежат бессистемно и образуют собой однородный серый фон.

внимание на то, что абсолютное большинство этих опилок лежат по-прежнему, никак не отреагировав на появление под ними магнита.

Чуть приподняв край стекла с опилками, быстро опускают его, слегка ударив им по магниту. Опилки при этом встряхиваются, подлетают вверх и затем ложатся на стекло вдоль силовых линий, формируя изображение поля в окрестности подковообразного магнита (рис. 73 а). Кстати, по приведенному здесь изображению можно утверждать, что на концах данного магнита находятся одноименные полюса, что не характерно для магнита подковообразной формы.

Затем аналогично показывают конфигурацию поля между парой полосовых магнитов, сближенных одноименными (рис. 73 б) и разноименными (рис. 73 в) полюсами.

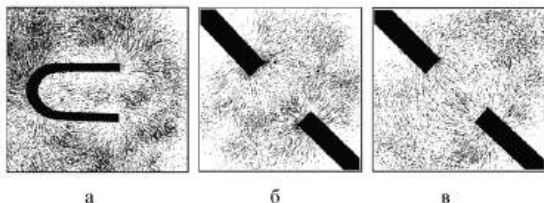


Рис. 73. Поля постоянных магнитов

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКОВ

Электрические токи, текущие по двум параллельным и расположенным недалеко друг от друга проводникам, вызывают силовое взаимодействие этих проводников. Когда токи по проводникам текут в одном направлении, проводники притягиваются друг к другу, а когда токи в них текут в противоположных направлениях, — отталкиваются. Этот эффект наблюдается не только для постоянных, но и для переменных токов.



Рис. 74. Андре-Мари Ампер

Величина и характер взаимодействия проводников подчиняется закону Ампера и зависит от направлений и величины токов в проводниках, от длины проводников и от расстояния между ними. Такое взаимодействие проводников положено в основу эталона единицы силы тока (Ампер) в Международной системе единиц измерения физических величин.

Это взаимодействие в обиходе заметить невозможно ввиду малости его величины и еще потому, что провода электропроводок закреплены. Поэтому для эффекта необходимо, чтобы проводники были незакрепленными, текущие по ним токи – весьма большими (десятки ампер), а действие на проводники силы тяжести и силы трения не превалировало над силой амперовского взаимодействия.

На рис. 75 представлена электрическая схема установки. Электропитание осуществляется через мощный силовой трансформатор, понижающий напряжение (в холостом режиме) до 30 В. Коммутацию токов в наблюдаемых проводниках (на рисунках они изображены в виде извилистых линий) осуществляют переключателем, фиксирующимся в трех положениях: разомкнутом, замкнутом в положении 1 и замкнутом в положении 2.

При разомкнутом переключателе проводники обесточены, и они не взаимодействуют. При установке переключателя в положение 1 токи в проводниках текут в одинаковом направлении, и проводники сближаются. При установке переключателя в положение 2 токи в проводниках текут в противоположных направлениях, и проводники удаляются друг от друга.

Демонстрационная установка состоит из трансформатора и блока токонесящих лент. Для удобства транспортировки трансформатор установлен на тележке. Взаимодействующие проводники выполнены в виде пары металлических лент шириной по 5 см и длиной около 1 м. Ленты располагаются вертикально, без натяга и с возможностью незначительного перемещения по горизонтали (рис. 76).

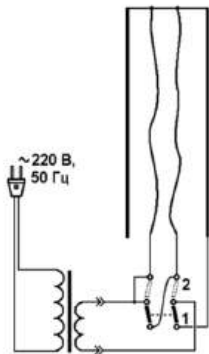


Рис. 75. Схема установки

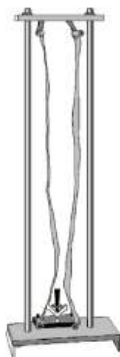


Рис. 76. Блок лент

Демонстрация сводится к последовательному замыканию переключателя в его рабочие положения. Так как в установке при этом течет весьма большой ток, то соединительные провода в ней быстро разогреваются, и изоляция на них может расплавиться. Поэтому переключатель в замкнутом состоянии должен пребывать не дольше 3 секунд, а перерыв между последовательными его замыканиями должен составлять не менее 15 секунд. Поскольку металлические стойки каркаса блока лент находятся под напряжением, то не следует прикасаться к ним при проведении опыта.

РАЗВОРОТ КАТУШКИ В ПОЛЕ МАГНИТА

Если по виткам катушки течет электрический ток, а катушка при этом находится в магнитном поле, то это поле оказывает на катушку силовое воздействие, величина и направление которого определяется законом Ампера. В случае, когда поле однородное, а ток в катушке постоянный, то это воздействие проявляется в виде вращающего катушку момента сил. Если же катушка не закреплена, то под действием этого момента она поворачивается на определенный угол в зависимости от ее исходного положения и от направления в ней электрического тока.

Достаточно однородное (в пределах занимаемого катушкой пространства) поле создать затруднительно. Поэтому в реальном опыте (рис. 77) катушка пребывает в поле неоднородном. А это приводит к тому, что, помимо вращательного момента, катушка еще испытывает и силовое воздействие, направленное в сторону возрастания индукции этого поля. Поэтому, если источником поля является постоянный магнит, то находящаяся в его поле катушка при протекании по ней тока поворачивается и затем устремляется к магниту.



Рис. 77. Демонстрация разворота катушки в поле постоянного магнита

Катушка выполнена в виде плоского кольца диаметром 9 см и содержит около 30 витков медного провода диаметром 0,6 мм. Для фиксации проводов и придания катушке необходимой жесткости провода в ней склеены меж собой. К концам катушки припаяна пара тонких монтажных проводов. Для лучшей различимости сторон катушки на них наклеены листочки бумаги разных цветов.

Катушку подвешивают на закрепленной в штативе перекладине за провода, подводящие к ней ток. Свободные концы этих проводов соединяют с клеммами источника постоянного тока с регулируемым напряжением 4–12 В. Рядом с катушкой на расстоянии 3–5 см от нее устанавливают постоянный магнит.

При включении источника катушка сначала разворачивается на 180 градусов, обратившись к магниту другой стороной, а затем устремляется к нему и прилипает к его поверхности. Если же после включения источника катушка движется к магниту без предварительного разворота, то магнит надо развернуть, сориентировав его по отношению к катушке противоположной стороной (полюсом). При выключении источника катушка возвращается в исходное положение.

ОТТАЛКИВАНИЕ И ПРИТЯЖЕНИЕ КАТУШКИ МАГНИТОМ

Проведение этого опыта мало отличается от предыдущего. Демонстрационная установка содержит те же элементы: постоянный магнит, источник тока, штатив. Отличие лишь в том, что количество степеней свободы катушки уменьшено конструктивными особенностями ее подвески. Она не имеет возможности поворачиваться вокруг вертикали, поскольку подводящие к ней ток провода жесткие и разнесены в пространстве (рис. 78).

Для показа отталкивания катушки от магнита надо предварительно подобрать такую полярность ее подключения к источнику и такую ориентацию полюсов магнита, чтобы при

включении источника, катушка отталкивалась от магнита. Продемонстрировав этот эффект, источник выключают, а магнит поворачивают к катушке противоположной стороной. В момент включения источника катушка устремляется к магниту и удерживается им до тех пор, пока по ней течет ток.

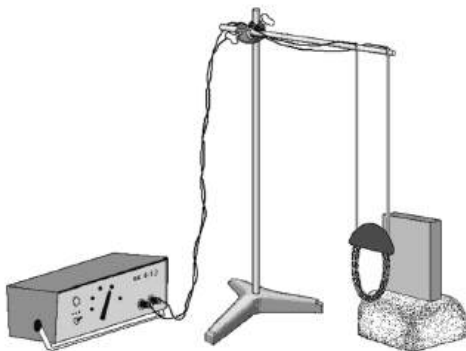


Рис. 78. Демонстрация отталкивания и притяжения катушки постоянным магнитом

ВРАЩЕНИЕ КОНТУРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Данный опыт является наглядной моделью электрического двигателя постоянного тока. Модель состоит из многовиткового прямоугольного контура, установленного в рамке так, что он имеет возможность вращаться вокруг вертикальной оси симметрии. Близ рамки расположена стальная пластина, на которую устанавливается съемный постоянный магнит в форме диска диаметром 19 см (рис. 79).

Выводы контура заведены на пару скользящих контактов, на которые подается выпрямленное и пониженное напряже-

ние от сети электропитания 220 В, 50 Гц. Полярность включения контура меняют переключением тумблера, расположенного на основании прибора.

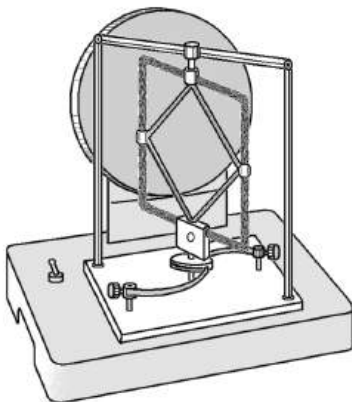


Рис. 79. Модель электродвигателя

Для демонстрации вращения контура, выполняющего роль якоря в данной модели электродвигателя, достаточно подать на него электропитание. Протекание электрического тока по контуру обуславливает воздействие на его вертикальные участки противоположно направленных амперовских сил. Эта пара сил образует вращательный момент, под действием которого контур быстро вращается.

При перекидывании рукоятки тумблера контур останавливается и затем также быстро вращается в противоположном направлении. Если в процессе вращения контура убрать магнит, то вращение прекращается. Последующее же водворение магнита на прежнее место вновь вызывает вращение контура.

При подготовке прибора к демонстрации надо обратить внимание на состояние скользящих контактов. Эти контакты должны упруго прижиматься к выводам контура. При чрезмерно сильном нажатии контактов на выводы между ними возникает большое трение, которое не позволяет контуру проворачиваться. Если же нажатие незначительно, то может случиться, что контакт может отойти от вывода, и тогда контур также не будет вращаться из-за отсутствия в нем тока. Поэтому сила нажатия контактов подбирается заблаговременно при настройке прибора.

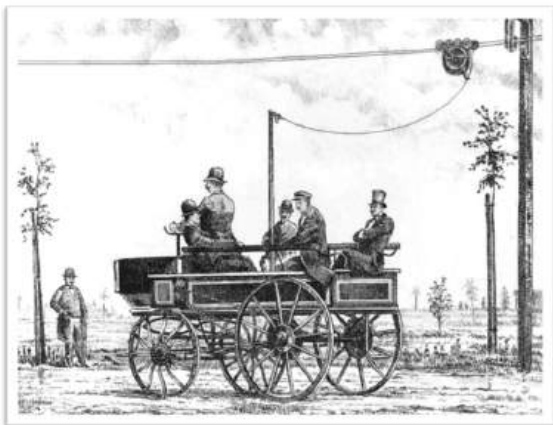


Рис. 80. Один из первых троллейбусов



Фиг. 17. — «Чем объяснить? — спрашивал себя Ампер, когда Араго поднес к магнитной стрелке «ак ключ»...

Рис. 81. Иллюстрация из старинной книги

ОТКЛОНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА МАГНИТОМ

На свободную заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца, зависящая от величины и знака электрического заряда этой частицы, от скорости ее движения и от индукции магнитного поля. Результатом действия этой силы является изменение траектории движения частицы. В данном опыте демонстрируется воздействие поля постоянного магнита на электронный луч осциллографа.

В электроннолучевом осциллографе надо отключить горизонтальную развертку луча и, оперируя рукоятками его вертикального и горизонтального смещения, установить луч так, чтобы он попадал в центр экрана. Пятно от луча надо расфокусировать и сделать максимально ярким. При поднесении к осциллографу сверху постоянного магнита пятно на экране смещается вбок, например, влево (рис. 82).

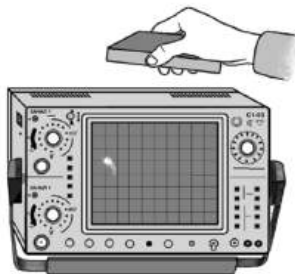


Рис. 82. Магнит смещает пятно на экране осциллографа

Приближая и удаляя магнит по отношению к осциллографу, демонстрируют зависимость смещения пятна от величины индукции магнитного поля. При переворачивании магни-

та, то есть при изменении направления индукции магнитного поля, пятно на экране смещается от центра уже в противоположную сторону – вправо.

Если этот опыт предполагается показывать учащимся в большой аудитории, то для лучшей его видимости целесообразно воспользоваться документ-камерой, подключенной к видеопроектору, и тогда изображение лицевой панели осциллографа можно наблюдать на большом настенном экране.

ИСКРИВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

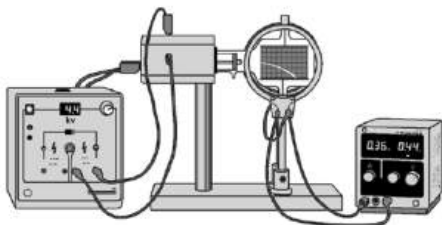


Рис. 83. Установка для демонстрации действия магнитного поля на траекторию электронов

Зависимость кривизны траектории электронов от индукции магнитного поля демонстрируют с помощью установки, представленной на рисунке 83. Специальная электроннолучевая трубка установлена между парой катушек, питаемых от источника постоянного тока.

При отсутствии тока в катушках электронный луч высвечивает на люминесцентном экране прямую горизонтальную линию. При подаче тока на катушки луч искривляется, причем радиус кривизны его траектории уменьшается с увеличением силы тока в катушках.

ТРАЕКТОРИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

На свободный электрон, «влетевший» в однородное магнитное поле, воздействует сила Лоренца, закручивающая траекторию электрона в цилиндрическую спираль. Если вектор скорости электрона перпендикулярен индукции поля, то спираль вырождается в окружность, радиус которой обратно пропорционален величине индукции.

Установка позволяет визуализировать круговую траекторию движения электронов в магнитном поле катушек Гельмгольца. Она состоит из наполненной водородом сферической колбы, в дне которой имеется электронная пушка. Колба установлена между двумя катушками, силу тока в которой можно плавно регулировать. Водород нужен для визуализации траектории электронов. Дело в том, что при соударении быстро движущихся электронов с молекулами водорода, последние ионизируются, а затем, рекомбинируя, испускают кванты света, воспринимаемые в виде голубовато-фиолетового свечения.

Настройка экспериментальной установки сводится к прогреву электронной пушки, на что уходит 5–7 минут после ее включения, и подбору таких значений токов в катушках и электронном пучке, чтобы оставляемая электронами световая дорожка была замкнутой, достаточно контрастной и сфокусированной. Характерный вид изображения, демонстрируемого при полном затемнении, представлен на рисунке 84.

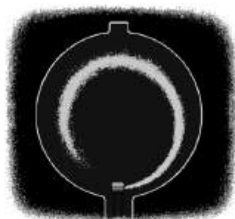


Рис. 84. В магнитном поле электроны двигаются по кругу

ЭКРАНИРОВАНИЕ МАГНИТА

Опыт демонстрирует способность тела из ферромагнетика экранировать (не пропускать) статическое магнитное поле. В опыте используются магнитная стрелка на острие, постоянный магнит на подставке и отрезок стальной трубы, внутри которой может свободно разместиться установленный на подставке магнит (рис. 85).

