

Цена 3 руб.

К. Н. ЕЛИЗАРОВ

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**
В КУРСЕ ФИЗИКИ
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ



УЧПЕДГИЗ
1954

К. Н. ЕЛИЗАРОВ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

В КУРСЕ ФИЗИКИ
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Ленинград • 1954

ВВЕДЕНИЕ.

Основы учения об электромагнитных колебаниях и волнах введены в курс физики средней школы относительно недавно, и в существующей методической литературе эта тема не вполне освещена.

В книге П. А. Знаменского¹ „Методика преподавания физики“ этой теме посвящены стр. 424—427. Естественно, что в книге, рассматривающей всю совокупность вопросов общей и частной методики преподавания физики, нет возможности дать методические разработки всех тем. Поэтому и в данном случае в упомянутой книге мы находим лишь очень краткие методические указания, касающиеся главным образом основного вопроса — системы построения фактического материала темы.

Сказанное полностью относится и к учебнику по методике преподавания физики И. И. Соколова (стр. 539—544).² В этом руководстве указано, что „За основу изложения можно взять VII главу электричества в курсе физики Соколова для X класса в издании 1949 г., вновь написанную проф. В. М. Шульгиным“ (стр. 539).

В книге В. А. Зибер и др. „Методика и техника демонстрационных опытов по физике“³ описаны некоторые опыты с ламповым генератором высокой частоты.

Небольшая статья В. А. Зибер в книге П. А. Знаменского и др.⁴ также касается, главным образом, экспериментальной стороны темы.

¹ П. А. Знаменский. Методика преподавания физики в средней школе. Учпедгиз, 1947.

² И. И. Соколов. Методика преподавания физики в средней школе. Учпедгиз, 1951.

³ В. А. Зибер, Ф. Н. Красиков, И. А. Челюсткин. Методика и техника демонстрационных опытов по физике. Учпедгиз, 1934.

⁴ П. А. Знаменский, В. А. Зибер, Е. Н. Кельзи, М. Ю. Пиотровский. Методика преподавания физики в 10 классе средней школы. Учпедгиз, 1935.

Помимо того, что обе указанные книги стали библиографической редкостью, содержание упомянутых статей в них сильно устарело и в ряде случаев нуждается в существенных исправлениях.

Приведенным перечнем почти полностью исчерпывается методическая литература (помимо отдельных статей в журнале „Физика в школе“), посвященная интересующему нас вопросу.

Очень серьезно и основательно изложено учение о колебаниях и волнах в книге „Элементарный учебник физики“ под редакцией Г. С. Ландсберга.¹ Материал, содержащийся в этой книге, не рассчитан на ученика средней школы, изучающего курс школьной физики в соответствии с программой Министерства просвещения и потому оказывается сложным и трудным для усвоения. Использование учителем физики этого учебника для практической работы в школе осложнено тем, что в учебнике учение о механических и электрических колебаниях и волнах объединено вместе, а в школе изучается раздельно. Однако этот учебник, будучи мало пригодным для учащихся, может служить прекрасным пособием для учителя физики, пользуясь которым он может уяснить для себя многие существенные вопросы.

Таким же хорошим пособием для учителя может служить и книга Н. П. Третьякова.² Содержащийся в ней материал, изложенный в логичной, последовательной системе, в силу необходимости, конспективен, но соответствует программе по физике для средней школы и уровню развития и знаний учащихся.

В этой книге процесс распространения электромагнитного поля рассмотрен с точки зрения теории Максвелла.

Переходя к существующему учебнику физики для средней школы И. И. Соколова,³ надо сказать, что глава „Электромагнитные колебания“, написанная проф. В. М. Шульгиным, разработана настолько неудачно (см. рецензию в журнале „Физика в школе“, № 5 за 1952 г.), что пользоваться ею невозможно.

Глава „Электрические колебания и волны“ в учебнике Г. И. Фалеева и А. В. Перышкина⁴ (издававшемся до появления учебника И. И. Соколова), сыгравшая в свое время большую положительную роль, написана конспективно (стр. 145—159) и в настоящее время нуждается в более подробном и обоснованном изложении.

¹ Элементарный учебник физики, под редакцией акад. Г. С. Ландсберга, т. III. ГИТТЛ, 1952.

² Н. П. Третьяков. Курс физики. Учпедгиз, 1952, стр. 808—830.

³ И. И. Соколов. Курс физики, ч. 3. Учпедгиз, 1950, 1951, 1952, 1953.

⁴ Г. И. Фалеев и А. В. Перышкин. Курс физики, ч. 3. Учпедгиз, 1935, 1936.

Тема „Электромагнитные колебания и волны“ является очень трудной для учащихся по следующим причинам.

Изложение материала данной темы в школьном учебнике чрезвычайно неудачно и содержит много ошибок. Сама тема, введенная в программу средней школы относительно недавно, оказалась в некоторой своей части лишенной базы, так как представления и понятия, нужные для осознанного восприятия этой темы, в предыдущем курсе физики или отсутствуют или рассматриваются недостаточно подробно. Так например, недостаточно знакомство учащихся со свойствами переменного тока, вовсе не рассматривается вопрос об емкости в цепи переменного тока. По этой же причине чрезвычайно затруднено усвоение учащимися понятия об электромагнитных волнах. Учащиеся до этого познакомились со статическим электрическим полем, а в теме „Электромагнитные колебания и волны“ встречаются с динамическим электрическим полем, о котором им ничего не известно. Отсутствие разработанной методики изложения темы часто ведет к тому, что свойства динамического электрического поля излагаются догматически, без должных объяснений, без сопоставления свойств этого нового поля с известным учащимся статическим полем.

Кроме того, в изложении этой темы в учебной литературе нередко допускаются неточности, неясности, а подчас и ошибки.

Так, например, распространение электромагнитного поля в большинстве случаев по установившейся традиции рассматривается с точки зрения Фарадея. По теории Фарадея, распространение электромагнитных колебаний осуществляется отщипыванием электрических силовых линий и последующего их передвижения. (В таком же плане излагается этот вопрос и в существующем учебнике для средней школы.) С современной точки зрения такое описание явления не соответствует истине. Кроме того, оно нередко вызывает у учащихся неверные в научном отношении представления.

Учащиеся считают, что те электрические силовые линии, которые отщипывались от диполя, и перемещаются в пространстве. Тем самым истинный процесс распространения электромагнитного поля подменяется механическим движением раз возникших силовых линий.

Рассмотрение процесса возбуждения электрических колебаний в колебательном контуре ведется обычно в таком плане, в результате которого создается неверное представление о том, что электроны в диполе совершают колебания с амплитудой, равной половине диполя. Электродвижущей силой самоиндукции, возникающей в катушке самоиндукции колебательного контура, без всяких оговорок приписывается направление, хотя, как известно, э. д. с. есть величина скалярная, а не векторная.

Можно было бы указать и на ряд других весьма существенных недочетов (о них подробнее сказано в „Методических указаниях“ для учителя, имеющихся в книге).

Сделанный выше краткий анализ существующей методической и учебной литературы и указания на неточности и ошибки, часто допускаемые в изложении материала и вызывающие затруднения у учащихся в усвоении темы „Электромагнитные колебания и волны“, свидетельствуют о необходимости дальнейшей работы как в области определения содержания фактического материала темы, так и в области методики преподавания ее. Необходимо продолжать искать методические пути, обеспечивающие изложение основ учения об электромагнитном поле в средней школе на достаточной научной базе и осознанное усвоение учащимися столь важной в мировоззренческом и научном отношении темы.

Надо определить содержание, объем и глубину материала темы, выработать методику его изложения. Не менее важным является и планирование материала темы во времени. Естественно, что решение всех этих вопросов должно быть осуществлено в соответствии с программой Министерства просвещения и с объемом, содержанием и системой построения всего предыдущего курса физики, который изучали учащиеся до этого.

Настоящая книга есть результат попытки найти в первом приближении одно из возможных решений указанных методических задач.

Книга содержит минимум тех знаний об электромагнитных колебаниях и волнах, которые нужны учителю физики для правильного освещения программных вопросов темы на уроке. В ней выделен тот материал, который должен быть дан учащимся в соответствии с программой Министерства просвещения. Вместе с тем дается возможный вариант распределения учебного материала по времени. По этому варианту на проработку темы предусмотрено 12 часов (уроков). По существующей программе на нее отводится 10 часов. Сделано это из следующих соображений. На изучение „Введения“ в отделе „Оптика и строение атома“ существующей программой отводится 2 часа учебного времени. В введение включено два вопроса: а) Понятие об электромагнитной теории света. Волна. Луч. б) Скорость света и ее экспериментальное определение.

Первый из указанных вопросов целесообразно рассмотреть в теме „Электромагнитные колебания и волны“, с которой он органически связан. В соответствии с этим время на эту тему может быть увеличено на один час, а время на „Введение“ уменьшено на столько же.

Во время написания настоящей книги был получен проект новой программы по физике,¹ который применительно к интересующей нас теме отличается от существующей программы тем, что в него включено рассмотрение электроннолучевой трубки, а время на изучение темы увеличено с 10 до 11 часов. Упомянутое нами выше „Введение“ в оптике изъято, но материал его сохранен: определение скорости света отнесено к „Распространению света“, а электромагнитная природа света — к „Волновым свойствам света“. Таким образом изменения, относящиеся к содержанию темы „Электромагнитные колебания и волны“ касаются только электроннолучевой трубки. Следовательно, если будет утверждена новая программа, необходимо будет включить в эту тему рассмотрение электроннолучевой трубки (нужный материал в книге имеется), а на изучение всей темы можно отвести 12 часов. В соответствии с этими соображениями и составлен учебный план. Если почему-либо программа останется прежней (что мало вероятно), то тогда в предложенный план нетрудно будет внести нужные изменения. Они сведутся к тому, что рассмотрение электроннолучевой трубки придется изъять, сократив время на изучение темы на один час, а очень небольшие вопросы, кроме электроннолучевой трубки (свободные и вынужденные колебания и настройка контура), отнесенные предлагаемым учебным планом к 3-му уроку, добавить к материалу 4-го и 5-го уроков.