На стол ставят магнитную стрелку, которая должна соригентироваться вдоль магнитного меридиана Земли, проходящего по месту проведения опыта. После того, как стрелка установится в направлении юг-север, к ней приближают постоянный магнит и оставляют на предварительно определенном ему месте. Место это характерно тем, что находящийся в нем магнит переориентирует стрелку на себя, причем при переориентации стрелка должна повернуться на угол в пределах 90–120 градусов. Это означает, что индукция поля магнита в месте расположения стрелки существенно превосходит горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

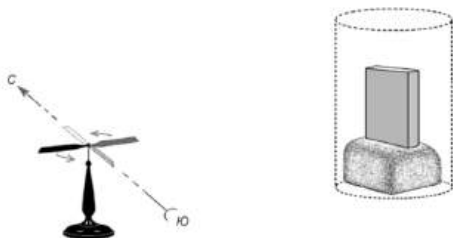


Рис. 85. Экранирование магнита отрезком стальной трубы

Для экранирования магнита его накрывают отрезком трубы. Оказавшись внутри ферромагнитной полости, магнит на стрелку не влияет, и под действием земного магнетизма она ориентируется в первоначальном направлении юг-север.

ЭКРАНИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СТРЕЛКИ

На рабочую поверхность кодоскопа кладут миниатюрную магнитную стрелку в прозрачном цилиндрическом корпусе. В неподвижном состоянии стрелка должна быть ориентирована вдоль магнитного меридиана Земли в месте проведения опыта.

На удалении 15–20 см от стрелки на кодоскоп кладут постоянный полосовой магнит. Стрелка при этом поворачивается и устанавливается в направлении на ближайший к ней полюс магнита, поскольку в месте ее расположения величина индукции поля этого магнита существенно больше индукции поля Земли (рис. 86 а). Магнит медленно перемещают по рабочей поверхности кодоскопа. Стрелка же при этом должна всегда ориентироваться в направлении на магнит.

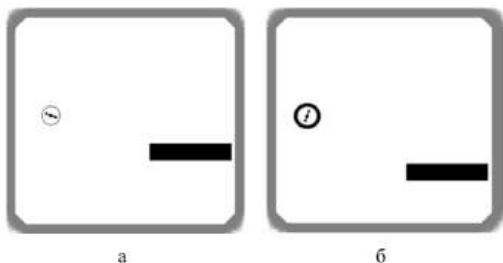


Рис. 86. Демонстрация экранирования магнитной стрелки

Затем экранируют корпус магнитной стрелки. Для этого на корпус надевают стальное кольцо, облегающее его боковую цилиндрическую поверхность и оставляющее открытыми его верхнюю и нижнюю плоские стороны, что необходимо для наблюдения за стрелкой. Поэтому полное экранирование стрелки не достигается. Однако от поля магнита стрелка экранируется кольцом в большей степени, чем от поля Земли

вследствие различия конфигураций силовых линий этих полей. Поэтому стрелка вновь ориентируется вдоль магнитного меридиана.

Затем магнит перемещают прежним образом, а внимание наблюдателей обращают на то, что стрелка на магнит теперь не реагирует (рис. 86 б). Это свидетельствует о том, что в месте расположения стрелки поле магнита отсутствует, поскольку это место экранировано стальным кольцом.

ЭКРАНИРОВАНИЕ ОПИЛОК

На кодоскоп кладут два одинаковых полосовых магнита, сближенных разноименными полюсами (рис. 87). В промежутке между магнитами кладут стальное кольцо диаметром 25–30 мм и высотой, равной толщине магнита (приблизительно 8–10 мм). Магниты и кольцо покрывают листом оконного стекла, поверх которого кладут еще одно кольцо, идентичное лежащему под стеклом. Верхнее кольцо ставят над нижним кольцом так, чтобы их изображения, будучи спроецированными кодоскопом на настенный экран, были совмещены и выглядели, как одно кольцо.

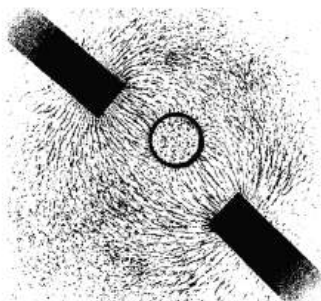


Рис. 87. Внутри железного кольца поле не проникает

Из перечницы насыпают на стекло железные опилки. Падая, опилки ложатся на стекло, ориентируясь вдоль линий индукции поля обоих магнитов. Для лучшей визуализации этого поля надо слегка постучать по стеклу, чтобы встряхнуть лежащие на нем опилки.

Однако опилки, находящиеся внутри кольца, на стекле располагаются неупорядоченно, хаотично. Это говорит о том, что на них магниты не оказывают никакого воздействия. Следовательно, внутрь кольца магнитное поле не проникает, тогда как вне этого кольца оно, судя по положению опилок, существенно.

ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Электромагнит – искусственный магнит, у которого магнитное поле возникает и концентрируется в ферромагнитном сердечнике вследствие прохождения по охватывающей его обмотке электрического тока. Область применения электромагнитов обширна. Их используют в электрических машинах и аппаратах, для подъема грузов, в устройствах автоматики, в медицине, в различного рода научных исследованиях...

Опыт демонстрирует способность электромагнита удерживать на себе груз. Магнит состоит из пары катушек, насаженных на стальной П-образный сердечник, снабженный штырем для крепления в штативе. Катушки запитывают от источника постоянного тока напряжением до 20 В, способного выдавать ток до 1 А. Ярмом электромагнита служит небольшая стальная планка, снабженная крючком для подвешивания к нему груза (рис. 88).

Сначала показывают, что при отсутствии тока в катушках ярмо к сердечнику не притягивается. Однако при включении тока ярмо, будучи поднесенным к сердечнику, прилипает к нему. Последующим навешиванием на ярмо грузов демонстрируют подъемную силу электромагнита. При отключении же электропитания ярмо отрывается от сердечника и вместе с грузом падает вниз.

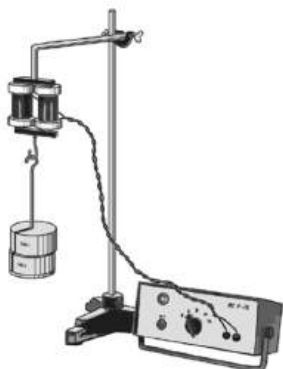


Рис. 88. Демонстрация подъемной силы электромагнита

Данный опыт можно рассматривать, как модель магнитного захвата для удерживания и перемещения стальных деталей, для погрузки «черного» металлолома.

ВИСМУТ И АЛЮМИНИЙ НА КОРОМЫСЛЕ

Значения магнитной восприимчивости, как диамагнетиков, так и парамагнетиков относительно малы. Например, модуль восприимчивости висмута – вещества, в котором диамагнетизм проявляется наиболее сильно по сравнению с другими диамагнетиками, достигает всего лишь $176 \cdot 10^{-6}$. Столь малая способность диамагнетиков намагничиваться сильно ограничивает возможности воспроизведения диамагнитных эффектов при публичных демонстрациях.

Величина восприимчивости парамагнетиков в целом больше, чем у диамагнетиков. Однако это не облегчает проведение опытов с ними. Дело в том, что мелкие и не закрепленные парамагнитные тела в неоднородном магнитном поле

втягиваются в область его большей напряженности, то есть ведут себя так же, как ферромагнетики.

Поэтому присутствие в парамагнитном образце примеси какого-нибудь ферромагнетика, что бывает весьма часто, придает этому образцу повышенный магнитный момент. В результате бывает трудно установить, чем обусловлено движение образца в поле – его парамагнитными свойствами или присутствием в нем ферромагнетика. Это обстоятельство надо иметь в виду, поскольку на занятии нет возможности поставить контрольный опыт, в котором используемый образец проверялся бы на парамагнитную «чистоту».

Есть еще одно обстоятельство, способное исказить демонстрируемый эффект – это наведение в образце, как диамагнитном, так и парамагнитном, индукционных токов Фуко в момент изменения магнитного поля, что приводит к воздействию на образец амперовских сил.

Опытная установка состоит из двух равновесных, размером со спичечную коробку, образцов: висмута (диамагнетик) и алюминия (парамагнетик). Образцы приклеены к концам коромысла, изготовленного из полоски плексигласа. С помощью лески коромысло подвешивают в его центре к закрепленному в штативе штырю (рис. 89). Чтобы леска не закручивалась, в подвеске использован рыболовный карабин. Магнитное поле создают с помощью небольшого, но «сильного» постоянного магнита, установленного на отдельной стойке. В исходном состоянии подвешенное коромысло с образцами должно быть неподвижно, а магнит должен располагаться на одной с образцами высоте.

Медленно перемещая стойку, магнит приближают к висмутовому образцу на расстояние 3–5 мм. Так как поле магнита неоднородно, то находящийся в нем диамагнитный образец устремляется в область его наименьшей напряженности, то есть будет выталкиваться из поля, что выражается сначала едва заметным, а затем все более быстрым поворотом коро-

мысла. По мере «убегания» висмутового образца от магнита, последний двигают вслед за образцом, тем самым подталкивая и ускоряя его движение.

Прежде чем показать вторую часть опыта, коромысло необходимо обездвигить. Затем магнит подводят к алюминиевому образцу также на расстояние 3–5 мм, причем сближение это должно быть радиальным, то есть вдоль прямой, соединяющей магнит и ось вращения коромысла. Вследствие притяжения алюминиевого образца к магниту коромысло придет во вращательное движение. По мере сближения образца с магнитом, последний надо плавно отводить от образца по ходу его движения, сохраняя между ними упомянутое расстояние.

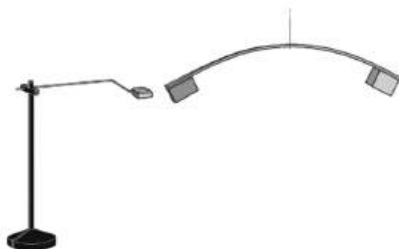


Рис. 89. Демонстрация поведения диамагнетика и парамагнетика в неоднородном магнитном поле

Если же магнит подносить к алюминиевому образцу радиально, а по касательной к траектории движения конца коромысла, то в образце будут индуцироваться вихревые токи Фуко. Эти токи, взаимодействуя с магнитом силой Ампера, могут привести к взаимному отталкиванию образца и магнита в соответствии с правилом Ленца, что поставит под сомнение результаты опыта и методическую ценность его демонстрации.

ВИСМУТОВАЯ И АЛЮМИНИЕВАЯ СТРЕЛКИ

В опыте демонстрируются повороты миниатюрных стрелок (стерженьков) из висмута и алюминия под воздействием магнитостатического поля. Диаметр их – 3 мм, длина – 15 мм. Для изготовления висмутовой стрелки надо положить кусочек металлического висмута в стальную ложку и расплавить его на газовой или электрической плите. Расплавленный висмут выливают в форму – сгиб бумажного листа, а после остывания ему придают нужную форму с помощью напильника. Алюминиевую же стрелку можно сделать, отрезав небольшой кусочек от алюминиевой проволоки соответствующего диаметра.

Каждая стрелка подвешена в её середине на тонкой капроновой нити, второй конец которой привязан к центру эбонитового кольца. Во время демонстрации эти кольца последовательно ставят на рамку, предварительно устанавливаемую на электромагните. Свисающая на нити стрелка должна находиться между полюсами электромагнита. Изображения полюсов магнита и помещенной между ними стрелки отображают посредством теневой проекции на экран.

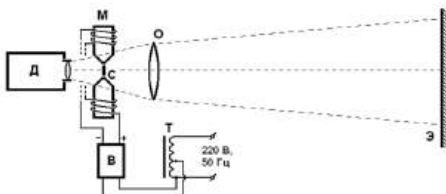


Рис. 90. Схема демонстрационной установки

Демонстрационная установка, схема которой представлена на рис. 90, состоит из осветителя, в качестве которого используется диапроектор Д, электромагнита М с подвешенным

между его полюсами стрелкой С, проекционного объектива О, экрана Э и блока электропитания магнита. Электропитание магнита осуществляется от сети переменного тока через лабораторный автотрансформатор Т и выпрямитель В.

Сначала демонстрируют поведение в магнитном поле диамагнитного образца. Для этого висмутовую стрелку подвешивают между наконечниками магнита так, чтобы она располагалась вдоль линии, соединяющей эти наконечники (рис. 91 а). Затем включают электропитание магнита, что приводит к повороту стрелки в горизонтальной плоскости на угол около 90° . При этом стрелка становится перпендикулярно линиям индукции магнитного поля (рис. 91 б), образовавшегося в зазоре между наконечниками. При выключении питания упруго закрученная нить раскручивается и возвращает стрелку в исходное состояние. Для убедительности опыт следует повторить.

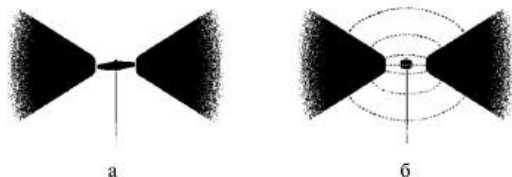


Рис. 91. Висмутовая стрелка между наконечниками магнита. (Изображение на экране перевернуто ввиду проецирования)

После этого на место висмутовой стрелки ставят (при выключенном питании) алюминиевую стрелку, причем её располагают перпендикулярно продольной оси наконечников электромагнита. При подаче тока на обмотки алюминиевая стрелка поворачивается также на 90° , причем она фиксируется уже вдоль линий индукции. В методических целях разворот этой стрелки так же, как и висмутовой, целесообразно повторить.

Таким образом, висмутовая (диамагнитная) стрелка в магнитном поле становится перпендикулярно его линиям индукции, а алюминиевая (парамагнитная) – вдоль линий индукции.

ПЛАМЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Опыт демонстрирует проявление диамагнитных свойств нагретых газов в видимой части пламени свечи. Его целесообразно проводить вместе с опытом «Висмутовая и алюминиевая стрелки», поскольку в этих опытах используется одно и то же экспериментальное оборудование.

В промежутке между наконечниками электромагнита ставят короткую свечу (высотой 3–5 мм). Фитиль свечи предварительно подстригают, чтобы его выступающая над парафином часть была тонкой и короткой. Высота пламени от такого фитиля не должно превышать 1 см. Наконечники магнита надо максимально сблизить, пламя же должно находиться между ними.

На экран с помощью осветителя и объектива проецируют изображение наконечников электромагнита и расположенной под ними свечи. Так как в потоке яркого света от осветителя изображение пламени на экране незаметно, то осветитель выключают. Тогда на экране отображается лишь пламя свечи и освещаемые им наконечники магнита.

При подаче тока в обмотку электромагнита образующееся между его наконечниками магнитное поле выталкивает пламя прочь, и оно прижимается вниз – к свече. Следует иметь в виду, что наблюдаемое на экране изображение перевернутое. Для получения же привычного изображения свечи и ее пламени надо пропустить выходящий из объектива световой пучок через оборотную призму.

МОДЕЛЬ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

При объяснении доменной структуры ферромагнетиков можно воспользоваться небольшим прибором в виде прозрачной плоской панели, внутри которой находятся несколь-

ко десятков миниатюрных, уравновешенных на остриях магнитных стрелок. Панель кладут на рабочее поле кодоскопа, а его изображение проецируют на экран (рис. 92 а).

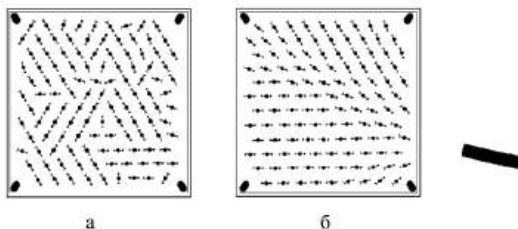


Рис. 92. Модель доменной структуры ферромагнетика

При отсутствии внешнего магнитного поля каждая стрелка панели устанавливается в положение, соответствующее сложившейся в месте ее расположения магнитной обстановке, которая является суперпозицией полей соседних с ней стрелок. Внимание наблюдателей обращают на ориентацию стрелок прибора, носящую в целом случайный характер. Локальные же группы одинаково ориентированных стрелок панели олицетворяют собой домены – макроскопические области намагниченности в ферромагнетике. Наблюдаемая картина характерна для размагниченного образца ферромагнетика.