Разумеется, что предлагаемый в книге учебный план нельзя рассматривать как директивный. Он является примерным. Возможны и другие планы. Важно только, чтобы и они (как и предлагаемый нами) отправлялись от государственной программы.

В книге приведены методические указания о том, как следует излагать некоторые наиболее существенные вопросы. Эти указания даны после соответствующих параграфов.

В приведенном в этой книге учебном плане темы указываются: а) основные вопросы, подлежащие изучению, б) параграфы книги, в которых они изложены, в) количество часов (уроков), отводимых для их изучения. В некоторых случаях материал параграфов берется не полностью, а частично. Необходимые сокращения приведены в „Методических указаниях“ после соответствующих параграфов.

Остальной материал может быть использован учителем во внеклассных занятиях.

Осуществленная в книге система построения материала темы характеризуется тем, что ознакомление учащихся с электрическими

¹ Программы средней школы. Физика и астрономия. Изд-во Акад. пед. наук РСФСР, М., 1953.

колебаниями осуществляется сначала на искровом колебательном контуре. С точки зрения современной радиотехники большой соблазн представляет ламповый генератор в качестве базы, на которой можно познакомить учащихся с электрическими колебаниями. Но для осуществления этого пути надо, чтобы учащиеся не только в теории, но и на практике достаточно хорошо изучили бы трехэлектродную электронную лампу, к чему обыкновенно в школах не имеется нужных условий ни в отношении времени, ни в отношении оборудования. Искровой генератор, в силу своей простоты, большей связи со всем прежде изученным учащимися материалом, более легко воспринимается ими. Таким образом, не только потому, что исторически первым генератором, использованным человеком, был искровой генератор, но по ряду указанных методических соображений, представляется целесообразным в основах учения об электрических колебаниях отправляться от искрового генератора, а потом уже познакомить учащихся и с ламповым генератором.

В качестве основных особенностей, характеризующих методику изложения материала темы, могут быть указаны следующие.

Сделана попытка такого расчленения сложных вопросов темы и распределения их в такой логической последовательности, которая дает возможность учащимся осознанно разобраться во всей теме.

Распространение электромагнитного поля рассматривается с точки зрения теории Максвелла — взаимосвязи электрического и магнитного полей. Изучается H (волновая) зона, которая в этой теме и представляет для нас интерес.

Распространение волн по проводам не рассматривается. Вполне свободные волны только упоминаются. Основное внимание уделено волнам, распространяющимся вдоль поверхности земли.

Физические основы радиосвязи рассматриваются в таком порядке: после описания радиоприемника Попова разбирается принцип действия радиотелеграфного приемника с когерером, затем приемника с кристаллическим детектором, чем подготавливается достаточная база для усвоения принципа работы лампового приемника.

Лампы рассматриваются двух- и трехэлектродные. В отношении детектирования — казалось наиболее целесообразным остановить выбор на диодном детектировании. Затем рассмотрен ламповый генератор и основы радиотелефонии. Из различных способов модуляции выбрана модуляция на сетку, как наиболее легко понимаемая учащимися. В конце книги даются (в соответствии с программой Министерства просвещения) сведения о радиолокации.

В заключение следует отметить, что рассматриваемая тема занимает большое и ответственное место в курсе физики средней школы. Научное и образовательное значение темы проистекает из того, что учащиеся знакомятся с основами теории электромагнитного поля. В методологическом отношении ценность темы велика потому, что, усваивая ее, учащиеся знакомятся с материей в виде электромагнитного поля, обладающего и массой и энергией, с тождественностью электромагнитных и световых волн. Не менее велико практическое значение темы, дающей учащимся физические основы радиосвязи.

ПРИМЕРНЫЙ УЧЕБНЫЙ ПЛАН ТЕМЫ.

(12 час. учебного времени).

I. Электрические колебания.

- Искровой разряд (§ 1). Электрические колебания (§ 4).
Затухающие и незатухающие колебания (§ 6) 1 час
Колебательный контур (§ 7). Высокочастотный переменный ток и его свойства (§ 8) 1 час
Свободные и вынужденные колебания. Настройка контура (§ 9). Электронный осциллограф (электроннолучевая трубка) (§10) 1 час

II. Электромагнитное поле. Электромагнитные волны.

III. Опытное исследование их.

- Линейный вибратор (§ 11). Электромагнитное поле (§ 12). Электромагнитные колебания (§ 13). Связь между электрическим и магнитным полями (§ 14). Электромагнитные волны (§ 15). 2 часа
Материальность электромагнитного поля. Энергия поля (§ 17). Экспериментальное обнаружение электромагнитных волн (§ 19). Тожественность электромагнитных и световых волн (§ 20). Настройка контуров в резонанс (§ 21). Опытное обнаружение резонанса (§ 22) 2 часа

IV. Физические основы радиопередачи.

V. Технические применения.

- Изобретение радио А. С. Поповым (§ 23). Радиотелеграфный приемник с когерером (§ 26) 1 час
Детектирование. Приемник с кристаллическим детектором (§ 27). Электронная лампа как детектор (§ 28) 1 час
Электронная лампа как усилитель. Ламповый приемник (§ 29). Ламповый генератор незатухающих колебаний (§ 31). Модуляция колебаний. Радиотелефония (§ 32). Радиолокация (§ 33) 3 часа

Примечание. Материал некоторых из приведенных в плане параграфов излагается на уроке не полностью. Необходимые сокращения оговорены в методических указаниях.

Глава I.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ.

§ 1. Искровой разряд.

Учение об электрических колебаниях зародилось на базе исследования искрового разряда. В процессе изучения курса физики X класса мы неоднократно сталкивались с такого рода разрядом. Так, например, при соединении обкладок лейденской банки разрядником мы наблюдали возникновение искры при приближении шарика разрядника к шарiku стержня, соединенного с внутренней обкладкой банки. Искра возникает и при разряде любого другого конденсатора. Наблюдалась искра и между кондукторами электрофорной машины, когда при вращении дисков машины разность потенциалов на кондукторах ее становилась достаточно большой. В 1827 г. производились опыты по намагничиванию стальной спицы током, возникающим при искровом разряде. Для этого стальная спица обматывалась изолированной проволокой, один конец которой присоединялся к наружной обкладке заряженной лейденской банки, а другой — приближался к шарiku стержня, соединенного с внутренней обкладкой банки, на расстоянии, при котором между этим концом проволоки и шариком стержня проскакивала искра и, следовательно, по проволоке, которой обернута спица, проходил электрический ток (рис. 1).

Опыты эти дали неожиданные и на первых порах необъяснимые результаты. Несмотря на то, что можно было, зная знаки зарядов обкладок конденсатора, знать направление тока, идущего по изолированному провод-

нику, намотанному на стальную спицу, оказалось невозможным предсказать, какой магнитный полюс на каком конце спицы появится, если омическое сопротивление обмотки спицы мало. При одних и тех же по знаку зарядах на обкладках конденсатора на одном и том же конце спицы при одном разряде конденсатора появлялся

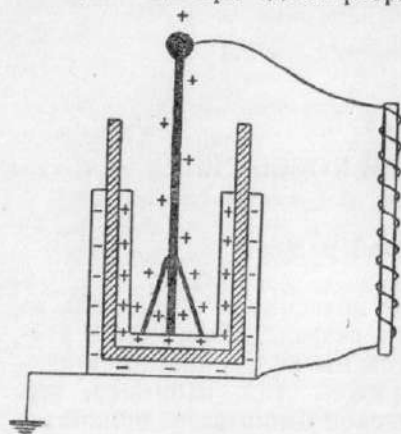


Рис. 1 Намагничивание стальной спицы током, возникающим при искровом разряде конденсатора (лейденской банки).

один полюс, при другом разряде — другой. (Заметим, что если омическое сопротивление проволоки велико, полюсы появляются в соответствии с правилами электромагнетизма.) Тогда же было высказано предположение о том, что при искровом разряде возникает ток не одного направления, а переменный и что поэтому полюсы на концах спицы появляются в соответствии с тем, каково будет направление тока в последний момент.

В 1857 г. немецким ученым Федерсеном были осуществлены первые

опыты по проверке этого предположения. В основе этих опытов лежали следующие соображения. Если ток, возникающий при искровом разряде, переменный, т. е. такой, направление которого периодически меняется, а сила тока периодически падает до нуля, то в искровом промежутке, очевидно, существуют отдельные разряды, следующие друг за другом в противоположных направлениях и, следовательно, искра не непрерывна, а прерывиста. Эта прерывистость искры глазом не обнаруживается, так как частота возникающего при искровом разряде переменного тока очень велика и быстро следующие друг за другом в искровом промежутке разряды воспринимаются глазом суммарно в виде искры. Для обнаружения прерывистости искры можно использовать стробоскопический эффект.

один полюс, при другом разряде — другой. (Заметим, что если омическое сопротивление проволоки велико, полюсы появляются в соответствии с правилами электромагнетизма.) Тогда же было высказано предположение о том, что при искровом разряде возникает ток не одного направления, а переменный и что поэтому полюсы на концах спицы появляются в соответствии с тем, каково будет направление тока в последний момент.

В 1857 г. немецким ученым Федерсеном были осуществлены первые

Наблюдая искровой разряд во вращающемся зеркале, мы можем последовательные во времени отдельные разряды расположить последовательно в пространстве. Принципиальная схема установки, которой пользовались физики для исследования искры, приведена на рис. 2.

Ось mm зеркала S расположена параллельно искре F . С помощью линзы L , находящейся между искровым промежутком и зеркалом, получаем изображение искры в F_1 . Поместив здесь светочувствительную пластинку, искру можно сфотографировать. При вращении зеркала S по направлению, указанному на рис. 2 стрелкой, изображение искры перемещается по направлению к F_2 . Если бы искровой разряд состоял из одной искры, то изображение ее представляло бы собою более или менее растянутую (в зависимости от длительности разряда) светлую полосу F_1F_2 . Однако в действительности изображение искры имеет вид, показанный на рис. 3.