К панели подносят стержневой магнит. В результате все стрелки ориентируются в направлении на ближайший к панели торец магнита, на который приходится один из его полюсов (на рис. 92 б – южный). Этот факт можно интерпретировать, как магнитное насыщение ферромагнетика, при котором образец становится единым гигантским доменом.

Затем, двигая магнит по кругу над панелью, приводят стрелки в быстрое вращение. Магнит убирают в сторону, а

стрелки после остановки вновь самоорганизуются в различно ориентированные группы. Подобным образом можно размагничивать намагниченные стальные предметы, используя для этого переменное монотонно убывающее магнитное поле.

СКАЧКИ БАРКГАУЗЕНА

Характерной особенностью ферромагнитных материалов является то, что весь объем ферромагнитного образца составлен из множества прилегающих друг к другу микроскопических областей спонтанной намагниченности – доменов. Формы и размеры доменов, а также положение междоменных границ в ферромагнитном образце, находящимся в статичной электромагнитной обстановке, стабильны.

При изменении этой обстановки в образце происходят скачкообразные сдвиги границ между доменами, называемые скачками Баркгаузена. Если же образец находится в постоянно меняющемся магнитном поле, то такие скачки становятся многочисленными и непрерывными.

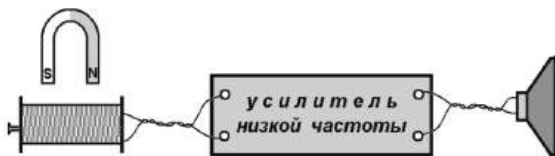


Рис. 93. Схема установки для демонстрации скачков Баркгаузена

Для демонстрации скачков Баркгаузена собирают следующую установку (рис. 93). Выводы небольшой по размерам катушки, содержащей несколько сотен витков тонкого монтажного провода, присоединяют к входу усилителя низкой частоты, а его выход – к громкоговорителю. В жерло катушки помещают железный гвоздь, зафиксировав его там куском

поролонa. Регулируя параметры усилителя, добиваются, чтобы при достаточно большом усилении не слышался собственный шум усилителя и отсутствовал фон переменного тока сети электропитания.

К катушке подносят постоянный магнит. По мере приближения к ней магнита, напряженность его поля в месте расположения гвоздя увеличивается и, наконец, достигает той величины, при которой начинается интенсивный рост намагниченности железа. Это сопровождается появлением из громкоговорителя характерного шума, напоминающего пересыпание сухой крупы.

Шум этот складывается из множества негромких шелчков, каждый из которых является откликом на изменение ориентации и границ отдельной микроскопической области спонтанной намагниченности материала гвоздя. Все последующие движения магнита близ катушки также сопровождаются этим шумом, что является экспериментальным подтверждением существования доменов и переориентации их магнитных моментов при изменении внешнего магнитного поля.

ТОЧКА КЮРИ

Точка Кюри – значение температуры, при которой ферромагнетик претерпевает фазовый переход второго рода, связанный со скачкообразным изменением его структуры. Названа по имени Пьера Кюри, подробно изучившего это явление. При температуре ниже точки Кюри для ферромагнетика характерно наличие областей самопроизвольной (спонтанной) намагниченности – доменов. В точке Кюри интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его доменной структуры, в результате чего ферромагнетик становится парамагнетиком. При этом изменяются его физические свойства, например, теплоемкость, магнитная восприимчивость.

В небольшую швейную иглу продета нить, конец которой привязан к невысокой стойке. На нити имеется цветной флажок из бумаги, необходимый для лучшей видимости воспроизводимого эффекта. Большеразмерный и достаточно мощный постоянный магнит фиксируют на столе с помощью лабораторного штатива. Игла, удерживаемая с одной стороны натянутой нитью, а с другой – магнитом, должна зависнуть в воздухе в нескольких сантиметрах от него, причем расстояние от кончика иглы до магнита надо установить максимально возможным (рис. 94).

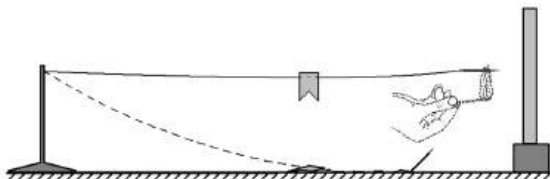


Рис. 94. Демонстрация перехода через точку Кюри

Зажигают спичку и подводят ее пламя под кончик иглы. Через несколько секунд он раскаляется настолько, что переходит точку Кюри, составляющей для стали 769°C . Это приводит к утрате намагниченности иглы, и она вместе с нитью и флажком падает на столешницу.

По мере остывания игла переходит точку Кюри в обратном направлении и снова становится ферромагнитной. В результате она намагничивается и, притянувшись к магниту, снова зависает в воздухе.

ГИСТЕРЕЗИС ФЕРРОМАГНЕТИКА

Магнитный гистерезис ферромагнетика – явление отставания изменения вектора $\mathbf{B}$ индукции в нем от изменения напряженности $\mathbf{H}$ внешнего намагничивающего поля, обусловленное зависимостью индукции от ее предыдущих значений. Магнитный гистерезис – следствие необратимых изменений при намагничивании и перемагничивании.

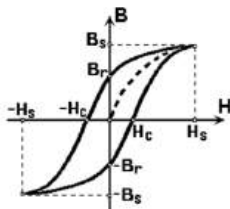


Рис. 95. Гистерезис ферромагнетика

Явление характеризуется петлей гистерезиса (рис. 95) – графиком зависимости магнитной индукции в ферромагнетике, помещенного во внешнее переменное магнитное поле напряженностью H , при изменении этого поля от $+H_s$ до $-H_s$ и обратно. $\pm H_s$ –

напряженность поля насыщения, $\pm H_c$ – так называемая «коэрцитивная сила», то есть значение напряженности обратного поля, доводящего магнитную индукцию до нуля, $\pm B_s$ – индукция насыщения, $\pm B_r$ – остаточная индукция, ее существование является основой создания постоянных магнитов.

Площадь петли магнитного гистерезиса равна энергии, теряемой на нагрев образца за один цикл изменения поля. Там, где такие потери нежелательны (в сердечниках трансформаторов и электромагнитов, в статорах и роторах электрических машин) применяют магнитомягкие материалы, обладающие малым H_c и малой площадью петли (рис. 96 а). Магнитожесткие же материалы (рис. 96 б) используют для создания постоянных магнитов. В гистерезисном электродвигателе вращающий момент образуется за счет гистерезиса при перемагничивании массивного ротора, сердечник которого имеет широкую петлю гистерезиса.

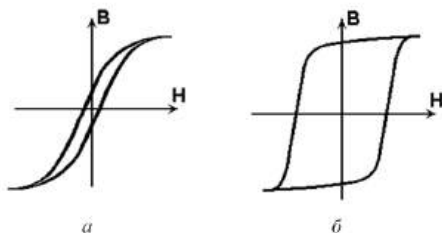


Рис. 96. Гистерезисы магнитомягкого (а) и магнитожёсткого (б) ферромагнетиков.

На рис. 97 представлена схема прибора, основным элементом которого является трансформатор Тр 2. Его магнитопровод изготовлен из нескольких витков стальной проволоки и имеет форму кольца диаметром 155 мм. Диаметр сечения магнитопровода 5 мм. Первичная обмотка содержит около 700 витков провода, намотанного на магнитопровод. Вторичная обмотка расположена поверх первичной и содержит 160 витков провода.

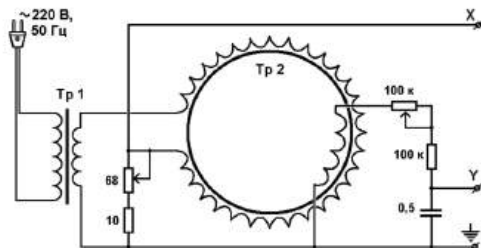


Рис. 97. Схема установки для демонстрации гистерезиса

Понижающий трансформатор Тр 1 обеспечивает подачу на первичную обмотку трансформатора Тр 2 и на усилитель горизонтального отклонения осциллографа переменного напряжения 12 В. Величина этого напряжения пропорциональна напряженности магнитного поля в сердечнике.

Напряжение, индуцируемое на вторичной обмотке трансформатора Тр 2, подается на усилитель вертикального отклонения осциллографа. Величина этого напряжения в каждый момент времени пропорциональна индукции магнитного поля в сердечнике. В результате световое пятно на экране осциллографа, управляемое парой указанных сигналов, движется по характерной для гистерезиса траектории.

Все элементы прибора размещены на вертикальной панели. На рисунке 98 приведена схема соединений прибора с осциллографом.

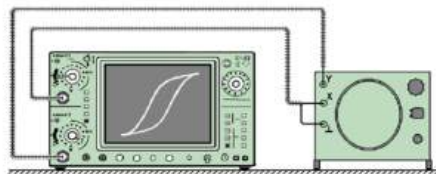


Рис. 98. Схема соединений в демонстрационной установке

ЭФФЕКТ МЕЙСНЕРА

В 1911 году голландский физик Хейке Камерлинг-Оннес обнаружил, что электрическое сопротивление ртути при ее охлаждении до температуры 4 К становится равным нулю. Свойство сверхпроводимости затем обнаружили и у некоторых других металлов и сплавов.

Одним из главных отличий сверхпроводников от идеальных проводников является эффект, открытый в 1933 году

Вальтером Мейснером и его ассистентом Робертом Оксенфельдом, и выражающийся в вытеснении магнитного поля из сверхпроводящего образца.

Демонстрация эффекта Мейснера в качестве учебного эксперимента стала возможной после открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). До этого сверхпроводники получали охлаждением только в дорогом жидком гелии, имеющем температуру 4,2 К. Сегодня же есть материалы, становящиеся сверхпроводником при охлаждении в относительно дешевом жидком азоте с температурой 77 К.



Рис. 99. Хейке Камерлинг-Оннес



Рис. 100. Вальтер Мейснер

Явление высокотемпературной сверхпроводимости обнаружили в 1986 году Алекс Мюллер и Георг Беднорц, ставшие за это открытие лауреатами Нобелевской премии. Алекс Мюллер – почетный профессор Казанского федерального университета.

Эффект Мейснера демонстрируют на керамическом $YBaCuO$ образце, выполненном в форме небольшого цилиндра. В сверхпроводящее состояние его переводят охлаждением в жидком азоте.

необходимых для охлаждения образца до температуры жидкого азота, его вынимают из термоса, немедленно подводят к магниту и отпускают. Однако образец на прежнее место уже не становится. Он располагается вне межполюсного пространства, поскольку выталкивается полем магнита туда, где этого поля нет (рис. 102 б).

Спустя несколько секунд, образец согревается окружающим его воздухом, теряет приобретенное свойство сверхпроводимости и под действием силы тяжести возвращается в пространство между полюсами магнита. При этом прогрев образца происходит не одновременно по всему объему, сначала свойство сверхпроводимости теряют его наружные слои, и лишь спустя некоторое время тепло, проникнув внутрь, выводит образец целиком из сверхпроводящего состояния. Поэтому в исходное положение между полюсами магнита образец возвращается не скачком, а медленно и плавно.

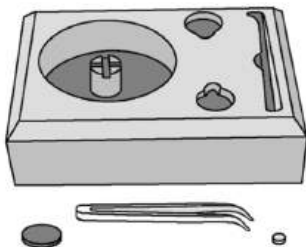


Рис. 103. Принадлежности для демонстрации эффекта Мейснера

В другом варианте эффект Мейснера демонстрируют с помощью миниатюрного цилиндрического магнита, свободно парящего над сверхпроводящим образцом. Поскольку и магнит, и сверхпроводник миниатюрны (рис. 103), то при публичной демонстрации явления целесообразно использовать



Рис. 101. Алекс Мюллер

На кадровое окно кодо-скопа осторожно кладут постоянный магнит, а поблизости от него располагают термос с жидким азотом. На горизонтально закрепленную в штативе перекладину подвешивают на нити ВТСП-образец так, чтобы он располагался между полюсами магнита. Изображения магнита и образца проецируют на настенный экран. Внимание наблюдателей обращают

на то, что образец свободно располагается между полюсами магнита. По тому, как этот образец свободно покачивается на подвесе, ясно, что он не испытывает заметного воздействия со стороны магнита (рис. 102 а). Магнитное поле магнита при этом свободно проникает в толщу образца.

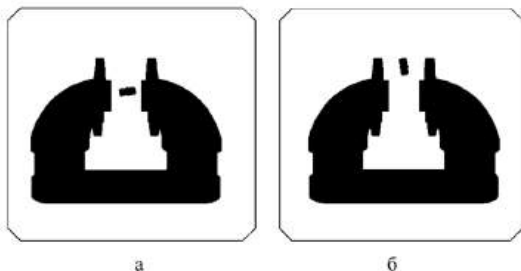


Рис. 102. Теневые проекции магнита и образца

Держа нить, отводят в сторону подвешенный на ней образец и погружают его в жидкий азот. Выждав 10–15 секунд,

видеокамеру вкупе с видеопроектором для трансляции изображения экспериментальной установки на настенный экран.

Сверхпроводящий образец размером с рублевую монету кладут на возвышение в центре кюветы из плотного поролона, а на него кладут магнит. Поскольку образец имеет комнатную температуру и потому не является сверхпроводником, то магнит лежит непосредственно на нем. Затем магнит убирают, а в кювету наливают жидкий азот с тем расчетом, чтобы уровень его свободной поверхности сравнился с верхней поверхностью образца.

После того, как образец перейдет в сверхпроводящее состояние, отмечаемое прекращением выделения вокруг него пузырьков азота, на него быстро опускают магнит, держа его пластмассовым пинцетом. Этот магнит неподвижно зависает над образцом на высоте 5–8 мм.

Для динамичности опыта можно слегка подтолкнуть магнит, передав ему вращательный импульс. Можно также между магнитом и образцом провести бумажную полоску. Наконец, можно аккуратно взять пластмассовым пинцетом сверхпроводящий образец и аккуратно приподнять его на 5–10 мм, сохранив при этом его горизонтальное положение и не выводя из фокуса телекамеры. Магнит при этом также перемещается вверх, висая по-прежнему над образцом.

ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Если электрический ток, как показали опыты Эрстеда, порождает магнитное поле, то может ли магнитное поле вызвать электрический ток в проводнике? Многие ученые пытались найти ответ на этот вопрос, но первым эту задачу решил Майкл Фарадей.

В 1831 г. он обнаружил возникновение электрического тока в проводящей катушке при изменении в ней магнитного потока. Это явление было названо электромагнитной индукцией, а ток, соответственно, индукционным. Благодаря этому

открытию сегодня добывают почти всю используемую на планете электрическую энергию.

Количественное описание этого явления дается законом электромагнитной индукции, в соответствии с которым ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Существует с десяток вариаций опытов Фарадея. Установка для демонстрации наиболее простого и наглядного из них показана на рисунке 105. Выводы катушки, содержащей



Рис. 104. Майкл Фарадей

несколько сотен витков тонкого медного провода, соединены с клеммами демонстрационного вольтметра. Индукционный ток в катушке возникает каждый раз при внесении полосового магнита в жерло катушки и при последующем его вынимании из катушки.

Направление тока здесь определяется двумя факторами: полярностью магнита и направлением его движения. Если при вдвигании магнита северным полюсом стрелка вольтметра отклоняется, например, вправо, то при вынимании она отклоняется уже влево. Те же манипуляции, совершенные перевернутым магнитом, сопровождаются противоположными отклонениями стрелки.

Если же магнит покоится в катушке, то стрелка показывает отсутствие в ней индукционного тока. При возвратнопоступательных движениях магнита вольтметр регистрирует протекание в катушке переменного тока той же частоты, что и частота движений магнита.

Целесообразно также показать зависимость величины индукционного тока от скорости изменения вызвавшего его магнитного поля. Для этого сначала магнит в катушку вставляют и вынимают быстро и часто, а затем медленно и редко. При этом видно, что максимальные отклонения стрелки в первом случае значительно больше, чем во втором.