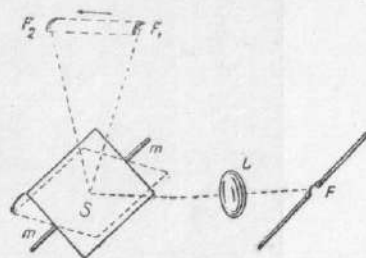


Рис. 2. Схема установки для исследования искрового разряда.

Каждый из четырех указанных на рис. 3 снимков искр свидетельствует о том, что искра при разряде конденсатора не непрерывная, а прерывистая, состоящая из целого ряда следующих друг за другом и разделенных промежутками искр. (Изображения этих искр расположены поперек снимка.) Следовательно и ток, идущий по цепи, прерывист. Кроме того, на снимке достаточно отчетливо видно, что против светлых участков левого края находятся темные участки у правого края, и наоборот. Они соответствуют искрам, исходящим из правого и левого шариков искрового промежутка. Следовательно, искровой разряд конденсатора представляет собою ток не только прерывистый, но и периодически меняющий свое направление, т. е. ток переменный. Зная частоту вращения зеркала, можно определить продолжительность одного разряда, т. е. период, а по нему определить частоту этого переменного тока. В различных

опытах частота оказалась различной, но во всех случаях огромной — порядка миллиона герц. Следовательно, искровой разряд конденсатора в цепи с индуктивностью (проводник, намотанный на спицу, является катушкой самоиндукции) есть переменный ток высокой

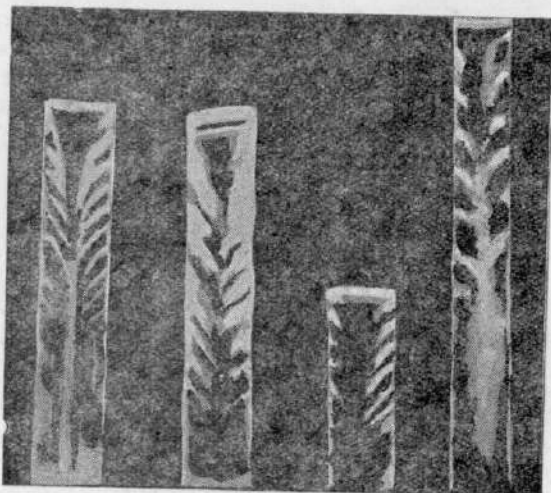


Рис. 3. Фотографии искры полученные с помощью установки по схеме рис. 2.

частоты. (Высокой частотой называют частоты выше 100 000 герц. В радиотехнике наиболее распространенными являются частоты от 100 000 до $3 \cdot 10^7$ герц.)

§ 2. Конденсатор в цепи тока.

Прежде чем перейти к более основательному ознакомлению со свойствами высокочастотного переменного тока, остановимся сначала на рассмотрении электрических цепей с включенными в них конденсатором (емкостью) и катушкой самоиндукции (индуктивностью), так как это крайне существенно для понимания всего последующего.

Представим себе, что в цепь источника постоянного тока E включен конденсатор C (рис. 4). Допустим, что собранная нами цепь индуктивностью не обла-

дает. Когда цепь будет замкнута, между полюсами источника тока и обкладками конденсатора произойдет выравнивание потенциалов: возникнет ток, который через очень малый промежуток времени прекратится. Конденсатор окажется заряженным.

В момент замыкания ключа в цепи возникает ток, сила которого определится величиной э. д. с. источника тока и сопротивлением цепи. Но, по мере зарядки пластин конденсатора и уменьшения разности потенциалов между ними и полюсами источника тока, сила

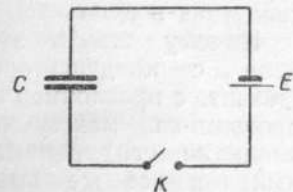


Рис. 4. Электрическая цепь с включенной в нее емкостью.

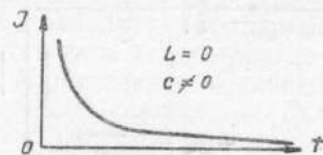


Рис. 5. График силы тока в цепи, изображенной на рис. 4.

тока в цепи станет уменьшаться и, наконец, к моменту времени, когда конденсатор зарядится, окажется равной нулю. Это изменение силы тока во времени графически может быть выражено так, как это показано на рис. 5.

Таким образом, сила тока в цепи с емкостью за очень короткий промежуток времени падает до нуля, после чего тока в цепи нет. Конденсатор в цепи постоянного тока своим диэлектриком создает разрыв в цепи; поэтому постоянный ток по такой цепи не идет. В последнем можно убедиться на опыте, включив в цепь источника постоянного тока (динамомашины) лампу накаливания, рассчитанную на 127 вольт. (В такой постановке эта демонстрация наиболее удобна для сравнения со следующим описываемым опытом.) Лампа не горит.

Иное получается в случае включения емкости в цепь переменного тока. Произведем следующий опыт.

В цепь городского переменного тока, частота которого, как известно, 50 герц, включим конденсатор в 4—6 микрофард (2—3 конденсатора по 2 микрофарды, соединенных параллельно) и лампу накаливания на

127 вольт (мощностью в 40 ватт). Батарей конденсаторов и лампу соединяем последовательно. Лампа горит — значит ток в цепи есть. Закоротив конденсаторы, обращаем внимание на то обстоятельство, что при наличии конденсаторов в цепи с лампой она горит менее ярко; значит, сила тока в цепи, когда в нее включен конденсатор, уменьшается.

Уменьшим емкость батарей конденсаторов. Лампа горит, но менее ярко. Таким образом, чем больше емкость, включенная в цепь, тем ярче горит лампа, следовательно, тем больше сила тока в цепи.

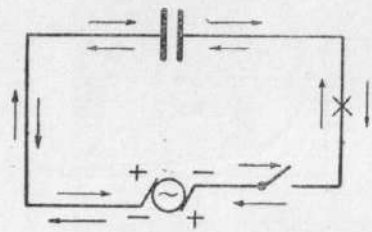


Рис. 6. Конденсатор не создает разрыва в цепи переменного тока.

Почему же в этой цепи с конденсатором (значит, с прослойкой непроводника между обкладками его) переменный ток все же имеет место? Упрощенно говоря, на этот вопрос можно ответить следующим образом.

Пусть в какой-то момент времени левая щетка генератора переменного тока (рис. 6) является отрицательной, а правая положительной. Тогда электроны этого полюса источника тока, а также свободные электроны провода, соединяющего отрицательный полюс генератора с левой пластиной конденсатора, будут двигаться к этой последней и зарядят ее отрицательно. Свободные электроны правой пластины конденсатора и провода, соединяющего ее с лампой и с положительным полюсом генератора, будут двигаться по дальнейшей части цепи, а значит, и через лампу, к положительной щетке генератора. В результате по цепи пойдет ток, электронное направление которого на рис. 6 указано стрелками вне контура цепи (техническое направление тока будет обратным). В следующий момент времени, когда полярность щеток генератора изменится, по цепи пойдет ток противоположного направления, которое на рис. 6 указано стрелками внутри контура цепи. Далее этот процесс будет повторяться, пока замкнута цепь, т. е. в цепи с конденсатором будет существовать переменный ток.

Приходим к очень важному для дальнейшего вывода о том, что конденсатор не создает разрыва в цепи переменного тока.

Таким образом, можно условно сказать, что конденсатор в цепи переменного тока ведет себя как проводник. (Мы говорим, что „можно условно сказать“ потому, что нельзя представлять себе, что ток, представляющий собою в металлах поток ориентированно движущихся свободных электронов, „проходит“ через конденсатор так, как он идет через тот или иной металлический проводник.) Иными словами, включение конденсатора в разомкнутую цепь переменного тока увеличивает ее проводимость, обращает цепь в замкнутую для переменного тока. В самом деле: пусть цепь генератора переменного тока разомкнута; сопротивление бесконечно велико. В место разрыва цепи включили конденсатор — сопротивление стало конечным, цепь оказалась замкнутой, ток по цепи идет. Увеличили емкость включенного конденсатора — проводимость увеличилась (сопротивление уменьшилось), что мы и наблюдали на опыте.

С другой стороны, производя опыт, мы обнаружили, что изменение емкости, включенной в цепь переменного тока, влияет на силу тока в цепи. (Об изменении силы тока мы судили по степени накала нити лампы.) С увеличением емкости сила тока в данной цепи возрастает, с уменьшением емкости сила тока уменьшается. Влияние изменения емкости в цепи переменного тока на величину силы тока в ней аналогично влиянию изменения сопротивления проводника на силу тока. В связи с этим принято говорить, что конденсатор оказывает переменному току сопротивление. Важно понять, что не только „механизм“ проводимости конденсатора отличен от „механизма“ проводимости проводников (например, металлических), но и происхождение сопротивления конденсатора переменному току отлично от происхождения сопротивления проводников постоянному току. Известно, что сопротивление проводника току обусловлено взаимодействием движущихся свободных электронов (совокупность их и создает то, что мы называем электрическим током) и атомов металла, по которому идет ток.

Это сопротивление проводников постоянному току часто называют омическим.

В отличие от этого сопротивления, *сопротивление, оказываемое конденсатором переменному току, называют емкостным сопротивлением.*

Важно учесть, что наличие в цепи емкостного сопротивления потерь энергии не вызывает. Пояснить эту мысль можно следующими рассуждениями.

Вернемся к рис. 6. В то время, когда левая щетка генератора отрицательна, а правая положительна, в результате перемещения электронов, о котором говорилось выше, конденсатор заряжается, причем так, что его левая пластина отрицательна, правая положительна. Заряженный конденсатор обладает запасом энергии. Эту энергию конденсатор получил от генератора. Далее полярность щеток генератора меняется: левая щетка становится положительной, правая отрицательной. Причем за тот промежуток времени, пока левая щетка генератора положительна, а правая отрицательна, происходит следующее.