Затем можно провести опыт с двумя одинаковыми магнитами. Эти магниты надо сложить вместе и, как ранее, двигать их в катушке. Тогда стрелка вольтметра либо отклоняется на больший, чем прежде, угол, либо вовсе не отклоняется. Здесь результат зависит от того, как магниты располагаются относительно друг друга. Если магниты сложены одноименными полюсами, то магнитные потоки от них складываются, и тогда в катушке индуцируется увеличенный ток. А когда магниты сложены разноименными полюсами, их совместный магнитный поток циркулирует лишь в теле самих магнитов, не выходя из них и не пронизывая витки катушки, что и обуславливает отсутствие в ней индукционного тока.

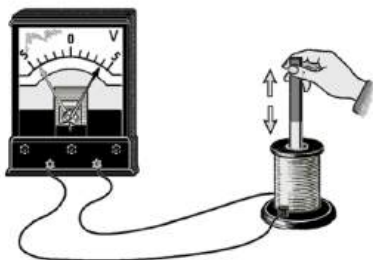


Рис. 105. Опыт Фарадея с постоянным магнитом

В качестве катушки удобно использовать первичную обмотку разборного учебного трансформатора. Вместо магнитов в жерло катушки можно также вставлять и вынимать

катушку меньшего диаметра, питаемую через выключатель и реостат от источника постоянного тока.

Индукционный ток возникает и в случае, когда малая катушка располагается неподвижно в жерле большой катушки. Для этого надо вложить в большую катушку малую, а изменения магнитного поля осуществлять с помощью выключателя. Тогда каждое включение-выключение тока в малой катушке отмечается соответствующим всплеском индукционного тока в большой катушке.

Наконец, ток в большой катушке можно индуцировать от покоящейся в ней малой катушки с током при изменении индуктивности последней. Для этого достаточно периодически вкладывать в малую катушку и вынимать из нее стальной сердечник так же, как это делается с постоянным магнитом.

ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Из опытов Фарадея следует, что направление индукционного тока в контуре зависит от того, возрастает или убывает магнитный поток, пронизывающий витки катушки, а также от направления вектора индукции магнитного поля относительно контура. Общее правило, позволяющее определить направление индукционного тока в контуре, было установлено в 1833 г. Э. Х. Ленцем.

Правило Ленца гласит: индукционный ток в замкнутом контуре направлен так, что созданный им магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать то изменение магнитного потока, которым вызван данный ток.

Демонстрируют это правило с помощью двух алюми-



Рис. 106. Эмилий Ленц

евых колец, симметрично закрепленных на концах коромысла, опирающегося на острие иглы. Одно кольцо целое и является собой замкнутый контур, а другое, с разрезом, – разомкнутый контур.

Если в покоящееся целое кольцо внести постоянный стержневой магнит (рис. 107), то это кольцо будет отталкиваться от магнита, стремясь сохранить прежнее состояние, характеризовавшееся отсутствием в нем магнитного поля. В результате этого взаимодействия коромысло приходит во вращательное движение. Если же из неподвижного целого кольца с удерживаемым внутри него магнитом этот магнит вынимать, то кольцо движется следом, что также приводит к раскручиванию коромысла. Результат эксперимента не зависит от того, каким полюсом магнит обращен к кольцу.



Рис. 107. Демонстрация опыта на правило Ленца

Отталкивание и притяжение целого кольца объясняется появлением в нем индукционного тока при изменениях пронизывающего это кольцо магнитного потока (явление электромагнитной индукции) и силовым действием на этот ток поля магнита (проявление силы Ампера). В соответствии с правилом Ленца при вдвигании магнита в кольцо индукционный ток в нем направлен так, чтобы действующая на кольцо сила Ампера отодвигала кольцо от магнита. При этом индукция поля кольцевого тока противоположна индукции поля магнита.

Вращением рукоятки редуктора приводят магнит в быстрое вращение. Вслед за магнитом начинает вращаться и диск. Если диск и магнит расположены соосно, то направления их вращений одинаковы. Если же магнит вращают, сдвинув его к краю диска, то направления вращений магнита и диска противоположны.

Для лучшей видимости существенных деталей опыта магнит следует располагать по отношению к диску со стороны зрителей. В противном случае диск будет заслонять собой магнит. В ходе демонстрации целесообразно пару раз сменить направление вращения магнита.

ТОРМОЖЕНИЕ МАЯТНИКА

Экспериментальная установка собирается на базе учебного трансформатора. На сердечник ставят две одинаковые катушки, соединенные последовательно меж собой так, чтобы их магнитные потоки совпадали. Верхняя часть сердечника состоит из двух стальных насадок, между которыми образован зазор шириной 10–12 мм. Поверх сердечника крепится маятник, грузом для которого является одна из двух съемных дюралюминиевых пластин. Одна пластина сплошная, а другая с прорезями (рис. 109). Пластина в процессе колебаний должна свободно перемещаться в зазоре сердечника. Питание катушек производится от источника постоянного тока напряжением 10–12 Вольт.

Сначала показывают 20–30 свободных колебаний маятника со сплошной пластиной в отсутствие магнитного поля (источник питания выключен). Затем включают источник, маятник отклоняют от положения равновесия и отпускают. В этот раз маятник останавливается, совершив лишь 1–2 колебания, что свидетельствует о его сильном торможении в зазоре электромагнита.

Эффект тормозящего действия магнитного поля затем демонстрируют на пластине с прорезями при прежних условиях.

При вынимании же магнита из кольца оно следует за ним, поскольку в этом случае индукция поля кольцевого тока и индукция поля магнита направлены одинаково.

Аналогичные манипуляции, проделанные магнитом по отношению к кольцу с прорезью, никакого влияния на это кольцо не оказывают, поскольку в незамкнутом кольце электрический ток не индуцируется.

РАСКРУТКА ДИСКА

В опыте демонстрируется силовое воздействие вращающегося магнита на массивный проводник вследствие амперовского взаимодействия поля магнита с индуцированными им же в проводнике токами Фуко.

Алюминиевый диск (рис. 108) установлен в штативе так, что он может свободно вращаться вокруг оси, проходящей через его центр. Поднеся к диску подковообразный магнит, показывают, что диск к магниту не притягивается. Затем магнит крепят в установленном на штативе редукторе и располагают близ диска так, чтобы его полюса находились на расстоянии 5–10 мм от поверхности диска.



Рис. 108. Раскрутка диска вращаемым магнитом

В этом случае маятник останавливается, совершив уже 5–6 колебаний. То есть магнитное поле на пластину с прорезами оказывает меньшее тормозящее действие, нежели на сплошную пластину, поскольку прорезы в пластине частично препятствуют протеканию в ней вихревых токов Фуко.

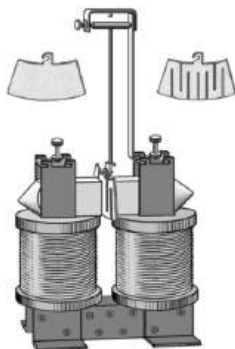


Рис. 109. Демонстрация торможения маятника токами Фуко

ЗАВИСАНИЕ КОЛЬЦА

Экспериментальную установку для демонстрации этого опыта собирают из деталей учебного сборного трансформатора. В катушку (первичную обмотку трансформатора) вставляют брусок для замыкания трансформаторного магнитопровода, а на него ставят второй такой же брусок. Еще требуется массивное алюминиевое кольцо в форме тороида, которое можно свободно надеть на образованный брусками столбик (рис. 110).

Катушку включают в сеть переменного тока напряжением 220 Вольт, а на столбик надевают и отпускают кольцо. Это кольцо, вопреки ожиданиям, вниз на катушку не падает, а за-

висает над ней без видимой опоры. Можно на кольцо надавить сверху пальцами и прижать его к катушке. Однако после отпускания кольцо поднимается вверх и висает, как и прежде, над катушкой.

Демонстрируемое явление обусловлено амперовским взаимодействием переменного магнитного поля катушки с протекающим в кольце электрическим током, индуцированным этим полем.

При отключении питания катушки кольцо, естественно, падает вниз.

Поскольку активное сопротивление кольца незначительно ввиду малости удельного сопротивления его материала и большой площади его поперечного сечения, то величина индукционного тока в нем весьма велика.

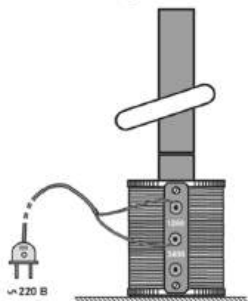


Рис. 110. Демонстрация зависания кольца в магнитном поле

Это обстоятельство вызывает ощутимый разогрев кольца в ходе эксперимента выделяющимся в нем джоулевым теплом.

ЛЕВИТАЦИЯ КАТУШКИ

Катушка намотана на плексигласовом каркасе в форме плоского кольца. Его наружный диаметр 18 см, внутренний диаметр 11 см, высота 2 см. Электропитание катушки производят от источника переменного (50 Гц) тока, выходное напряжение которого можно плавно регулировать в ходе опыта в пределах от 0 до 220 Вольт.

Катушку кладут на массивный алюминиевый диск диаметром 32 см. Основание диска плоское, толщина его центральной области 1,2 см, а периферийной – 2,5 см. Поворотом

ручки регулирования выходного напряжения источника подают ток на катушку. В результате катушка взмывает вверх и зависает над диском (рис. 111), издавая при этом характерный гул.

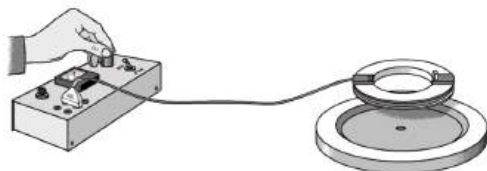


Рис. 111. Демонстрация левитации катушки с током

Как и в предыдущем опыте с зависанием кольца, наблюдаемый эффект обусловлен амперовским взаимодействием переменного магнитного поля катушки с вихревым электрическим током в диске, индуцированным этим же полем.

Чтобы во время демонстрации катушка самопроизвольно не соскальзывала в сторону, ее следует придерживать за питающий ее провод. Поскольку сила тока в катушке весьма велика, то она быстро разогревается. Поэтому продолжительность однократного включения с максимальным током в катушке не должна превышать 3–5 секунд.

«МАШИНА ВРЕМЕНИ»

Этот занятный опыт можно использовать не только, как красивую иллюстрацию явления электромагнитной индукции, но и как эффективное средство создания проблемной ситуации при изучении данного явления. «Машина» представляет собой толстостенную латунную трубу длиной 1,2 м, украшенную для привлекательности флюоресцирующим орнаментом. Объектом для «временной телепортации» служит «сильный» постоянный магнит в форме цилиндра, который может свободно перемещаться в полости трубы. Для прове-

дения опыта нужно еще одно вспомогательное немагнитное тело, размеры и форма которого такие же, как у магнита. Магнит окрашен в красный цвет, а вспомогательное тело – в голубой.

Трубу располагают над демонстрационным столом в вертикальном положении, причем её нижний конец должен находиться над столешницей на высоте 20–30 см. Для установки трубы используют лабораторный штатив, причем зажимающая трубу лапка штатива должна быть дюралюминиевой. Если же труба будет закреплена в стальной лапке, то в ходе демонстрации магнит притянется к ней и опыт не удастся.

Опыт начинают с показа обоих тел: красного и голубого. Касанием тел о трубу, демонстрируют, что между трубой и каждым из этих тел нет заметного силового взаимодействия.

Затем, поочередно просунув каждое из этих тел в полость трубы, но, не выпустив их из руки, показывают, что эти тела могут свободно (с зазором) входить в трубу.

Сначала в верхнее отверстие трубы вставляют и отпускают голубое тело. Через доли секунды оно, пролетев сквозь трубу, выпадает из ее нижнего отверстия. Продолжительность падения этого тела в трубе такая же, как при его свободном падении вне трубы.

Затем в трубу опускают красное тело (рис. 112). И лишь спустя четыре секунды это тело медленно «выползает» из нижнего отверстия. Продолжительность перемещения в трубе красного тела приблизительно в восемь раз больше, чем у голубого тела!



Рис. 112. Падение магнита в трубе

Причиной медленного падения магнита в трубе является электромагнитная индукция. Сначала магнит движется с ускорением под действием лишь силы тяжести. Но, как только он стал двигаться в трубе, в толще ее стенок индуцировался вихревой электрический ток (ток Фуко). В соответствии с правилом Ленца этот ток направлен так, чтобы образуемое им магнитное поле воспрепятствовало (силой Ампера) изменению (сначала возрастанию, а затем убыванию) породившего его поля магнита. Таким образом, магнит в трубе движется под действием пары противоположно направленных и равных по модулю сил: силы тяжести и силы Ампера. Силой трения движущегося магнита о воздух можно пренебречь.

Поскольку результирующая действующих на магнит сил равна нулю, то, в соответствии с первым законом Ньютона, магнит в трубе перемещается с постоянной скоростью, приобретенной в начале движения. Величина этой скорости определяется рядом факторов, наиболее значимые из которых: плотность материала магнита, величина его магнитного потока, толщина стенок трубы и удельное электрическое сопротивление материала, из которого она изготовлена.

Следует упомянуть, что силовое взаимодействие магнита и трубы возникает лишь при их относительном перемещении. Если же они неподвижны, то взаимодействия между ними нет. Именно поэтому в начале опыта притрагиваются магнитом к трубе, демонстрируя отсутствие видимого взаимодействия между ними. Поэтому наблюдатель, не знакомый с явлением электромагнитной индукции, вряд ли догадается, что красное тело является магнитом.

ТРАНСФОРМАТОР ТОМСОНА

Этот прибор назван именем его изобретателя – американского инженера Элиа Томсона – одного из основателей «Американской Электрической Компании», преобразованную впоследствии в компанию «Дженерал Электрик».

Демонстрационный прибор собирают из деталей учебного разборного трансформатора. В жерло первичной обмотки этого трансформатора вставляют накладной брусок для замыкания трансформаторного магнитопровода. На торец бруска ставят другой такой же брусок так, чтобы эти бруски образовали столбик. Вторичной обмоткой трансформатора служит катушка, размещенная на фанерном кольце с ручкой (рис. 113). Нагрузкой трансформатора является закрепленная на том же кольце миниатюрная лампочка накаливания с номинальным напряжением питания 3–6 Вольт.

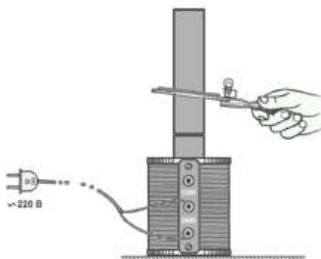


Рис. 113. Трансформатор Томсона

При подаче на первичную обмотку переменного напряжения от сети 220 Вольт, 50 Герц в сердечнике образуется переменный магнитный поток. При надевании на магнитопровод вторичной обмотки в ней индуцируется переменный ток, раскаляющий нить лампочки; трансформатор работает.

Коэффициент полезного действия этого трансформатора весьма мал, поскольку магнитный поток в его сердечнике разомкнут на торцах и рассеивается в окружающем трансформатор пространстве.

ТРАНСФОРМАТОР

Трансформатор – электрическая машина, состоящая из совокупности индуктивно связанных обмоток и предназначенная для преобразования посредством электромагнитной индукции напряжения переменного тока. Конструктивно трансформатор состоит из нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, и намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из магнитомягкого ферромагнетика.

Созданию трансформатора предшествовали открытие Фарадеем в 1831 году явления электромагнитной индукции и изобретение в 1848 году Румкорфом индукционной катушки. В 1876 году П. Н. Яблочков получил патент на трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой железный стержень с намотанными на нем обмотками. Этот год считается датой рождения первого трансформатора. В 1884 году братья Гопкинсон создали трансформатор с замкнутым сердечником.

Работа трансформатора основана на двух базовых принципах. 1. Переменный электрический ток, текущий в первичной обмотке, создаёт переменный магнитный поток. 2. Изме-

няющийся магнитный поток, пронизывающий вторичную обмотку, создаёт в ней ЭДС, пропорциональную первой производной по времени от магнитного потока.

Цель демонстрации – показать устройство и работу трансформатора. Для этого используют разборный учебный трансформатор, в комплект которого входят разборный магнитопровод (сердечник) и две съемные катушки (обмотки).



Рис. 114. Павел Яблочков

Первичная обмотка рассчитана на подключение к сети переменного тока 220 вольт, а вторичная обмотка является понижающей. Необходима также лампа накаливания на 220 В мощностью 60–100 Вт в патроне и с десяток пластин какого-нибудь разобранного трансформаторного сердечника.

Демонстрация заключается в сборке трансформатора из составных частей, составлении электрической цепи, включению ее в сеть электропитания и манипуляции с сердечником (рис. 115). Первичную обмотку включают в сеть переменного тока 220 В, 50 Гц. Величину напряжения на концах первичной обмотки демонстрируют подсоединением к ним выводов лампы, которая при этом светит ярко. Затем лампу соединяют с концами вторичной обмотки. Лампа при этом светит тускло, что свидетельствует об относительно малом напряжении на концах этой обмотки.

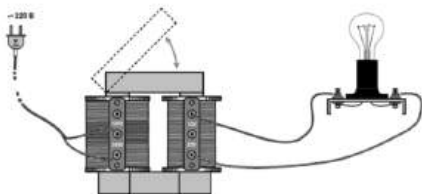


Рис. 115. Демонстрация работы трансформатора

Магнитный поток, пронизывающий обмотки трансформатора должен быть замкнут. Если же его разомкнуть, то трансформация электрической энергии нарушится. Это демонстрируют плавным накладыванием на сердечник его верхней части. Свечение лампы, подключенной к вторичной обмотке, при этом плавно меняется.

Чтобы индукционные токи не нагревали сердечник, он не сплошной. Сердечники трансформаторов для работы на низких

частотах сделаны либо из множества тонких стальных пластин, сложенных в пачки, либо из тонкой длинной ленты, смотанной в кольцо. Их также следует продемонстрировать.

КОНТАКТНАЯ ЭЛЕКТРОСВАРКА

Опыт демонстрирует преобразование трансформатором энергии электрического тока и использование ее для соединения металлических деталей. Основой сварочного аппарата является понижающий трансформатор, на первичную обмотку которого подают переменное напряжение от сети 220 Вольт, а вторичная обмотка выведена на зажимы с рукоятками (рис. 116). В нижний зажим устанавливают железный гвоздь диаметром 2 мм шляпкой вверх. Такой же гвоздь устанавливают и в верхний зажим, причем его острие должно находиться на расстоянии 3–5 мм над шляпкой нижнего гвоздя.

На первичную обмотку подают от сети электропитание, а вторичную обмотку накоротко замыкают, слегка сжав рукоятки. Острие верхнего гвоздя при этом контактирует со шляпкой нижнего гвоздя. Поскольку электрическое сопротивление контактной области существенно больше остальных участков цепи вторичной обмотки, то этот участок разогревается выделяемым в нем Джоулевым теплом, причем разогрев настолько сильный, что гвозди раскаляются докрасна.

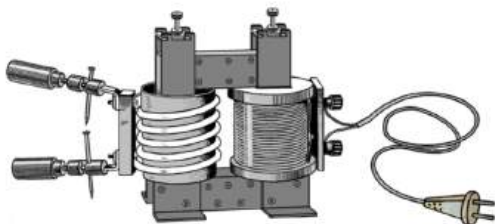


Рис. 116. Демонстрационный сварочный трансформатор

Продолжая сдавливать гвозди, дожидаются расплавления их контактирующих участков. Не разжимая рукоятки, отключают трансформатор от сети электропитания. Через 5–7 секунд после отключения, когда гвозди остынут, рукоятки отпускают. Вынув гвозди из зажимов демонстрируют наблюдателям прочность их соединения.

ЭКСТРАТОКИ ЗАМЫКАНИЯ И РАЗМЫКАНИЯ

При быстром изменении силы тока в электрической цепи, содержащей какой-либо прибор с большой индуктивностью – трансформатор, дроссель, электромагнит и пр. – в этой цепи индуцируется дополнительный ток, который, в соответствии с правилом Ленца, течет в таком направлении, чтобы воспрепятствовать этому изменению. Это происходит, например, при скачкообразном включении или выключении электропитания цепи. Такой дополнительный «сверхток» называют соответственно экстратоком замыкания или экстратоком размыкания.

Если разомкнуть цепь, по которой течёт постоянный ток, то возникший в ней экстраток размыкания потечет в том же направлении, в котором протекал в цепи ток до размыкания. Это приводит к тому, что после размыкания цепи ток в ней продолжает еще течь некоторое время, уменьшаясь постепенно.

Если же индуктивность катушки в цепи достаточно велика, то экстраток размыкания может многократно превзойти по величине прерываемый ток. Это обстоятельство способно испортить чувствительные к перегрузке элементы цепи. Появление экстратока размыкания также создает и весьма сложную техническую проблему – необходимость гашения электрической дуги, возникающей в месте размыкания.

Экстраток в цепи, содержащей индуктивность, возникает и при ее замыкании – скачкообразной подаче в нее электропитания. В этом случае экстраток замыкания течет уже

навстречу протекающему в цепи току. В результате значение силы тока в цепи после ее замыкания устанавливается также не мгновенно, а с некоторой задержкой.

Демонстрацию экстратовков замыкания и размыкания осуществляют на установке, схема которой приведена на рис. 117. Электрическая цепь содержит источник постоянного тока, дроссель и две лампы накаливания с номинальным напряжением питания 220 В и перекидной ключ. Выходное напряжение источника устанавливают на уровне 70–80 В. Дроссель представляет собой две последовательно соединенные катушки, установленные на сердечник от демонстрационного трансформатора. Номинальная мощность лампы Л1, включенной последовательно с дросселем, должна быть относительно велика, а мощность лампы Л2, наоборот, мала. Переключатель «РЕЖИМ РАБОТЫ» источника находится в положении «П СТ».

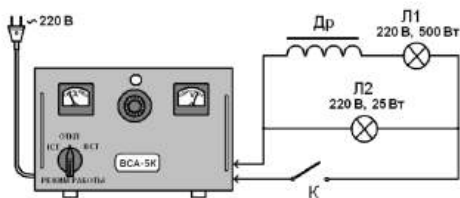


Рис. 117. Схема установки для демонстрации экстратовков замыкания и размыкания

При замыкании ключа К сразу же загорается лампа Л2, поскольку она питается от источника помимо катушки. И лишь спустя несколько секунд после этого, медленно разгорается лампа Л1, поскольку индуцированный дросселем экстраток замыкания компенсирует ток от источника при его включении.

При размыкании же цепи лампа Л2, светившая тускло из-за ее малой мощности, перед тем, как погаснуть, ярко вспыхивает. Наблюдаемая вспышка – результат кратковременного протекания по лампе экстратока размыкания, индуцированного дросселем.

А что касается лампы Л1, то кратковременное изменение ее яркости в момент размыкания незаметно, поскольку сопротивление ее спирали существенно меньше, чем у лампы Л2, что обуславливает, в соответствии с законом Джоуля-Ленца, меньшее выделение количества теплоты в ней.

ОСЦИЛЛОГРАММЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Целью данного опыта является наглядная демонстрация основных параметров, характеризующих колебательный процесс: амплитуды, частоты, фазы. Экспериментальная установка состоит из двух приборов: генератора гармонических сигналов и электронного осциллографа.

Демонстрацию осциллограмм целесообразно предварить объяснением принципа осциллографирования переменных электрических сигналов. Для этого сначала показывают на экране осциллографа медленно (со скоростью 2 см/с), перемещающееся слева направо электронное пятно. Вход осциллографа при этом должен быть «заземлен», а ручка управления горизонтальной разверткой луча установлена в положение «0,5 s/sm». Периодическими поворотами ручки «смещение луча вверх-вниз» на панели осциллографа показывают соответствующее смещение луча при той же скорости его горизонтальной развертки.

Затем развертку луча ставят в положение «1 ms/sm», а на осциллограф подают от генератора синусоидальное напряжение частотой 400–500 Гц. При этом на экране по всей его высоте должно отобразиться 2–3 периода синусоиды

К микрофону подносят камертон, причем открытая сторона его деревянной резонаторной коробки должна располагаться в непосредственной близости от микрофона. Ударив резиновым молоточком по камертону, возбуждают его продолжительное звучание. В это время на экране отображается осциллограмма синусоидальной формы. Громкость звучания камертона со временем постепенно снижается, соответственно уменьшается и амплитуда отображаемой на экране осциллограммы.

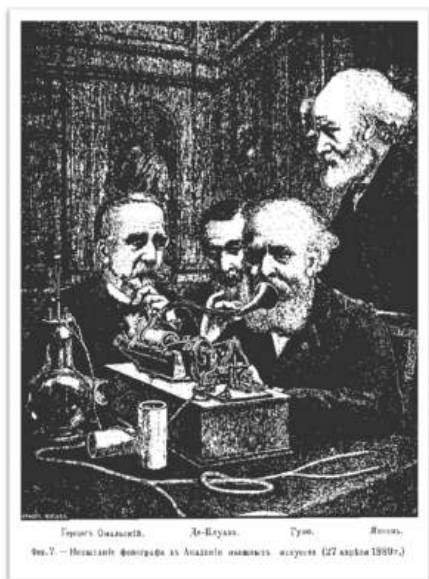


Рис. 119. Иллюстрация из старинной научно-популярной книги

(рис. 118 а). Усиление и другие настройки осциллографа должны быть предварительно отрегулированы.

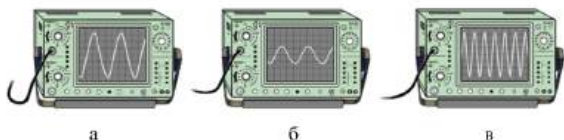


Рис. 118. Осциллограммы различных гармонических колебаний

Регулируя амплитуду сигнала на выходе генератора, демонстрируют соответствующее изменение высоты отображаемой осциллограммы (рис. 118 б). Увеличение же и уменьшение частоты этого сигнала отображается соответствующим сгущением (рис. 118 в) и разрежением осциллограммы.

Для показа изменений фазы отображаемых колебаний достаточно поворачивать вправо-влево ручку горизонтального смещения луча на панели осциллографа. При этом осциллограмма соответственно смещается по экрану, что можно интерпретировать, как изменение начальной фазы наблюдаемых колебаний.

Если данный опыт предполагается демонстрировать перед большой группой учащихся, то целесообразно использовать видеопроекционное оборудование для трансляции увеличенного изображения лицевой панели осциллографа на настенный экран. Демонстрацию можно разнообразить показом осциллограмм периодических сигналов треугольной и прямоугольной формы.

ОСЦИЛЛОГРАММЫ ЗВУКОВ

Этот опыт целесообразно показывать после демонстрации осциллограмм переменного тока, представленной выше. Вход осциллографа должен быть соединен с выходом микрофона.

Затем демонстратор подносит микрофон ко рту и нараспев произносит гласные звуки: «а-а-а-», «о-о-о-», «и-и-и-...», подбирая при этом такую тональность звучания, чтобы отображаемые на экране осциллограммы были устойчивы.

В опыте целесообразно использовать камертон, звучащий на частоте 440 Герц; горизонтальную развертку осциллографа установить в положение «1 ms/sm».

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ

Однократно возбужденные электромагнитные колебания в колебательном контуре со временем затухают ввиду диссипации энергии этих колебаний. Энергия расходуется преимущественно на нагрев катушки и соединительных проводов. Убывание амплитуды колебаний напряжения на обкладках конденсатора (или силы тока в катушке) имеет экспоненциальный характер. Данный опыт призван продемонстрировать характер временного затухания колебаний в колебательном контуре с помощью осциллографа.

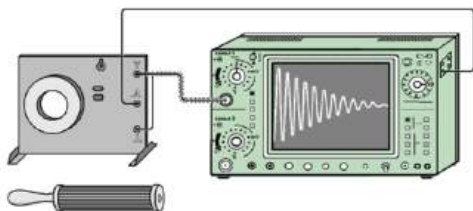


Рис. 120. Демонстрация затухающих колебаний

Контур состоит из многовитковой катушки и конденсатора, установленных на небольшом стенде. На рисунке 120 представлена схема соединений в демонстрационной установке. Параметры контура можно произвольно регулировать,

изменяя как емкость конденсатора, так и индуктивность катушки. Колебания в контуре возбуждаются кратковременными импульсами напряжения от генератора развертки, подаваемыми с боковой панели осциллографа.

Опыт заключается в представлении осциллограммы затухающих колебаний в контуре и изменений в ней при изменениях емкости и индуктивности контура. Емкость регулируется подключением-отключением (с помощью тумблера) дополнительного конденсатора, а индуктивность – внесением в жерло катушки ферромагнитного сердечника. Сердечник же представляет собой множество собранных в пучок стальных прутков. В зависимости от соотношения указанных параметров количество отображаемых на экране колебаний может изменяться от трех десятков до двух-трех колебаний.

ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Катушка (соленоид, дроссель, контур, обмотка, ...) оказывает электрическое сопротивление протекающему по ней переменному току. Величина этого сопротивления, именуемого индуктивным сопротивлением, равна произведению циклической частоты текущего по катушке переменного тока и ее индуктивности. В отличие от сопротивления проводников (активное сопротивление), индуктивное сопротивление не обуславливает выделение джоулевого тепла. Целью опыта является демонстрация зависимости сопротивления катушки от величины ее индуктивности.

На рисунке 121 представлена схема демонстрационной установки, содержащей сердечник разборного учебного трансформатора с его первичной обмоткой и лампу накаливания мощностью 60–100 Вт. Обмотка и лампа соединены в цепь последовательно; перемычка магнитопровода лежит в стороне.

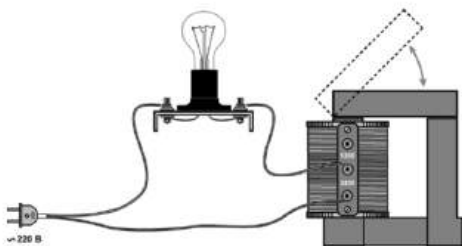


Рис. 121. Схема демонстрации индуктивного сопротивления

Подключив установку к сети переменного тока 220 В, 50 Гц, демонстрируют яркое свечение лампы. Затем переключку кладут сверху на сердечник, лампа при этом перестает светить, что свидетельствует о значительном уменьшении силы тока, текущего по цепи. Плавно поднимая и опуская переключку, демонстрируют соответствующее увеличение и уменьшение свечения.

Поскольку при наложении переключки индуктивность катушки возрастает, то соответственно увеличивается и ее индуктивное сопротивление. А это обстоятельство приводит к уменьшению силы тока в цепи и соответствующему уменьшению накала спирали лампы.

ЕМКОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Постоянный ток через конденсатор течь не может, поскольку его обкладки разделены диэлектриком. Если же конденсатор включен в цепь с источником переменного тока, то сила тока в цепи будет иметь определенное значение, величина которого зависит от свойств, как конденсатора, так и источника. В цепи переменного тока конденсатор ведет себя подобно проводнику, оказывая току электрическое сопротивление, величина которого обратно пропорциональна емкости

конденсатора и циклической частоте переменного тока. Оказывая переменному току сопротивление, конденсатор, в отличие от проводника, джоулевого тепла не выделяет.

В данном опыте демонстрируется зависимость сопротивления конденсатора переменному току от его емкости. На рисунке 122 представлена схема демонстрационной установки, которая состоит из конденсаторной батареи и соединенной с ней последовательно лампы накаливания мощностью до 60 Вт. Емкость батареи можно произвольно менять в пределах от 0,5 мкФ до 50 мкФ. Свет в помещении должен быть приглушен.