В начале этого промежутка времени конденсатор начинает разряжаться, отдавая генератору запасенную им энергию до тех пор, пока разность потенциалов пластин его не окажется равной нулю. Далее (все еще при той же полярности щеток генератора), конденсатор снова заряжается, но уже так, что его левая пластина становится положительной, а правая отрицательной. Теперь конденсатор снова получает энергию, которую он, в свою очередь, — отдает генератору, когда полярность полюсов его снова изменяется и т. д. Оказывается, что при этом конденсатор отдает энергии столько же, сколько он получил ее при зарядке. По этой причине наличие конденсатора в цепи переменного тока потерь энергии не вызывает.

Емкостное сопротивление относится к виду так называемых реактивных сопротивлений (от слова „реакция“ — противодействие).

Реактивным сопротивлением называется сопротивление переменному току, не вызывающее потерь энергии. (В следующем параграфе мы встретимся еще с одним из сопротивлений, тоже относящимся к виду реактивных.)

Такое сопротивление переменному току, при котором происходит безвозвратная потеря энергии (безвозвратная — в смысле превращения энергии тока в энергию

другого вида, например, в тепловую), называется *активным сопротивлением.*

Рассмотренный нами процесс заряда и разряда конденсатора в цепи переменного тока происходит очень быстро. При частоте переменного тока в 50 герц полярность пластин конденсатора меняется 100 раз в секунду.

Сопротивление конденсатора уменьшается с увеличением его емкости. В этом мы убедились на опыте. Лампа накаливания, включенная в осветительную сеть последовательно с батареей конденсаторов, горела ярче, когда емкость батареи была нами увеличена (частота тока, разумеется, оставалась той же). Оказывается, что сопротивление конденсатора зависит также и от частоты тока. С увеличением частоты переменного тока сопротивление, оказываемое конденсатором, уменьшается. Эта зависимость сопротивления конденсатора от его емкости и от частоты переменного тока подтверждается и опытом и теорией.

Сопротивление, оказываемое переменному току цепью, в которой имеется активное и емкостное сопротивления, вычисляется по формуле:

$$Z = \sqrt{r^2 + X_c^2},$$

где Z полное сопротивление (в омах), r активное сопротивление (в омах), а X_c — емкостное сопротивление (в омах). С другой стороны — емкостное сопротивление

$$X_c = \frac{1}{\omega C},$$

где ω — угловая частота, равная $2\pi\nu$ (ν — частота переменного тока в герцах), а C — емкость (в фарадах). Тогда:

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

или

$$Z = \sqrt{r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}.$$

Емкостное сопротивление $x_c = \frac{1}{\omega C}$ обратно пропорционально частоте тока и емкости.

Если в цепи имеется только емкостное сопротивление (активное настолько мало, что им можно практически

пренебречь), то сила тока в цепи (в амперах) может быть определена по формуле:

$$I = \frac{u}{1/\omega C},$$

где u напряжение (в вольтах).

Подсчитаем емкостное сопротивление переменному току с частотой в 50 герц, оказываемое конденсатором в 1 микрофараду.

Напомним единицы емкости.

$$1 \text{ фарада (F)} = 1 \frac{\text{кул}}{\text{вольт.}}$$

$$1 \text{ микрофарада } (\mu\text{F}) = 10^{-6} \text{ F.}$$

$$1 \text{ пикофарада } (\text{pF}) = 10^{-12} \text{ F.}$$

Емкостное сопротивление указанного конденсатора вычисляем по формуле:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \approx 3185 \text{ ом.}$$

Этот же конденсатор в цепи тока высокой частоты, например в 10^6 герц, имеет емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6} \approx 0,16 \text{ ом.}$$

Как видим, емкостное сопротивление конденсатора при увеличении частоты тока с 50 до 10^6 герц уменьшается в 20 000 раз.

§ 3. Катушка самоиндукции в цепи тока.

В предыдущем параграфе мы разобрали вопрос об емкости в цепи постоянного и переменного тока. Рассмотрим теперь цепь постоянного и переменного тока с включенной в нее катушкой самоиндукции. С этой целью произведем следующие опыты.

Соберем установку, изображенную на рис. 7. В качестве катушки самоиндукции используем катушку (с надписью „120 вольт“) от разборного школьного

трансформатора, надев ее на разборный железный сердечник, состоящий из двух половин; источник тока — батарея аккумуляторов. Дадим катушке самоиндукции напряжение в 6 вольт и измерим силу тока в цепи.

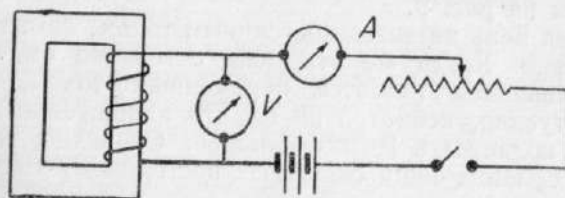


Рис. 7. Катушка самоиндукции в цепи постоянного тока.

Допустим, что она окажется равной 2 амперам. Теперь включим эту же катушку самоиндукции в цепь переменного тока, собранную как это указано на рис. 8.

В качестве источника тока используем городскую осветительную сеть. Пользуясь реостатом, установим снова в цепи катушки ток силой в 2 ампера. Окажется,

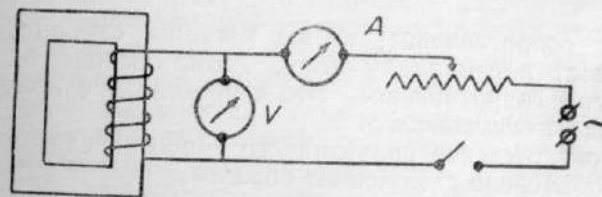


Рис. 8 Катушка самоиндукции в цепи переменного тока.

что в этом случае напряжение на катушку самоиндукции придется дать больше 6 вольт. Заметим, что активное сопротивление катушки осталось прежним. Очевидно, что в случае переменного тока катушка самоиндукции оказывает току еще какое-то другое сопротивление, кроме активного. Перейдем к следующему опыту.

Последовательно с катушкой трансформатора включим лампу на 12 вольт мощностью в 50 ватт и будем

питать эту цепь в одном случае постоянным током от батареи аккумуляторов на 12 вольт, в другом — переменным током от городской осветительной сети с напряжением 127 вольт. Схема последнего опыта изображена на рис. 9.

Когда цепь питается постоянным током, лампа горит нормально. Когда же эта цепь с тем же омическим сопротивлением питается переменным током, лампа горит тускло, несмотря на то, что напряжение в этом случае подается в 10 раз большее. Очевидно, что катушка самоиндукции оказывает постоянному току оми-

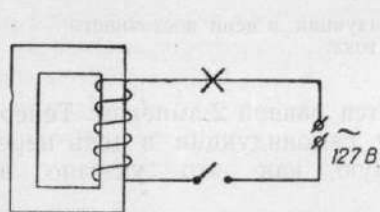


Рис. 9. Лампа накаливания и катушка самоиндукции в цепи переменного тока.

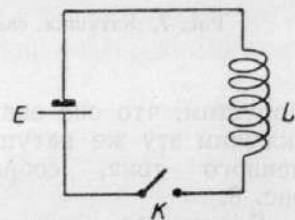


Рис. 10. Катушка самоиндукции в цепи постоянного тока.

ческое сопротивление; та же катушка самоиндукции оказывает переменному току, кроме активного, еще и другое сопротивление. Это сопротивление получило название *индуктивного*.

Происхождение индуктивного сопротивления может быть объяснено следующим образом.

В предыдущем параграфе мы остановились на вопросе о том, как изменяется сила тока во время замыкания цепи постоянного тока, не обладающей индуктивностью, но в которой имеется емкость. Что же можно сказать о силе тока при замыкании цепи, в которой нет емкости, а есть катушка самоиндукции?

Представим себе, что имеется цепь, изображенная на рис. 10.

При замыкании такой цепи и появлении в ней тока, в катушке возникнет э. д. с. самоиндукции (которой в линейных участках цепи можно пренебречь), направление э. д. с. по закону Ленца противоположно приложенному к катушке напряжению, создаваемому

генератором. В связи с этим сила тока в цепи достигнет значения, определяемого законом Ома, не мгновенно, а в течение некоторого, хотя и очень малого, промежутка времени. Это изменение силы тока во времени графически может быть изображено так, как показано на рис. 11.

Таким образом, влияние катушки самоиндукции в цепи постоянного тока сказывается только в течение того промежутка времени, пока сила тока в цепи при замыкании ее нарастает от нуля до значения, определяемого законом Ома. Иначе обстоит дело, когда катушка самоиндукции включена в цепь переменного тока.

И в этом случае при замыкании цепи и появлении в ней тока в катушке самоиндукции возникнет э. д. с. самоиндукции, препятствующая нарастанию тока. Но в связи с тем, что направление переменного тока изменяется большое число раз в каждую секунду, с момента первого появления тока в цепи (при замыкании цепи) до момента первого изменения направления тока пройдет такой малый промежуток времени, что сила тока в цепи не успеет достигнуть значения, определяемого законом Ома. Очевидно, что сила тока не достигнет этого значения не только при первом появлении тока (при замыкании цепи), но и в каждую половину каждого последующего полупериода, в течение которой сила переменного тока возрастает от нуля, т. е. во все последующее время. Поэтому сила переменного тока в цепи с катушкой самоиндукции будет меньше при том же напряжении, чем в случае тока постоянного, при котором э. д. с. самоиндукции возникает только в момент замыкания цепи.

Сравнивая рис. 11 с рис. 5, мы видим, что действия индуктивности и емкости противоположны. Цепь, в которой одновременно имеются и емкость и индуктивность, будет рассмотрена в следующем параграфе.

Индуктивное сопротивление потерь энергии не вызывает.

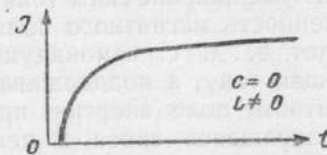


Рис. 11. График силы тока в цепи, изображенной на рис. 10.

Объясняется это следующим образом.