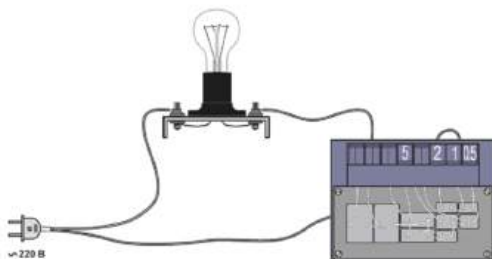


Рис. 122. Схема демонстрации емкостного сопротивления

Установку включают в сеть 220 В, 50 Гц при нулевой емкости батареи; спираль лампы при этом не светится. Нажав на первую клавишу батареи, устанавливают ее емкость, равной 0,5 мкФ. Это вызывает едва заметное свечение спирали. Затем, подняв первую и одновременно опустив вторую клавишу, устанавливают емкость батареи, равной 1 мкФ; в результате яркость свечения лампы заметно возрастает. Далее, манипулируя клавишами, постепенно увеличивают емкость батареи до достижения наибольшей светимости лампы.

Возрастание яркости свечения лампы объясняется увеличением силы тока, протекающего через нее. Ток же увеличивается в соответствии с законом Ома, как следствие увеличения емкости конденсаторной батареи и соответственно уменьшения ее сопротивления.

Способность конденсатора оказывать сопротивление переменному току часто используют для включения через него относительно низковольтных (6–40 В) электроприборов (паяльник для радиомонтажных работ, миниатюрная лампочка, маломощный электродвигатель и др.) в промышленно-бытовую электросеть напряжением 220 В.

РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Резонанс напряжений, или последовательный резонанс, наблюдается, когда генератор переменной ЭДС нагружен на последовательно соединенные катушку и конденсатор. От одновременного действия этих реактивных элементов в электрической цепи происходит компенсация (взаимное уничтожение) сдвига фаз между током и напряжением. Полная же компенсация сдвига фаз наступает, когда сопротивление катушки оказывается равным сопротивлению конденсатора.

Цепь в этом случае ведет себя так, как будто в ней нет ни катушки, ни конденсатора, а ее сопротивление определяется лишь сопротивлениями соединительных проводов и провода катушки. При этом действующие напряжения, как на катушке, так и на конденсаторе, оказываются равными и (при малом активном сопротивлении цепи) многократно превышают ЭДС генератора.

Подобно этому можно, раскачивая тяжелые качели легкими движениями руки с частотой, равной собственной частоте качелей, постепенно довести амплитуду их колебаний до значительной величины, во много раз превышающей амплитуду колебаний руки, играющей роль генератора.

Большие напряжения на катушке и на конденсаторе образуются за счет постепенного накопления энергии в контуре в

процессе возникновения в нем колебаний. Их амплитуда нарастает до тех пор, пока энергия, даваемая генератором, не сравняется с ее расходом на активном сопротивлении контура. Далее контур потребляет от генератора небольшую мощность, необходимую лишь для восполнения ее потерь на нагрев проводов.

Явление резонанса напряжений используют при передаче и приеме радиосигналов. Например, антенный контур радиопередатчика настраивают на резонанс напряжений для того, чтобы ток в антенне был максимальным. Тогда дальность действия передатчика будет наибольшей. Входной контур приемника также настраивают на резонанс напряжений для того, чтобы получить усиление напряжения сигналов той радиостанции, на частоту которой настроен контур. Сигналы же других радиостанций, частоты которых отличаются от резонансной частоты приемного контура, усиливаются незначительно.

Демонстрацию резонанса напряжений удобно осуществлять с помощью стенда, схема которого представлена на рис. 123. На лицевой поверхности выносной вертикальной панели установлено три одинаковых большеразмерных вольтметра. Коммутация электрической цепи соединительными проводами осуществлена на тыльной стороне панели.

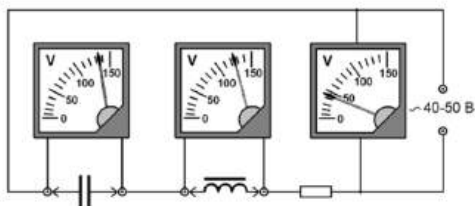


Рис. 123. Схема панели для демонстрации резонанса напряжений

К клеммам, расположенным на лицевой стороне панели, подсоединяют согласно схеме дроссель индуктивностью 1,84 Гн и регулируемую конденсаторную батарею с установленной емкостью 5,5 мкФ. В качестве генератора переменного ЭДС используют лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), настроенный на выходное напряжение 40–50 Вольт, включенный в промышленно-бытовую электросеть (220 В, 50 Гц).

При подаче электропитания на панель показания вольтметров на стенде устанавливаются на значениях, приведенных на рисунке. Внимание наблюдателей акцентируют на том, что напряжение на концах дросселя, а равно и напряжение на конденсаторной батарее, в несколько раз превышает напряжение во всей цепи.

РЕЗОНАНС ТОКОВ

Резонанс токов, или параллельный резонанс, получается, когда генератор переменного тока нагружен на катушку и конденсатор, соединенные параллельно. Условия получения резонанса токов такие же, как и для резонанса напряжений: равенство собственной частоты колебаний контура и частоты генератора и равенство реактивных сопротивлений катушки и конденсатора.

По своим свойствам резонанс токов подобен резонансу напряжений. Действующие значения токов в катушке и конденсаторе оказываются равными и значительно превышают величину тока от генератора. Большой ток, циркулирующий в контуре, возникает за счет мощного импульса тока от генератора в момент включения, когда заряжается конденсатор.

О применении явления. Так как при резонансе контур оказывает внешнему переменному току значительное сопротивление, то и падение напряжения на нем максимально. Это свойство контура называют избирательностью, а используется оно в радиоприемниках для выделения сигнала той или иной радиостанции. Резонанс токов используют также в полосовых фильтрах в качестве электронной «пробки», задер-

живающей определенную частоту. Кроме того, колебательный контур, работающий в режиме резонанса токов, является одним из основных узлов электронных генераторов.

Демонстрацию резонанса токов осуществляют на стенде, схема которого представлена на рис. 124. На вертикальной панели установлено три большеразмерных амперметра. Коммутация электрической цепи соединительными проводами осуществлена на тыльной стороне панели.

К клеммам на лицевой стороне панели подсоединяют согласно схеме отдельные катушку и конденсатор. В качестве катушки используют вторичную, понижающую обмотку учебного трансформатора, в жерло которой вставлена перемычка сердечника того же трансформатора. Емкость конденсатора составляет 200 мкФ. Источником переменного тока является лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), установленный на выходное напряжение 50–60 Вольт, включенный в промышленно-бытовую электросеть (220 В, 50 Гц). При подаче электропитания на панель показания амперметров на стенде устанавливаются на значениях, показанных на рисунке. Внимание наблюдателей обращают на то, что сумма токов, текущих через катушку и через конденсатор, в несколько раз превышает величину втекающего в них тока.

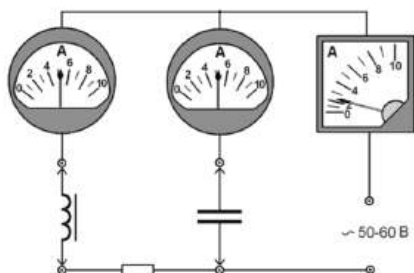


Рис. 124. Схема панели для демонстрации резонанса токов

ОДНОФАЗНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Понятие «фаза» в электротехнике имеет два значения: первое – аргумент синусоидально изменяющейся величины, измеряемый в градусах или радианах, второе – часть многофазной системы электрических цепей. Электрические цепи, в зависимости от количества фаз, называют однофазными, двухфазными, трехфазными, шестифазными и т. п.

Генератор переменного тока – это машина для получения электродвижущей силы в результате процесса электромагнитной индукции. Основными частями генератора являются: индуктор – магнит или электромагнит, создающий магнитное поле, и якорь – обмотка, в которой при изменении магнитного потока возникает индуцированная ЭДС. Также имеются контактные кольца и скользящие по ним контактные пластинки (щетки), через которые снимается эта ЭДС.

Вращаемую часть называют ротором генератора, а неподвижную часть – статором. Можно, наоборот, вращать индуктор, а якорь оставлять неподвижным. Таким образом, как ротор, так и статор могут исполнять роль индуктора или роль якоря. Если генерируемый ток достигает большой величины, то его удобнее снимать с неподвижных катушек, поскольку в этом случае не требуются скользящие контакты. Поэтому в больших промышленных генераторах якорем является статор, а индуктором – ротор, причем индуктор выполняют в виде электромагнита. Мощность современных генераторов достигает огромной величины – до 400 МВт в одной машине.

В используемой учебной модели генератора (рис. 125) ЭДС индуцируется при вращении якоря в поле индуктора, то есть якорь здесь является ротором, а индуктор – статором. Якорь вращается посредством шкива от вращаемого рукой махового колеса. Все элементы модели смонтированы на едином основании.

ТРЕХФАЗНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Трёхфазные электрические цепи – наиболее распространенные в современной электроэнергетике. Это объясняется рядом их преимуществ по сравнению с однофазными цепями: экономичностью производства и передачи энергии, равномерностью механической нагрузки на генераторы, что увеличивает



*Рис. 126. Михаил
Долливо-Добровольский*

срок их службы, простотой получения кругового вращающегося магнитного поля в электродвигателях, возможностью получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного, меньшей пульсацией выпрямленного тока, меньшей материалоёмкостью трансформаторов и силовых кабелей.

Трёхфазная система была предложена в 1891 г. конструктором электротехнической компании Эдисона Михаилом Долливо-Добровольским, кото-

рый разработал все основные звенья этой системы – генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, двигатели.

Демонстрационная модель трёхфазного генератора отличается от модели однофазного генератора количеством и размещением обмоток якоря. Во-первых, они расположены на статоре, а именно на внутренней поверхности корпуса генератора и, во-вторых, их три пары, и расположены они симметрично с угловым расстоянием 120° . Цилиндрический постоянный магнит (ротор) приводят во вращение посредством ременной передачи от махового колеса, установленного на пьедестале генератора.

В качестве нагрузки для вырабатываемых генератором ЭДС используются панели с шестью миниатюрными лампами

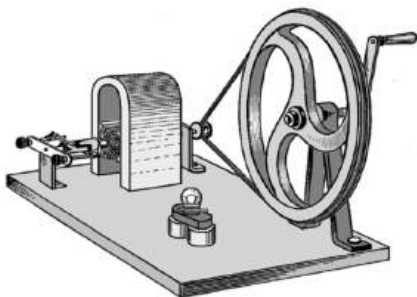


Рис. 125. Модель однофазного электрогенератора

При демонстрации опыта маховое колесо сначала вращают медленно, чтобы наблюдатели зафиксировали прерывистость горения лампочки и синхронность частоты ее вспышек с частотой вращения якоря. Также следует обратить внимание на то, что при малой скорости вращения якоря лампочка светит тускло. Аудитория во время демонстрации должна быть притемнена.

Скорость вращения якоря постепенно увеличивают. Это сопровождается, во-первых, возрастанием частоты вспышек лампочки и, во-вторых, заметным повышением яркости ее свечения. Если частота вспышек пропорциональна скорости вращения якоря, то рассеиваемая лампочкой тепловая мощность пропорциональна квадрату скорости вращения. Зависимость же наблюдаемой яркости свечения лампочки от частоты вращения якоря сложнее и зависит еще от спектральной характеристики глаза, спектра излучения спирали лампочки, а также от уровня освещенности аудитории.

накаливания номинальным напряжением 6,3 В, соединенными в одном случае «треугольником», как это показано на рисунке 127, а в другом – «звездой». Перед демонстрацией входные клеммы одной из панелей соединяют тремя проводами с выходными клеммами генератора. При вращении ротора в обмотках статора индуцируются синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, которые и вызывают свечение лампочек.

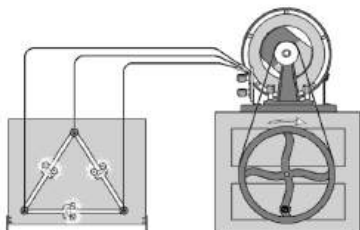


Рис. 127. Трехфазный генератор, нагруженный на соединенные «треугольником» лампы

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Асинхронный двигатель переменного тока – одна из разновидностей электрических машин, преобразующих электрическую энергию в механическую. Приоритет в создании асинхронного двигателя принадлежит Николе Тесла, который продемонстрировал его действующую модель в 1884 г. В 1889 г. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Эти изобретения открыли эру массового промышленного применения электрических машин. В настоящее время асинхронный двигатель является самой распространенной электрической машиной. Достоинствами асинхронного двигателя являются простота конструкции, легкость изготовления и отсутствие



Рис. 128. Никола Тесла

механического контакта со статичной частью машины, а недостатки ограничиваются небольшим пусковым моментом и значительным пусковым током.

Двигатель состоит из статора и ротора. Проводники статорной обмотки распределены по окружности с угловым расстоянием 120° , поэтому магнитопровод статора, периодически перемагничиваясь с изменением тока в его обмотке, создает вра-

щающееся вокруг ротора магнитное поле. Это изменяющееся поле индуцирует в роторе индукционный ток, который, взаимодействуя с породившим его вращающимся магнитным полем, создает вращающий ротор момент.

Ротор состоит из сердечника в виде стопы пластин из электротехнической стали, в пазы которого заложена обмотка. Обмотка ротора бывает двух видов: короткозамкнутая и фазная. Соответственно асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором. Короткозамкнутую обмотку зачастую называют «белчье колесо» из-за внешней схожести. Она состоит из медных стержней, замкнутых накоротко с торцов двумя кольцами. Двигатель с короткозамкнутым ротором не

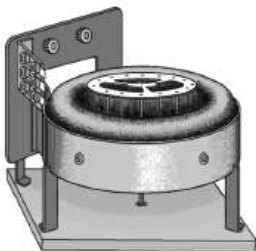


Рис. 129. Модель двигателя

имеет подвижных контактов. Фазный же ротор имеет трёхфазную обмотку, выведенную на контактные кольца, вращающиеся вместе с валом машины. Ток на обмотку фазного ротора подают через скользящие по кольцам графитовые стержни.

Двигатель называют асинхронным, потому что его ротор вращается несинхронно с полем статора, а точнее, у механически нагруженного двигателя ротор вращается медленнее вращающегося вокруг него магнитного поля, создаваемого статорной обмоткой.

Экспериментальная установка аналогична изображенной на рис. 127 и отличается от нее тем, что нагрузкой генератора является статорная обмотка электродвигателя. В полости обмотки двигателя устанавливают либо ротор с короткозамкнутой обмоткой, либо какую-нибудь легкую металлическую деталь из комплекта: прямоугольную рамку или алюминиевый цилиндр, или рамку типа «беличье колесо». Последняя изображена на рисунке 129.

Вращением рукоятки привода генератора демонстрируют вращение ротора (или одну из упомянутых выше деталей комплекта). Внимание наблюдателей обращают на то, что скорость вращения ротора двигателя заметно меньше скорости вращения ротора генератора.

При смене направления вращения ротора генератора соответственно изменяется (с некоторой временной задержкой) и направление вращения ротора двигателя.

ЛИНИЯ ЛЕХЕРА

Австрийский физик Эрнст Лехер в 1888 году разработал свой метод измерения длины радиоволн. Лехеровой линией называют пару прямых проводящих параллельных стержней, образующих короткую сбалансированную линию передачи. При подключении к концу этой линии источника высокочастотной энергии по всей ее длине образуются стоячие электромагнитные волны, как результат сложения волны,

распространяющейся от источника, с волной отраженной от короткозамкнутого конца линии. Двухпроводная лехерова линия волны излучает слабо, так как магнитные поля обоих проводников взаимно уничтожаются из-за противоположных направлений токов в них.

Напряжение в линии падает до нуля в узлах, расположенных на расстоянии, кратном половине длины волны от конца линии. Максимумы напряжения, называемые пучностями, расположены в серединах промежутков между узлами. Поэтому для определения длины волны находят места расположения в линии двух последовательных пучностей (или узлов) и измеряют расстояния между ними. Тогда длина волны равна удвоенному значению этого расстояния.

Для нахождения же в линии пучностей по ее стержням передвигают скользящие контакты регистрирующего прибора, например, индикаторной лампочки или вольтметра. Сегодня длину электромагнитных волн измеряют более совершенными методами, лехеровы же линии применяют в качестве резонансных контуров, в узкополосных фильтрах и в устройствах согласования импедансов на частотах, лежащих между КВ и УКВ диапазонами.

На рисунке 131 представлена демонстрационная линия Лехера. Левый конец линии вставлен в выходные клеммы высокочастотного генератора, а правый конец накоротко замкнут переключкой. Генератор питается через адаптер от сети 220 В. Индикатором служит миниатюрная лампочка накаливания, установленная на коробке со скользящими контактами.



Рис. 130. Эрнст Лехер

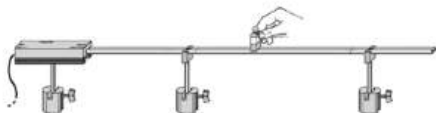


Рис. 131. Демонстрация стоячей волны на линии Лехера

Для обнаружения местоположений волновых пучностей и узлов коробку с лампочкой перемещают по всей длине линии, слегка прижимая ее к стержням. В местах, где лампочка светит наиболее ярко, располагаются пучности. Соответственно, посередине между парой соседних пучностей находятся узлы. Измерив расстояние между парой соседних пучностей и умножив это расстояние на 2, получают длину электромагнитной волны в линии. Для наглядности и удобства измерений целесообразно положить под линию метровую деревянную линейку с заметными наблюдателям сантиметровыми делениями.

СВОЙСТВА РАДИОВОЛН УКВ ДИАПАЗОНА

В 1885–89 годы профессор физики технического университета города Карлсруэ Генрих Герц провёл свои знаменитые опыты по беспроводному распространению «электрической силы», доказавшие существование электромагнитных волн. Это явилось экспериментальным подтверждением электромагнитной теории Джеймса Максвелла.

Герц подробно исследовал отражение, интерференцию, дифракцию и поляризацию электромагнитных волн, показал, что скорость их распространения совпадает со скоростью распространения света, и что свет представляет собой не что иное, как разновидность электромагнитных волн. Результаты, полученные Герцем, впоследствии легли в основу развития радио, хотя сам он полагал, что его открытие не найдет какого-либо практического применения.

В данном опыте демонстрируют основные свойства электромагнитных волн метрового диапазона, излучаемых антенной типа симметричный вибратор, называемой также диполем. В такой антенне создаются стоячие волны, как и в двухпроводной линии Лехера, причем на ее концах располагаются узлы тока и пучности напряжения. Двухпроводная линия излучает радиоволны слабо, так как магнитные поля обоих проводников взаимно уничтожаются из-за противоположных направлений токов в них; у вибратора же оба проводника расположены по одной прямой и токи в них совпадают по направлению. Поэтому излучения от этих токов складываются. КПД полуволнового вибратора достаточно большой – порядка 90% и более.



Рис. 132. Генрих Герц



Рис. 133. Джеймс Максвелл

На рис. 134 а показаны силовые линии электрической (пунктирные линии) и магнитной (сплошные линии) составляющих электромагнитного поля вблизи вибратора, а на рис. 134 б – фрагмент излучаемого этим вибратором электромагнитного поля на значительном удалении. Вблизи вибратора поле магнитной индукции порождено мощной стоячей

волной и потому оно сравнительно мощное. Здесь электрическая и магнитная составляющие колеблются со сдвигом фаз 90° , а напряженность быстро убывает при удалении от вибратора.

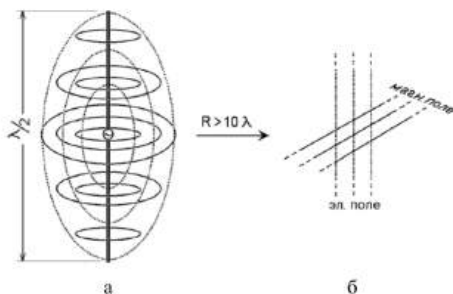


Рис. 134. Электромагнитное поле вблизи (а) вибратора и на значительном от него удалении (б)

На расстояниях же, много больших длины излучаемой волны, называемых зоной излучения (или волновой зоной, а также дальней зоной), электрические силовые линии ориентированы параллельно вибратору, а магнитные линии – перпендикулярно к нему. Здесь электромагнитное поле представляет собой бегущую волну, в которой колебания электрического и магнитного полей совпадают по фазе, энергия же между этими полями распределена поровну.

Демонстрационная установка (рис. 135) состоит из передатчика – высокочастотного двухлампового генератора с антенной-диполем длиной 100 см и приемника – приемной антенны того же типа, в разрыве которой установлена миниатюрная лампа накаливания. Штыри приемной антенны телескопические, что позволяет, произвольно изменяя их

длину, настраивать эту антенну на прием сигналов определенного передатчика. Перед демонстрацией длину приемной антенны устанавливают такой же, как и у передающей антенны.

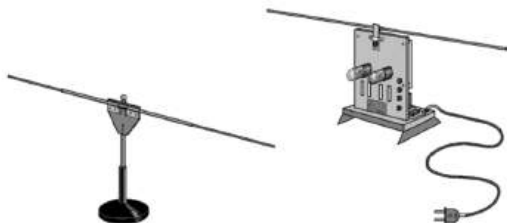


Рис. 135. Установка для демонстрации свойств радиоволн метрового диапазона

Передатчик и приемник ставят в исходное положение – на расстояние 80–100 см друг от друга, их антенны параллельны, а отрезок, соединяющий центры антенн, перпендикулярен этим антеннам. При работе передатчика в приемной антенне наводится стоячая электромагнитная волна, мощность которой достаточна для свечения индикаторной лампочки.

При удалении приемника от передатчика свечение лампочки уменьшается, а при его приближении – увеличивается. Это свидетельствует о том, что мощность поля передатчика убывает по мере удаления от него. Затем приемник таким же образом двигают с противоположной от передатчика стороны, а потом и над передатчиком, демонстрируя тем самым симметрию конфигурации электромагнитного поля в местах расположения приемника. Излучение симметричного вибратора в волновой зоне максимально в направлениях, перпендикулярных его штырям, и отсутствует на линии расположения штырей (рис. 136).

Следует иметь в виду, что регистрация радиоволн в этом опыте осуществляется в области поля индукции, диаграмма направленности которого несколько отличается от приведенной на рисунке. Поэтому давать точную характеристику напряженности поля, ориентируясь лишь на яркость свечения индикаторной лампочки, не вполне корректно.

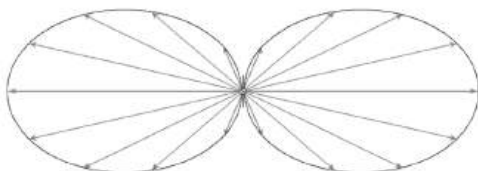


Рис. 136. Диаграмма направленности полуволнового диполя

Далее можно показать поляризацию излучаемой радиоволны, то есть асимметрию распределения напряженностей ее электрической или магнитной составляющих относительно направления ее распространения. Установку ставят в исходное положение, индикаторная лампочка должна ярко светить. Приемник плавно поворачивают вокруг проходящей через него вертикальной оси до положения, при котором его антенна расположится перпендикулярно антенне передатчика. Лампочка при этом не светит. Дальнейший поворот приемника еще на 90° приводит к свечению лампочки с прежней яркостью. Затем делают подобные повороты приемника в вертикальной плоскости и убеждаются, что при скрещенных антеннах лампочка не светит.

При объяснении эффекта следует указать, что колебания электрической составляющей радиоволны индуцируют в приемной антенне переменную ЭДС только тогда, когда штыри этой антенны располагаются вдоль линий напряженности. Поэтому свечение лампочки при условии параллельности антенн и ослабление свечения при нарушении этого условия

свидетельствует о поляризации принимаемых волн. Кроме того, наблюдаемый эффект свидетельствует еще о поперечности радиоволны, поскольку у продольных волн поляризация невозможна.

Для демонстрации способности радиоволн поглощаться электропроводящими предметами и способности отражаться от их поверхности надо воспользоваться металлическим стержнем метровой длины, в качестве которого удобно использовать металлическую указку. При внесении указки в промежуток между передающей и принимающей антеннами, как это показано на рисунке 137, свечение индикаторной лампочки ослабевает вплоть до полного гашения, когда указка находится на одном с антеннами уровне.

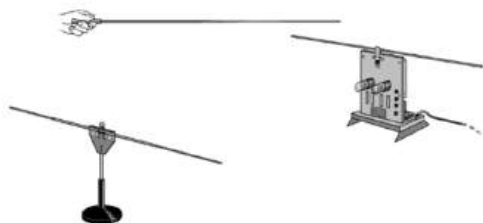


Рис. 137. Демонстрация поглощения метровых радиоволн

Если же указку расположить за пределами промежутка между передающей и приемной антеннами, но близ одной из них, то для указки можно найти такое положение, при котором лампочка светит заметно ярче, чем в ее отсутствие. Указка при этом располагается параллельно антенне, на одном с ней уровне и на расстоянии 20–30 см от нее.

Это явление объясняется тем, что на приемную антенну, помимо волны, распространяющейся непосредственно от передатчика, падает еще волна, отраженная от указки. Эти две волны, складываясь, индуцируют в антенне увеличенную

ЭДС лишь при условии их синфазности, то есть выполнения условия интерференции волн на максимум. Реализация же этого условия достигается подбором расстояния между антенной и указкой.

НАПРАВЛЕННОСТЬ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

Свойства электромагнитных волн существенно зависят от их частоты. Чем больше частота волн, или, чем короче их длина волны, тем в большей степени для них характерны лучевые свойства, рассматриваемые в геометрической оптике, а именно: направленность излучения, прямолинейность распространения в однородной среде, способность к коллимации, отражению и преломлению, возможность концентрации (фокусировки). Многие из этих свойств можно наглядно продемонстрировать с помощью радиоволн сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ волн).

Комплект для демонстрации включает СВЧ генератор, питаемый от источника постоянного тока, СВЧ приемник и регистратор (рис. 138). Генератор установлен на штативе и снабжен пирамидальной рупорной антенной. Длина волны излучаемого потока равна 3 см. Излучаемые генератором электромагнитные волны поляризованы в вертикальной плоскости (электрическая составляющая волны) и амплитудно модулированы сигналами низкой частоты 100 Гц.



Рис. 138. Демонстрация направленности радиоволн сантиметрового диапазона

Приемником радиоволн является рупорная антенна с отрезком прямоугольного волновода и установленного в волноводе детектора. Регистрация принимаемого излучения визуальная

и осуществляется с помощью осциллографа. Возможен также вариант звуковой регистрации. В этом случае выход приемника соединяется с громкоговорителем через усилитель низкой частоты. При размещении излучающей и приемной антенн напротив друг друга на расстоянии около 1,5 м амплитуда детектированных низкочастотных сигналов на выходе приемника составляет приблизительно 50 мВ.

Для проведения опыта излучающую и приемную антенны устанавливают на столе так, чтобы их раструбы были обращены друг к другу, а их продольные оси совмещены, как это показано на рисунке. При визуальном способе регистрации необходимо предварительно настроить осциллограф, подобрать усиление его входного канала и частоту развертки луча так, чтобы наблюдатели в деталях видели отображаемую осциллограмму сигналов модуляции радиоволн.

Сохраняя неизменным расстояние между излучающей и приемной антеннами, последнюю плавно уведут с оси излучающей антенны куда-нибудь в сторону, например, влево. По мере смещения приемной антенны амплитуда принимаемого ею сигнала уменьшается вплоть до полного исчезновения. При водворении антенны на прежнее место амплитуда сигнала принимает прежнее значение.

Аналогично, смещая приемную антенну вправо от оси излучаемого потока и, поднимая затем ее вверх, демонстрируют аналогичные изменения осциллограммы. Можно также показать изменения принимаемого сигнала в режиме, когда приемная антенна неподвижна, а изменяется направление излучения. Для этого нужно всего лишь плавно поворачивать излучающую антенну вправо-влево.

Наблюдаемые изменения амплитуды сигнала свидетельствуют о том, что интенсивность потока электромагнитных волн максимальна вдоль геометрической оси излучающей антенны, заметна в направлениях близ этой оси и практически отсутствует во всех иных направлениях, что позволяет сделать вывод о степени коллимации излучаемых волн.

ПРОНИКАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАДИОВОЛН

Проникающая способность электромагнитных волн радиочастотного диапазона зависит как от свойств самих волн, так и от свойств среды их распространения. В отношении первого фактора прослеживается в целом такая закономерность: чем больше частота радиоволн, тем больше их проникающая способность. Влияние же среды на распространение радиоволн значительно сложнее и является результатом комплексного воздействия множества факторов: диэлектрических и проводящих свойств среды, ее структуры, наличие в ней неоднородностей, обуславливающих свойственные волнам явления дифракции, отражения, рассеяния, поглощения.



Рис. 139. Александр Попов



Рис. 140. Гульельмо Маркони

На распространение радиоволн влияет и электромагнитная ситуация, формируемая иными источниками электромагнитных волн, например, Солнцем, активность которого проявляется в нарушающих радиосвязь магнитных бурях. Изучение подобных факторов является предметом исследований радиофизических дисциплин: радиофизики, радиоастрономии,

радиоспектроскопии, радиоэлектроники и др., в истоке которых лежат сделанные в конце 19 века изобретения Г. Герца, Н. Тесла, Г. Маркони, А. Попова и др.

Демонстрация способности радиоволн проникать сквозь препятствия является естественным продолжением предыдущего опыта. Приемную и передающую антенны (рис. 138) ставят друг против друга на расстоянии около 1 метра; на экране осциллографа при этом должен устойчиво отображаться сигнал модуляции радиоволн.

Затем перед раструбом передающей антенны последовательно ставят различные светонепроницаемые диэлектрические предметы: лист текстолита, книгу, парафиновый брусок. Амплитуда регистрируемых сигналов при этом незначительно уменьшается. Однако сам факт их регистрации свидетельствует о том, что радиоволны сквозь данные препятствия проникают свободно.

ЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН

Отражение радиоволн обусловлено изменением макроскопических параметров среды их распространения, а именно ее диэлектрической и магнитной проницаемостей. В случае отражения радиоволн от резкой (в пределах длины волны) границы протяженных объектов имеет место зеркальное отражение. На этом явлении основаны радиолокация и радиозондирование, оно используется в параболических антеннах, радиовысотомерах, ионозондах.

В экспериментальную установку входят генератор Г трехсантиметровых радиоволн и согласованный с ним приемник П (рис. 141). Сигналы модуляции радиоволн с выхода приёмника подаются на регистратор, например, осциллограф. В качестве зеркального отражателя используется установленный на штативе металлический лист размером 40 см × 50 см.

Передачик и приемник размещают на демонстрационном столе на расстоянии около одного метра друг от друга, при-

чем продольные оси их рупорных антенн должны быть взаимно перпендикулярны и располагаться в одной горизонтальной плоскости. При таком положении антенн радиоволны, испускаемые передатчиком, приемник не воспринимает, поскольку поток волн проходит мимо него.