Когда в цепи происходит увеличение силы переменного тока от нуля до максимального значения, в катушке самоиндукции возникает э. д. с. самоиндукции, препятствующая нарастанию тока. Но э. д. с. самоиндукции возникает потому, что возникает магнитное поле, обладающее энергией. На создание магнитного поля расходуется энергия тока, которая таким образом запасается в форме энергии магнитного поля. В следующий промежуток времени (речь идет о токе переменном) происходит уменьшение силы тока от максимума до нуля, напряженность магнитного поля уменьшается. Опять возникает э. д. с. самоиндукции, но уже не препятствующая току, а поддерживающая его. Запасенная в магнитном поле энергия превращается в энергию тока, возвращаясь снова в цепь. В итоге наличие индуктивного сопротивления в цепи расхода энергии тока не вызывает. В связи с этим индуктивное сопротивление относится к виду реактивных сопротивлений.

Индуктивное сопротивление обусловлено явлением самоиндукции. Величина э. д. с. самоиндукции зависит от размеров и формы проводника и от магнитной проницаемости среды, в которой он находится.

Так, при частоте переменного тока в 50 герц э. д. с. самоиндукции, возникающая в линейном проводнике, невелика. При той же частоте переменного тока э. д. с. самоиндукции, возникающая в том же проводнике, согнутом в форме соленоида (катушки), много больше. Если внутрь такой катушки вставить сердечник из ферромагнитного вещества (например, железный), то э. д. с. самоиндукции в этом случае возрастет во много раз. Таким образом, величина э. д. с. самоиндукции, возникающей в различных проводниках (при одной и той же частоте переменного тока), различна. В связи с этим явление самоиндукции в различных проводниках характеризуется особой величиной, называемой индуктивностью или коэффициентом самоиндукции данного проводника.

Физический смысл этой величины может быть установлен следующим образом.

Величина э. д. с. индукции, как известно, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного по-

тока, охватываемого контуром проводника. Эта зависимость выражается формулой,

$$E = -k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (1)$$

где E — э. д. с. индукции, $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, охватываемого контуром проводника, Δt — время, в течение которого это изменение произошло, а k — коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от выбора единиц для измерения величин, входящих в эту формулу. Знак минус в формуле (1) указывает, что при уменьшении магнитного потока э. д. с. индукции будет положительной, т. е. по направлению будет совпадать с током. Наоборот, при возрастании магнитного потока э. д. с. будет отрицательной, т. е. направленной навстречу току. Величина э. д. с. самоиндукции зависит от этих же факторов. В случае явления самоиндукции речь идет об изменении магнитного потока, принадлежащего данному проводнику. Поэтому оказывается, что скорость изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника, прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в этом проводнике. Тогда указанная формула принимает вид:

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (2)$$

т. е. э. д. с. самоиндукции в каком-либо проводнике оказывается прямо пропорциональной скорости изменения силы тока в этом проводнике.

Коэффициент пропорциональности L в этой формуле имеет не только математический, но и физический смысл. Физическая величина L получила название *индуктивности проводника или коэффициента самоиндукции его*. Знак минус имеет то же значение, что и в формуле (1), с той разницей, что здесь имеется в виду уменьшение или увеличение силы тока.

Положив все величины в правой части этого равенства, кроме L , равными единице, получим, что *индуктивность проводника численно равна э. д. с. самоиндукции, возникающей в этом проводнике при изменении силы тока в нем на единицу силы тока за единицу времени*. Таким образом, индуктивность характеризует величину э. д. с. самоиндукции,

возникающей в данном проводнике, в зависимости от скорости изменения силы тока в нем. Как уже указывалось, индуктивность различных проводников различна. Для измерения индуктивности вводятся единицы индуктивности.

Практическая единица индуктивности — генри (обозначается русскими буквами *гн* или латинской *H*).

Генри — это индуктивность такого проводника, в котором при изменении силы тока на 1 ампер в секунду возникает э. д. с. самоиндукции в 1 вольт.

$$1 \text{ генри} = 1 \frac{\text{вольт}}{\text{амп.}} \cdot \text{сек.}$$

Следовательно, если в каком-либо проводнике при изменении силы тока в нем на 1 ампер в секунду возникнет э. д. с. самоиндукции, допустим, в 3 вольта, то индуктивность такого проводника окажется равной 3 генри.

Единица, в 1000 раз меньшая генри, называется миллигенри (*мгн* или *mH*), а в миллион раз меньшая — микрогенри (*мкгн* или μH).

$$1 \text{ генри} = 10^3 \text{ мн} = 10^6 \mu\text{H}.$$

Как уже указывалось, э. д. с. самоиндукции, возникающая в проводнике при изменении силы тока в нем, зависит от размеров проводника, его формы и от магнитной проницаемости среды, в которой он находится. Но величина э. д. с. самоиндукции, возникающей при изменении силы тока на 1 ампер в 1 сек., определяет индуктивность проводника. Следовательно и индуктивность проводников зависит от этих же причин.

Проводник, свернутый в соленоид (намотанный на катушку), обладает, при прочих равных условиях, большей индуктивностью, чем линейный. Объясняется это тем, что в этом случае происходят большие изменения магнитного потока вследствие того, что каждый данный виток пронизывается магнитным потоком не только „своим собственным“, но и потоками соседних витков. При бифилярной намотке (проводником предварительно согнутым по длине вдвое) в обеих половинах проводника идет ток одной и той же силы, но в противоположных направлениях. Противоположны по направ-

лению и магнитные потоки по всей длине этих половин проводников. Индуктивность такого проводника равна нулю. К бифилярной обмотке прибегают при изготовлении эталонов сопротивления.

При такой намотке эталон будет оказывать и постоянному, и переменному току одинаковое сопротивление, равное омическому (активному) сопротивлению проводника. При намотке небифилярной эталон оказывал бы постоянному току только омическое сопротивление, а переменному — и активное, и индуктивное. Полное сопротивление эталона во втором случае оказалось бы больше, чем в первом.

Если внутрь соленоида вложить железный сердечник, то магнитный поток будет усилен железом, а значит, изменение магнитного потока, охватываемого контуром проводника, при прочих равных условиях, станет больше. Так как магнитная проницаемость железа очень велика, то поэтому индуктивность такого соленоида увеличивается во много раз.

Для увеличения индуктивности проводника его наматывают на катушку, внутрь которой вкладывают ферромагнитный сердечник. Такие катушки называют катушками самоиндукции.

Катушки самоиндукции обладают большой индуктивностью и потому оказывают переменному току большое индуктивное сопротивление.

Влияние железного сердечника, вложенного внутрь катушки самоиндукции, на индуктивность катушки, а следовательно, и на ее индуктивное сопротивление переменному току, можно выявить следующим опытом.

Возьмем железный сердечник школьного разборного трансформатора с надетой на него катушкой с надписью „127 вольт“ (железный сердечник, состоящий из двух половин, должен быть замкнут и стянут болтом). Последовательно с катушкой соединим лампу накаливания на 127 вольт мощностью в 40 ватт, рубильник и собранную цепь подключим к сети городского переменного тока по схеме рис. 9. Замкнем цепь.

Нить лампы еле калится. Выключив катушку из цепи (прикоснувшись к клеммам ее металлическим предметом, например, отверткой или ножом), увидим, что лампа загорится нормально, хотя изменение активного сопротивления цепи произошло очень небольшое, так как

активное сопротивление катушки очень мало по сравнению с сопротивлением лампы.

Сняв перемычку с клемм катушки, обнаружим, что нить лампы опять будет слабо накаливаться. Свинтив барашек с болта, стягивающего две половины железного сердечника трансформатора, и вынув самый болт, начнем смещать одну половину сердечника относительно другой, медленно сдвигая одну половину сердечника с другой до полного их разъединения (снять одну половину сердечника с другой подниманием вверх трудно, вследствие сильного магнитного притяжения, да этого делать и не нужно). Видим, что лампа во время этой операции начинает гореть все более и более ярко. Наиболее ярко она горит при разведенных половинах сердечника. (Полезно обратить внимание на гудение сердечника, вызываемое перемагничиванием его.) Заменяв катушку трансформатора другой (с надписью „220 вольт“) и снова собрав сердечник, увидим, что нить лампы вовсе не будет накаливаться.

Смещая одну половину железного сердечника относительно другой, мы уменьшаем сечение сердечника. Магнитный поток, до этого замкнутый сердечником (для простоты рассуждений допустим, что так называемая магнитная утечка равна нулю), теперь частично идет в воздухе. Магнитный поток, проходящий внутри катушки, уменьшается. Вследствие этого уменьшается индуктивность катушки и ее индуктивное сопротивление. Лампа горит ярче. Уменьшение магнитного потока внутри катушки становится еще большим при полностью разведенных половинах сердечника. Индуктивность катушки и ее индуктивное сопротивление уменьшаются в еще большей степени, лампа горит еще более ярко.

Сменив одну катушку другой с большим числом витков, мы увеличили индуктивность, а значит и индуктивное сопротивление в цепи. Поэтому в последнем варианте опыта нить лампы совсем не накаливается.

Индуктивность катушки самоиндукции тем больше, чем больше ее диаметр, чем меньше ее длина и чем больше число витков в ней.

Из последнего опыта вытекает, что индуктивное сопротивление проводника зависит от его индуктивности, причем с увеличением индуктивности индуктивное сопротивление увеличивается.

Оказывается, что индуктивное сопротивление проводников зависит и от частоты переменного тока, проходящего по ним, так же возрастающая с увеличением частоты переменного тока. Полное сопротивление переменному току цепи, в которой имеется активное и индуктивное сопротивления, вычисляется по формуле:

$$Z = \sqrt{r^2 + X_L^2},$$

где Z — полное сопротивление (в омах), r — активное сопротивление (в омах), а X_L — индуктивное сопротивление (в омах).

Индуктивное сопротивление выражается следующей формулой:

$$X_L = \omega L,$$

где X_L — индуктивное сопротивление, ω — угловая частота, равная $2\pi\nu$ (ν — частота переменного тока в герцах), а L — индуктивность (в генри). Тогда:

$$Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \quad \text{или} \quad Z = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}.$$

Выражение для индуктивного сопротивления $X_L = \omega L$ показывает, что индуктивное сопротивление прямо пропорционально индуктивности и частоте переменного тока.

Выше, сравнивая графики рис. 11 и 5, мы пришли к выводу о том, что действия индуктивности и емкости в цепи противоположны. Этот вывод подтверждается и тем обстоятельством, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока и емкости (см. стр. 19), а индуктивное — прямо пропорционально индуктивности и частоте тока.

Если в цепи имеется только индуктивное сопротивление (активное настолько мало, что им можно практически пренебречь), то сила тока в цепи (в амперах) может быть вычислена по формуле:

$$I = \frac{u}{\omega L},$$

где u — напряжение (в вольтах).

Подсчитаем индуктивное сопротивление, оказываемое катушкой самоиндукции с индуктивностью в 1 генри, переменному току с частотой 50 герц. (В радиотехнике

применяют катушки с индуктивностью от нескольких микрогенри до десятков и даже сотен генри.)

$$X_L = \omega L = 2\pi\nu L,$$

$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1 = 314 \text{ ом.}$$

Если такую катушку включить в цепь переменного тока с напряжением в 127 вольт, то по ней пойдет ток:

$$I = \frac{u}{X_L} = \frac{127}{314} \approx 0,4 \text{ ампера.}$$

Произведенный подсчет показывает, что катушка с индуктивностью в 1 генри оказывает току с частотой в 50 герц довольно большое индуктивное сопротивление — 314 ом. Активное сопротивление ее, зависящее от длины провода, его поперечного сечения и материала ($R = \rho \frac{l}{S}$), значительно меньше. Поэтому на практике приближенно считают, что катушка самоиндукции обладает только одним индуктивным сопротивлением.

Подсчитаем индуктивное сопротивление той же катушки высокочастотному переменному току, например, с частотой 10^6 герц.

$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 = 6,28 \cdot 10^6 \text{ ом} = 6,28 \text{ мегома.}$$

Как видим, сопротивление той же катушки резко возросло. Таким образом, одна и та же катушка оказывает разное индуктивное сопротивление токам разной частоты.

В дальнейшем мы убедимся на опыте в том, что в случае переменного тока высокой частоты даже проводник, согнутый в виде дуги, а не намотанный на катушку с сердечником, обладает большим индуктивным сопротивлением.

§ 4. Электрические колебания.

Рассмотрим, как возникает переменный ток высокой частоты при искровом разряде конденсатора (о чем речь шла в § 1), и поближе познакомимся со свойствами его.

Высокочастотный переменный ток можно осуществить в следующей электрической цепи (рис. 12).

В этой цепи C — конденсатор, L — катушка самоиндукции, K — ключ. Зарядим конденсатор C , например, от катушки Румкорфа. Пусть верхняя на чертеже пластина конденсатора будет заряжена отрицательно, а нижняя положительно. Замкнем цепь ключом K . Конденсатор разрядится. Рассмотрим этот процесс разряда конденсатора, а также и другие явления, которые при этом возникнут.

В момент замыкания цепи напряжение (разность потенциалов) на пластинах конденсатора будет максимальным. Свободные электроны верхней пластины конденсатора и металлических проводов цепи под действием сил электрического поля придут в ориентированное движение, т. е. по цепи пойдет ток, по направлению от верхней пластины конденсатора к нижней (имеем в виду электронное направление тока, техническое — будет обратным), а напряжение на пластинах конденсатора будет уменьшаться. Одновременно с появлением в цепи тока появится и магнитное поле.

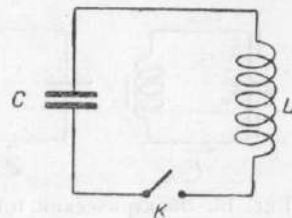


Рис. 12. Колебательный контур.

В связи с тем, что в цепи имеется катушка самоиндукции, ток, сила которого в начале разряда конденсатора была равна нулю, не сразу достигнет максимума, а будет нарастать до него в течение какого-то, хотя и очень короткого, но все же конечного промежутка времени, так как при появлении в цепи тока и созданного им магнитного поля в катушке самоиндукции возникнет э. д. с. самоиндукции, препятствующая нарастанию тока.

Вследствие запаздывания в нарастании тока, сила тока достигнет максимума к тому моменту времени, когда положительные заряды нижней пластины конденсатора будут нейтрализованы отрицательными зарядами, которые участвовали в образовании тока. Иными словами — сила тока достигает максимума к тому моменту времени, когда разность потенциалов пластин конденсатора будет равна нулю и конденсатор окажется разряженным. В этот момент ток начинает прекращаться, а созданное им магнитное поле начинает исчезать. Вследствие этого

В катушке самоиндукции, возникает э. д. с. самоиндукции, которая теперь не препятствует току, а наоборот — поддерживает его. В связи с этим ориентированное движение свободных электронов в цепи продолжается в том же направлении, т. е. в цепи продолжает идти ток в направлении от верхней пластины конденсатора к нижней, и конденсатор начинает перезаряжаться: нижняя его пластина начинает заряжаться отрицательно, а верхняя — положительно, причем напряжение на них увеличивается.

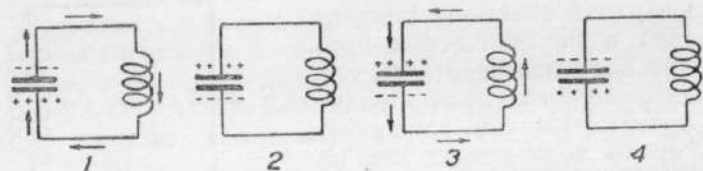


Рис. 13. Электрический ток в цепи с емкостью и индуктивностью.

По мере увеличения разности потенциалов на пластинах конденсатора, сила тока в цепи уменьшается и, наконец, становится равной нулю. К этому моменту времени процесс перезарядки конденсатора закончится: теперь нижняя пластина конденсатора заряжена отрицательно, верхняя — положительно, а напряжение на них максимально.

Применяя подобные же рассуждения и к перезаряженному конденсатору, мы приходим к заключению, что он перезарядится еще раз, причем теперь ток по цепи пойдет в противоположном направлении, в результате чего верхняя пластина конденсатора снова зарядится отрицательно, а нижняя положительно, затем последует новый перезаряд конденсатора и т. д.

Рассмотренный нами процесс схематично изображен на рис. 13.

Изменение силы тока со временем в рассматриваемой нами электрической цепи происходит по синусоидальному закону. (Графически эта зависимость выражается синусоидой рис. 14.) Это значит, что сила тока в цепи периодически (т. е. через равные промежутки времени) изменяется: возрастает от нуля до максимума, затем при том же направлении тока уменьшается от максимума до нуля; в этот момент направление тока изменяется на

противоположное, а сила тока начинает возрастать от нуля до максимума, затем (при этом новом направлении тока) уменьшается от максимума до нуля и т. д.

Как это видно из приведенных рассуждений, также периодически изменяется и напряжение (разность потенциалов) на пластинах конденсатора, но вследствие влияния индуктивности нулевые и максимальные значения напряжения на пластинах конденсатора по времени не совпадают с нулевыми и максимальными значениями силы тока. В момент, соответствующий точке *a* графика (рис. 14), напряжение на пластинах конденсатора максимально, а сила тока равна нулю; в точке *b* напряжение равно нулю, а сила тока максимальна; в точке *c* напряжение максимально, а сила тока равна нулю и т. д.

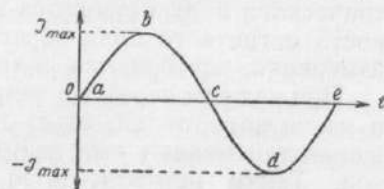


Рис. 14. График зависимости силы тока от времени в цепи, изображенной на рис. 13.

Все сказанное нами о закономерностях тока в рассмотренной цепи и график рис. 14, дающий зависимость силы этого тока от времени, свидетельствуют о том, что имеющийся в цепи ток есть переменный синусоидальный ток.

Мы разобрали вопрос о том, как изменяется в зависимости от напряжения сила тока в рассматриваемой нами цепи, в которой имеются емкость и индуктивность. Но, как известно, заряженный конденсатор создает электрическое поле, а движение электрических зарядов всегда сопровождается магнитным полем, окружающим линию движения заряда, которое может быть изображено в виде замкнутых магнитных линий вокруг линии движения заряда. Рассмотрим эти поля.

В начальный момент разряда конденсатора сила тока в цепи равна нулю, а пластины конденсатора заряжены до некоторого потенциала. В этот момент времени напряженность электрического поля максимальна, а напряженность магнитного поля равна нулю (точка *a*). При дальнейшем возрастании силы тока и уменьшении потенциала пластин конденсатора (участок *ab*), напряженность электрического поля уменьшается, а напряженность магнитного поля увеличивается. В тот момент, когда

конденсатор разрядится, а сила тока станет наибольшей (точка *b* графика), напряженность электрического поля обращается в нуль, а напряженность магнитного поля становится максимальной. При дальнейшем перезарядке конденсатора (участок *bc*) на пластинах конденсатора начинают накапливаться заряды, а сила тока в цепи уменьшается, в связи с чем напряженность электрического поля увеличивается, а напряженность магнитного поля уменьшается. К моменту окончания перезарядки пластин конденсатора (точка *c*) напряженность электрического поля становится максимальной, а напряженность магнитного поля обращается в нуль. Дальше эти изменения повторяются в той же последовательности.

При каждом переходе напряженности электрического и магнитного полей через нуль, векторы этих напряженностей меняют свое направление на противоположное. Таким образом, в те моменты времени, когда напряженность электрического поля максимальна, напряженность магнитного поля равна нулю и наоборот. В итоге происходят преобразования электростатической энергии конденсатора в энергию магнитного поля и наоборот.

Ключ в рассмотренной нами цепи может быть заменен искровым промежутком. Когда при начальном зарядке конденсатора напряжение на его пластинах достигнет такой величины, что между шариками искрового промежутка проскочит искра, в цепи во все время существования искры возникнут такие же явления, как те, которые только что нами рассмотрены.

Следовательно — разряд конденсатора в цепи с индуктивностью представляет собою высокочастотный переменный ток.

Периодические изменения силы тока и напряжения в цепи с емкостью и индуктивностью называются электрическими колебаниями.