При установке листа-отражателя в место предполагаемого пересечения осей антенн на экране осциллографа появляется осциллограмма сигналов модуляции радиоволн в виде «рваных» прямоугольных импульсов. Это значит, что лист отражает падающие на него радиоволны и, изменив направление их распространения, направляет к приемнику. Поворачивая лист (на рисунке показано пунктиром), добиваются, чтобы амплитуда отображаемых импульсов была максимальна. При этом выполняется закон отражения электромагнитных волн, заключающийся в равенстве углов падения α и отражения β . Выполнение этого условия можно показать и перемещениями приемника вокруг неподвижного листа.

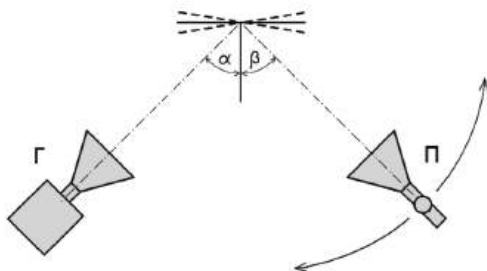


Рис. 141. Схема установки для демонстрации отражения СВЧ-волн

ПРЕЛОМЛЕНИЕ, ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ И ДЕЛЕНИЕ РАДИОВОЛН

Эти три опыта, демонстрирующие указанные свойства радиоволн, объединены в один, поскольку для их проведения используется одно и то же оборудование. Опытные установки отличаются лишь конфигурацией расположения деталей. Основным элементом является пара треугольных призм с равнобедренным прямоугольным треугольником в основании. Изготовлены призмы из цельного плексигласа, прозрачного для радиоволн, а их поверхности отполированы настолько, что они оптически прозрачны. Эти призмы, будучи приложенными друг к другу наибольшими боковыми гранями, образуют куб с ребром 19 см.

В представленных здесь опытах демонстрируются свойства сантиметровых радиоволн, присущие видимому свету и лежащие в основе геометрической оптики, а именно: частичное и полное отражение, преломление, фокусировка.

Преломление электромагнитных волн так же, как и отражение обусловлено изменением макроскопических параметров среды их распространения, а именно ее диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Демонстрацию начинают с показа приема волн в отсутствие преломляющей призмы. Излучающая и приемная антенны при этом ставятся так, чтобы их рупоры были обращены друг к другу, а их продольные оси совмещены. Расстояние между рупорами составляет 70–80 см. Усиление принимаемого осциллографом сигнала должно быть таково, чтобы сигнал устойчиво отображался по всей высоте экрана.

В середине промежутка между антеннами размещают (на подставке) призму, что приводит к пропаданию принимаемого сигнала. Перемещая по столу вокруг призмы приемную антенну, находят для нее такое положение, при котором амплитуда принимаемого сигнала наибольшая. Примерное расположение антенны генератора Г, антенны приемника П и

призмы показано на рис. 142. Проходя сквозь призму, радиоволны преломляются на ее гранях дважды: входя в призму и выходя из нее. Угол α между направлениями распространения волн в отсутствие призмы и после ее установки есть угол преломления. Величина этого угла зависит от значения преломляющего угла призмы, который равен 45° , от показателя преломления ее материала для радиоволн данной частоты (10 ГГц) и от пространственной ориентации самой призмы.

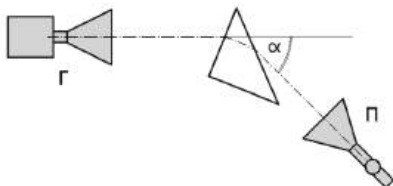


Рис. 142. Демонстрация преломления радиоволн

Для демонстрации **внутреннего отражения** электромагнитных волн используются детали предыдущего опыта (генератор, призма, приемник), но в другой конфигурации их взаимного расположения. Передатчик и приемник располагают на расстоянии 70–80 см друг от друга, причем продольные оси их антенн должны быть взаимно перпендикулярны и располагаться в одной горизонтальной плоскости.

В место предполагаемого пересечения антенных осей устанавливают на подставке призму так, чтобы рупоры генерирующей Г и приемной П антенн были направлены на малые боковые грани призмы (рис. 143). При этом волновой поток на указанные грани падает нормально, что обеспечивает устранение эффекта преломления на них радиоволн.

Проникнув в толщу призмы, волны далее падают на ее большую боковую грань под углом 45° . Поскольку предельный угол полного отражения плексигласа для применяемых в

опыте волн равен 37° , что меньше угла их падения, то они полностью отражаются от большей грани призмы и направляются в сторону приемной антенны. Призма в данном опыте, в силу эффекта полного внутреннего отражения, выполняет функцию плоского зеркала, как в ранее описанном опыте по зеркальному отражению радиоволн.

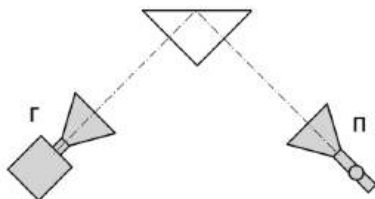


Рис. 143. Демонстрация внутреннего отражения радиоволн

Далее следует опыт, демонстрирующий **деление потока** радиоволн на два разнонаправленных потока с возможностью перераспределения между ними излучаемой передатчиком мощности. Для этого излучающую и приемную антенны ставят на единой оси, обратив рупоры друг к другу, причем расстояние между рупорами должно составлять 70–80 см. Усиление принимаемого осциллографом сигнала должно быть таким, чтобы этот сигнал устойчиво отображался по всей высоте экрана.

В середине промежутка между антеннами размещают (на диэлектрической подставке) пару призм, сложенных в куб (рис. 144). Отображаемый на экране сигнал при этом остается прежним. Призму, расположенную со стороны приемника (подвижная призма), медленно отодвигают от другой (неподвижной) призмы так, чтобы их соприкасавшиеся до этого грани оставались параллельными друг другу. По мере увеличения зазора между призмами до полутора сантиметров ам-

плитуда импульсов на экране осциллографа плавно уменьшается до нуля. При сближении же призм амплитуда сигналов на экране осциллографа растет до начального значения.

Результат этих манипуляций говорит о том, что образование зазора между призмами приводит к проявлению внутреннего отражения волн от большей грани неподвижной призмы. Когда же ширина зазора превышает 1,5 см, отражение становится полным, и весь падающий на неподвижную призму поток волн перенаправляется в сторону. Чтобы убедиться в этом, приемник перемещают из первоначального положения 1 в положение 2, воссоздав тем самым конфигурацию предыдущей экспериментальной установки. Амплитуда отображаемых на экране импульсов при этом максимальна, а при сближении призм убывает до нуля.

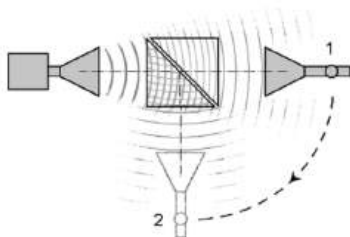


Рис. 144. Демонстрация деления потока радиоволн

Затем подвижную призму снова отодвигают на такое минимальное расстояние, при котором импульсы на экране осциллографа пропадают полностью. В образовавшийся промежуток между призмами вставляют книгу. Толщина этой книги должна быть такой, чтобы в промежуток между призмами она входила свободно, и не было зазора между нею и гранями призмы. В результате на экране вновь появляются импульсы, а при изъятии книги импульсы исчезают.

Результат последней манипуляции свидетельствует о том, что эта книга для радиоволн прозрачна, а её показатель преломления приблизительно равен показателю преломления материала призмы. Поэтому для волн границ между призмой и книгой не существует, от книги волны не отражаются и, свободно проходя сквозь нее, проникают во вторую призму. В этом можно убедиться по появлению импульсов на экране осциллографа после перемещения приёмника в положение 1.

ФОКУСИРОВКА РАДИОВОЛН

СВЧ излучатель и приемник этого излучения ставят на стол, направив их рупорные антенны навстречу друг другу. Расстояние между рупорами антенн составляет полтора-два метра. Усиление принимаемого осциллографом сигнала устанавливают так, чтобы размах осциллограммы на экране не превышал одного сантиметра.

В середине промежутка между антеннами размещают установленную на штативе плосковыпуклую собирающую линзу диаметром 40 см, изготовленную из плексигласа (рис. 145). Это приводит к десятикратному увеличению амплитуды отображаемого сигнала, что свидетельствует о фокусировке линзой падающего на нее излучения в место расположения приемника.

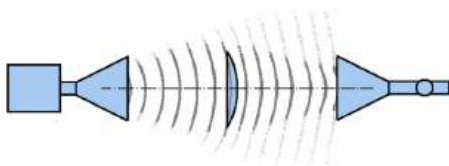


Рис. 145. Демонстрация фокусировки радиоволн

ПОЛЯРИЗАЦИЯ РАДИОВОЛН

О направлении поляризации радиоволн обычно судят по ориентации плоскости колебаний вектора напряженности их электрической составляющей, которая зависит от типа и пространственной ориентации передающей антенны. В сотовой связи используются радиоволны с вертикальной поляризацией, а в широкоэвещательном телевидении – с горизонтальной. В любом случае, для успешного установления радиоволновой связи поляризации передающей и принимающей антенн должны совпадать.

Излучение рупорной антенны СВЧ передатчика линейно поляризовано. Чтобы продемонстрировать это, передающую и принимающую антенны устанавливают на одной горизонтальной оси, разнеся их на расстояние один-два метра, направив раструбы антенн друг на друга. Сигнал с выхода принимающей антенны подают на вход усилителя вертикальной развертки осциллографа. Его усиление следует подобрать так, чтобы демонстрируемая осциллограмма отображалась по всей высоте экрана.

Приёмник вместе со штативом, на котором он установлен, приподнимают над столом и плавно поворачивают вокруг вышеназванной оси, сохраняя неизменным его направление в сторону передатчика. По мере вращения приёмника амплитуда сигналов на экране осциллографа постепенно убывает вплоть до полного исчезновения при повороте на 90° . При дальнейшем повороте приёмника от 90° до 180° амплитуда сигналов возрастает до первоначальной. Это свидетельствует о линейной поляризации принимаемых волн.



Рис. 146. Решётка-анализатор

Чтобы установить, в какой именно плоскости колеблется вектор напряженности электрической составляющей излучаемой волны, приёмник и передатчик устанавливают в исходную позицию. Принимаемый сигнал должен при этом отображаться по всей высоте экрана осциллографа. Раструб антенны передатчика прикрывают поворотной металлической решеткой (рис. 146), предварительно сориентировав ее стержни в горизонтальном положении. Размещение решетки не изменяет вид отображаемой осциллограммы.

Затем решётку поворачивают в держателе до положения, при котором ее стержни оказываются ориентированными вертикально. Это сопровождается уменьшением амплитуды регистрируемого осциллографом сигнала до нуля. При этом вся энергия падающей на решетку радиоволны расходуется на ее нагревание.

Из опыта следует, что напряженность электрической составляющей генерируемых волн колеблется в вертикальном направлении. Иначе говоря, наблюдаемые волны линейно поляризованы в вертикальной плоскости.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ РАДИОВОЛН

СВЧ передатчик и приемник разносят на расстояние один-два метра, направив их антенны друг на друга. Усиление вертикальной развертки осциллографа делают таким, чтобы подаваемый на него сигнал с выхода приемника отображался по всей высоте экрана. Если же в качестве регистратора используется не осциллограф, а громкоговоритель, то звучать он должен достаточно громко.

На передающую антенну сбоку плавно надвигают деревянный брусок размером $30 \times 10 \times 6$ см. Направление его древесных волокон при этом должно быть горизонтальным. Амплитуда регистрируемого сигнала при этом соответственно уменьшается, а в момент, когда брусок прикрывает ровно половину раструба, сигнал на экране пропадает (рис. 147).

При дальнейшем же надвигании бруска амплитуда сигнала постепенно возрастает, и в момент, когда раструб передат-

чика оказывается прикрытым полностью, осциллограмма принимает первоначальный вид. Из этого следует, что брусок с горизонтально ориентированными волокнами для СВЧ-радиоволн прозрачен.



Рис. 147. Демонстрация интерференции СВЧ радиоволн

Пропадание же сигнала в промежуточной стадии опыта обусловлено разделением излучаемого потока на два когерентных и интерферирующих на минимум потоков. Необходимая для интерференции разность фаз достигается тем, что падающая на брусок волна распространяется в нем со скоростью меньшей, чем в воздухе.



Рис. 148. Тесла демонстрирует «беспроводное электричество» (со старинной гравюры)

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

В январе 1944 года Евгений Константинович Завойский, исследуя в Казанском университете взаимодействие электромагнитного излучения микроволнового диапазона с солями металлов, заметил, что монокристалл CuCl_2 , помещенный в постоянное магнитное поле индукцией 4 мТл, поглощает электромагнитное излучение частотой около 133 МГц.

Это привело его к открытию явления электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), ставшего впоследствии исключительно чувствительным и информационным методом исследования свойств конденсированных сред на микроскопическом уровне. Метод ЭПР сегодня широко используется при изучении молекулярных и кристаллических структур, химических реакций, при решении ряда проблем в физике, химии, биологии, медицине, геологии. Открытие ЭПР стало основой создания всемирно известной Казанской школы магнитного резонанса и кафедры квантовой электроники и магнитной спектроскопии в Казанском федеральном университете.

ЭПР основан на поглощении высокочастотного излучения парамагнитным веществом, помещенным во внешнее магнитное поле. В магнитном поле у парамагнитной частицы возникает система магнитных подуровней (эффект Зеемана). Между ними под действием электромагнитного излучения возникают переходы, приводящие к поглощению фотона. Частота ν ЭПР определяется соотношением

$$h\nu = g\beta H,$$



Рис. 149. Евгений Завойский

где h – постоянная Планка, g – фактор спектроскопического расщепления, β – магнетон Бора, H – напряженность магнитного поля.

В современных ЭПР спектрометрах исследуемый образец объемом несколько мм^3 помещается в резонатор, где магнитная составляющая электромагнитной волны, имеет пучность. Резонатор располагается между полюсами электромагнита – источника магнитного поля. Резонансное условие обычно достигается изменением напряженности магнитного поля при фиксированном значении частоты генератора. Сигнал поглощения в виде типичного колоколообразного всплеска отображается на дисплее и регистрируется самописцем.

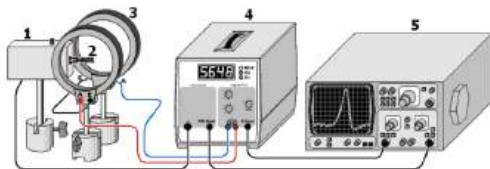


Рис. 150. Установка для наблюдения ЭПР

На рисунке 150 изображена установка для изучения ЭПР в лаборатории физического практикума.

Установка состоит из высокочастотного блока 1 со сменной радиочастотной катушкой 2, пары катушек Гельмгольца 3, блока управления 4 и осциллографа 5. Внутри радиочастотной катушки находится ампула с исследуемым парамагнетиком – порошкообразным органическим соединением дифенилпикрилгидразилом (ДФПГ). Это вещество используют в большинстве ЭПР спектрометров в качестве репера.

Магнитное поле в области образца настраивают катушками Гельмгольца, подбирая на блоке управления величины

постоянной и переменной (50 Гц) составляющих силы тока в катушках. Частоту сигнала, подаваемого на радиочастотную катушку, можно регулировать в пределах от 15 МГц до 130 МГц.

При соблюдении резонансных условий образец поглощает радиочастотную энергию, и генератор в блоке 1 нагружается. В результате изменяется сопротивление радиочастотной катушки и, соответственно, изменяется напряжение на ней. Сигнал изменения напряжения после фильтрации и усиления подается через блок управления на осциллограф и отображается на его экране.



Рустам Валиевич Даминов

**Опыты с электричеством
и магнетизмом**

Учебное пособие

Верстальщик *С. Лобанова*

Издательство «Директ-Медиа»
117342, Москва, ул. Обручева, 34/63, стр.
1 Тел/факс + 7 (495) 334-72-11
E-mail: manager@directmedia.ru
www.biblioclub.ru
www.directmedia.ru