Электрическая цепь с емкостью и индуктивностью, в которой имеется переменный ток высокой частоты, называется колебательным контуром.

Время одного полного колебания силы тока называется периодом колебаний (обозначается буквой *T*).

Число полных колебаний силы тока за одну секунду называется частотой колебаний (обозначается буквой *ν*).

Период и частота колебаний связаны друг с другом соотношением:

$$T = \frac{1}{\nu} \quad \text{и} \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

Таким образом, период и частота колебаний являются обратными величинами.

§ 5. Механическая аналогия электрических колебаний с пружинным маятником.

Для того чтобы отчетливее представить себе, как возникают и поддерживаются электрические колебания в колебательном контуре, сравним их с механическими колебаниями так называемого пружинного маятника. Пружинный маятник представляет собою шарик, прикрепленный посредине горизонтальной спиральной пружины (рис. 15).

Сходство между пружинным маятником и нитяным (шарик, подвешенный на нити) состоит в том, что каждый из них совершает колебательное движение, существенное же различие их в том, что шарик, подвешенный на нити, колеблется под влиянием силы тяжести, а шарик, прикрепленный посредине горизонтально расположенной спиральной пружины, колеблется под влиянием силы упругости пружины.

Шарик пружинного маятника в первом положении (см. рис. 15) находится в покое; во втором положении он оттянут какой-либо внешней силой; пружина деформирована, появилась потенциальная энергия. Отпущенный шарик будет совершать колебательное движение. Имея в среднем положении максимальную скорость, а следовательно, и максимальную кинетическую энергию, маятник проходит среднее положение по инерции. При движении шарика в ту или иную сторону от среднего положения кинетическая энергия его переходит в потенциальную энергию пружины. При движении шарика по направлению к среднему положению потенциальная энергия пружины переходит в кинетическую энергию шарика. Основной причиной, обуславливающей колебания маятника, является инерция шарика. Что же происходит в электрическом колебательном контуре?

В положении первом конденсатор не заряжен. Во втором положении ему сообщен заряд извне. Появилась электростатическая энергия. В третьем положении — кон-

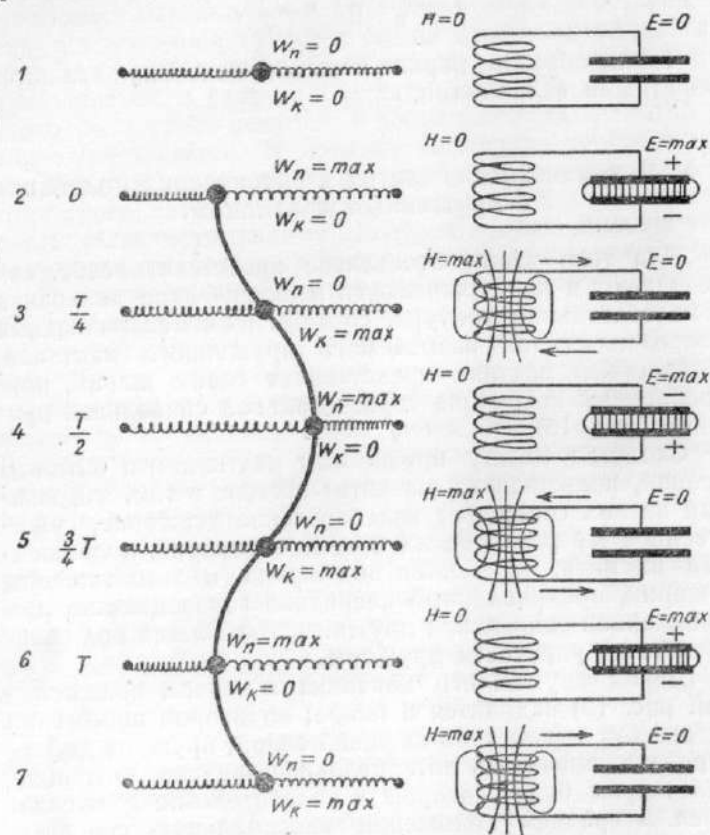


Рис. 15. Механические и электрические колебания.

денсатор разряжен, электростатической энергией он не обладает, но появился ток и связанное с ним магнитное поле.

Ток и его поле обладают инерцией, поэтому, несмотря на то, что конденсатор разряжен, в цепи продолжает идти ток в прежнем направлении. В положении четвертом конденсатор оказался перезаряженным. Воз-

никла электростатическая энергия конденсатора. Магнитного поля нет. В положении пятом процесс продолжается в противоположном направлении. Конденсатор снова разряжен, но появилось магнитное поле. Таким образом в колебательном контуре происходят преобразования электростатической энергии конденсатора в энергию магнитного поля и наоборот. Основной причиной, обуславливающей электрические колебания в контуре, является инерция тока и его поля.

Таким образом инерция тока и его поля в электрических колебаниях имеет то же значение, какое имеет инерция шарика пружинного маятника в механических колебаниях. И, наконец, в механических колебаниях пружинного маятника происходят преобразования потенциальной энергии пружины в кинетическую энергию шарика и обратно, а в электрических колебаниях — электростатической энергии конденсатора в энергию магнитного поля и обратно.

Можно составить своего рода „словарь“, с помощью которого описание электрических колебаний можно тотчас же перевести на описание механических и обратно¹.

Механическое колебание:

- 1) масса тела,
- 2) упругость пружины,
- 3) отклонение тела от положения равновесия,
- 4) скорость тела,
- 5) потенциальная энергия,
- 6) кинетическая энергия.

Электрическое колебание:

- 1) самоиндукция катушки,
- 2) емкость конденсатора,
- 3) напряжение на конденсаторе,
- 4) сила тока,
- 5) электрическая энергия (энергия электрического поля),
- 6) магнитная энергия (энергия магнитного поля).

Заметим, что начальный заряд конденсатора и, следовательно, напряжение на нем создается э. д. с. батареи. С другой стороны, начальное отклонение тела создается извне приложенной силой. Таким образом, сила, действующая на механическую колебательную

¹ См. Элементарный учебник физики, под редакцией акад. Г. С. Ландсберга. ГТТЛ, 1952, т. III, стр. 60.

систему, играет роль, аналогичную э. д. с., действующей на электрическую колебательную систему. Наш „словарь“ может быть поэтому дополнен еще одним „переводом“:

7) сила, 7) электродвижущая сила.

В следующем параграфе мы увидим, что эта аналогия может быть продолжена и несколько дальше.

§ 6. Затухающие и незатухающие колебания.

Пружинный маятник, получивший запас энергии извне, когда его оттянули из среднего положения в крайнее (положение второе на рис. 15), при отсут-

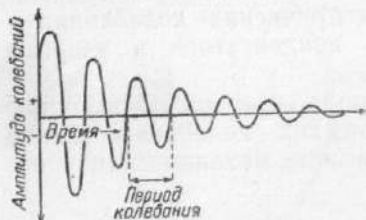


Рис. 16. График затухающих колебаний.

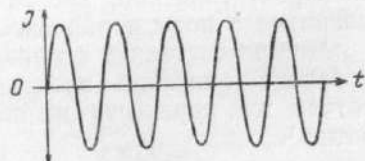


Рис. 17. График незатухающих колебаний.

ствии потерь энергии должен был бы колебаться в соответствии с законом сохранения энергии все время. Колебания реального маятника постепенно затухают, амплитуда колебаний с каждым размахом становится все меньше и меньше, так как энергия, сообщенная маятнику, постепенно расходуется на преодоление трения, и поэтому колебания маятника в конце концов прекращаются.

Как известно, колебания с постепенно убывающей амплитудой называются затухающими колебаниями. Нечто подобное происходит и с электрическими колебаниями. Энергия, сообщенная конденсатору при его зарядке, постепенно расходуется. Причины, вызывающих убыль энергии в колебательном контуре, много. О них, в том числе и об основной причине, связанной с излучением, мы скажем позже, сейчас же учтем только преобразование в колебательном контуре энергии элек-

трического тока в тепловую. В связи с этим электрические колебания в контуре оказываются затухающими. Графическое изображение их дано на рис. 16. Для того чтобы колебания были незатухающими, убыль энергии необходимо *непрерывно* восполнять. График незатухающих колебаний дан на рис. 17. О том, как получаются незатухающие колебания будет сказано дальше.

§ 7. Колебательный контур и возбуждение в нем колебаний.

В цепи с емкостью и самоиндукцией существование электрических колебаний обосновано нами в § 4. Экспериментально обнаружить их можно очень многими способами. Мы остановимся на следующем. Соберем контур, изображенный на рис. 18. В этом контуре L — катушка самоиндукции, C_1 и C_2 — лейденские банки, A — искровой промежуток, B — катушка Румкорфа, D — лампа нака-

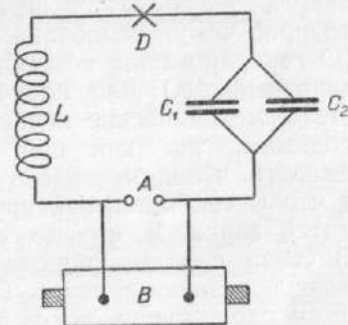


Рис. 18. Колебательный контур, питаемый индукционной катушкой. Индикатор колебаний — лампа накаливания.

ливания. Включив индукционную катушку (подав напряжение на ее первичную обмотку), мы увидим, что лампа накаливания будет гореть.

Горящая лампа служит признаком того, что в собранной нами электрической цепи с емкостью и катушкой самоиндукции имеется электрический ток, причем, очевидно, ток переменный, так как конденсатор, не пропуская постоянного тока, не создает разрыва в цепи для тока переменного. Роль индукционной катушки состоит в следующем.

Когда мы замыкаем первичную обмотку индукционной катушки, обкладки конденсатора, соединенные со вторичной обмоткой катушки, заряжаются разноименными зарядами. Потенциал их возрастает до значения, при котором воздух в искровом промежутке становится

проводником. Появляется искра. В течение времени ее существования в контуре происходят колебания; вследствие убыли энергии они оказываются затухающими. Напряжение на обкладках конденсатора падает, искра гаснет. Но так как его обкладки попеременно соединены с индукционной катушкой, конденсатор получает новую порцию энергии, потенциал обкладок снова возрастает до значения, при котором в искровом промежутке вновь проскакивает искра, в контуре же вновь появляются затухающие колебания, и к моменту прекращения их конденсатор снова заряжается и т. д.

Таким образом, индукционная катушка восполняет убыль энергии, вновь заряжая разрядившийся конденсатор. Искра же играет роль периодически действующего автоматического выключателя. В итоге убыль энергии восполняется не непрерывно, а порциями, благодаря чему колебания оказываются затухающими. (О генерировании незатухающих колебаний будет сказано дальше.) Для получения колебаний высокой частоты механические переключатели оказываются непригодными, так как при высокой частоте колебаний емкость и индуктивность контура должны быть малы, а чтобы сообщить контуру достаточно энергии, приходится заряжать его до весьма высокого напряжения. В связи с этим, раньше чем произойдет замыкание ключа, возникнет искра. Поэтому и прибегают к искровому промежутку, искра в котором и играет роль автоматического прерывателя.

§ 8. Высокочастотный переменный ток и его свойства.

В колебательном контуре имеет место переменный ток высокой частоты. Познакомимся со свойствами высокочастотного переменного тока, воспользовавшись так называемым трансформатором Тесла.

В устройстве и действии этого прибора можно разобраться, воспользовавшись схемой его, данной на рис. 19.

На этой схеме I и II — соответственно первичная и вторичная катушки трансформатора. C_1 и C_2 — конденсаторы обычно в виде одной или двух лейденских банок, A — искровой разрядник, B — клеммы, к которым подключается

индукционная катушка. Вторичная катушка, состоящая из нескольких сотен или тысяч витков тонкой проволоки, намотанной на картонный цилиндр, вставляется внутрь первичной катушки, состоящей из нескольких (3—5) витков толстой проволоки.

Первичная катушка трансформатора (катушка самоиндукции), батарея конденсаторов и искровой разрядник представляет собою колебательный контур, подобный тому, каким мы пользовались в опыте по схеме рис. 18, при обнаружении электрических колебаний. Когда индукционная катушка, вторичная обмотка которой подсоединена к клеммам B , приведена в действие, конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются до высокого потенциала, так же заряжаются и шарики искрового разрядника A . Между шариками проскакивает искра, и в коле-

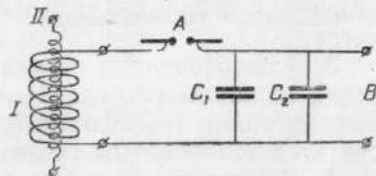


Рис. 19. Схема трансформатора Тесла.

бательном контуре трансформатора возникает высокочастотный переменный ток. В связи с этим внутри первичной катушки появляется высокочастотное переменное магнитное поле. Вторичная катушка окажется в этом поле. В результате явления электромагнитной индукции во вторичной катушке возбуждается переменный ток такой же частоты. Иными словами, во вторичной катушке возникнут вынужденные электрические колебания. На концах вторичной катушки появится высокое напряжение. Оно обусловлено не только соотношением числа витков первичной и вторичной катушек, а, главным образом, тем обстоятельством, что вторичная катушка настроена в резонанс по отношению к току колебательного контура (периоды обоих колебаний совпадают). Во вторичной катушке возникают токи (частота их такова же, как и в первичной катушке), вследствие чего на концах ее попеременно скапливаются в большом количестве то положительные, то отрицательные заряды. Так как шарики на концах вторичной катушки малы (значит, малы и емкости), то поэтому напряженность поля около них огромна.

Из очень большого количества опытов, которые могут быть поставлены с трансформатором Тесла, оставимся на следующих.

1. Тихий разряд в воздух. Затемнив аудиторию, приведем в действие трансформатор. Около верхнего шарика вторичной катушки легко наблюдается фиолетовое свечение.

2. Свечение неоновой лампы. Так называемая сигнальная неоновая лампочка (по форме баллона напоминающая лампу накаливания) своим одним контактом („пяточкой“) прижимается к верхнему концу — шарику вторичной катушки трансформатора. Газ в лампе светится.

3. Флюоресценция стекла. Пустотная лампа накаливания прижимается своей „пяточкой“ к концу вторичной катушки трансформатора. Стекло баллона лампы светится зеленоватым светом.

4. Разряд в разреженном газе. Газополная лампа накаливания прижимается к концу вторичной катушки так же, как пустотная лампа в предыдущем опыте. Газ в лампе светится.

5. Свечение газосветных трубок. Один конец трубки (Гейслера, Плюккера) держат в руке, другим концом (выводом от электрода) прикасаются к верхнему концу вторичной катушки трансформатора. Газ в трубке светится.

6. Свечение безэлектродных трубок Тесла. Держа один конец трубки Тесла (трубка с разреженным газом, без электродов) в руке, поднесем другой ее конец (не очень близко) ко вторичной катушке трансформатора. Газ в трубке светится.

7. Искровой разряд. а) Воспользуемся разрядником, схематично изображенном на рис. 20. Соединим его с концами вторичной катушки и будем постепенно сближать шарики разрядника. При некотором относительно большом расстоянии между шариками разрядника можно наблюдать тихий светящийся разряд, а при последующем уменьшении расстояния — возникающую сильную искру. б) Соединим с концами вторичной катушки роговидный разрядник, схематично показанный на рис. 21. При этом будем наблюдать непрерывное образование и кажущееся всползание искры вдоль рогов разрядника.

8. Переменное поле высокой частоты. Два металлических листа расположим вертикально на расстоянии 20—100 см друг от друга. Листы соединим с концами вторичной катушки, причем лист, соединенный с верхним концом катушки, изолируем от земли. В поле между листами подвесим на нитках трубки с разреженными газами. Газ светится.

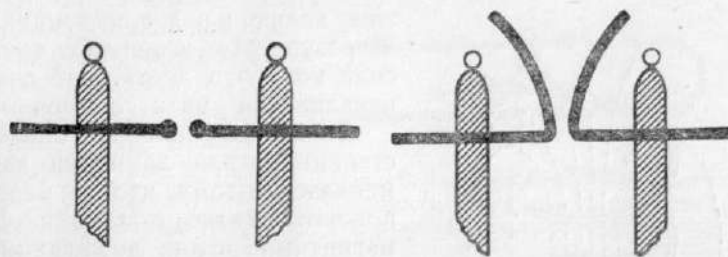


Рис. 20. Искровой разрядник к трансформатору Тесла.

Рис. 21. Роговидный разрядник к трансформатору Тесла.

9. Возбуждение э. д. с. индукции в витке с последовательно включенной лампочкой накаливания. Воспользуемся деталью, имеющейся в наборе к трансформатору: один виток проволоки, последовательно с которым включена лампочка накаливания от карманного электрического фонаря. Вынем из трансформатора Тесла вторичную катушку. Приведем в действие трансформатор. Поднесем сверху виток с лампочкой к первичной катушке трансформатора, расположив его параллельно виткам катушки. Лампочка ярко горит. Будем медленно поворачивать виток с лампочкой, переводя его из положения, параллельного виткам катушки, в перпендикулярное. Лампочка начинает гореть все менее и менее ярко и, наконец, в последнем положении (перпендикулярном к виткам катушки) гаснет.

В этом опыте полезно обратить внимание на следующее. Известно, что э. д. с. индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника. Эта зависимость выражается формулой:

$$E = -k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, а Δt — время, в течение которого это изменение произошло. В данном случае имеется всего один виток, последовательно с которым включена лампочка, но так как в этом случае мы имеем дело с высокочастотным переменным током, то поэтому скорость изменения магнитного потока, пронизывающего контур витка, велика, а потому велика и э. д. с. индукции.

В результате возникает ток, сила которого достаточна для накаливания нити лампочки.

Во второй половине опыта степень накала лампочки изменялась потому, что по мере поворота витка с лампочкой магнитный поток, выходящий из первичной катушки трансформатора и пронизывающий контур витка, становился меньше. На рис. 22 схематично показан магнитный поток, выходящий из первичной катушки трансформатора. Направление его указано для того момента времени, когда ток в катушке имеет направление, показанное на рисунке.

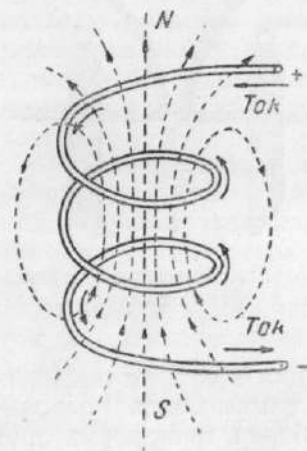


Рис. 22. Схематическое изображение магнитного поля первичной катушки трансформатора Тесла.

10. Емкостный ток. Один человек, касаясь рукой шарика вторичной катушки трансформатора (чтобы избежать неприятных ощущений при проскакивании искры с шарика на подносимую руку, надо в эту руку взять какой-либо металлический предмет и им касаться шарика катушки, а не непосредственно рукой), в другой руке держит за цоколь неоновую лампу, которая при этом или вовсе не светится, или светится, но очень слабо. Другой человек подносит к лампе руку. Лампа вспыхивает. Человек, подносящий к лампе руку, представляет собою одну обкладку конденсатора, земля — другую. В этой цепи существует высокочастотный переменный ток подобно тому, как это имело место в опыте, описанном в § 2. Вследствие большой частоты переменного тока, несмотря на небольшую емкость созданного

нами конденсатора, емкостное сопротивление его будет относительно невелико.

11. Самоиндукция в цепи тока высокой частоты. Известно, что индуктивное сопротивление зависит не только от величины индуктивности проводника, но и от частоты переменного тока, и что в случае высокочастотного переменного тока проводники с очень небольшой индуктивностью оказывают току очень большое индуктивное сопротивление.

Возьмем изогнутый в форме, показанной на рис. 23, медный толстый провод. Длина дуги метра полтора. Этот провод своими концами A и C в дальнейшем будет нами включаться в трансформатор Тесла — в гнездо первичной его катушки, которая так же, как и вторичная, из трансформатора вынимается.

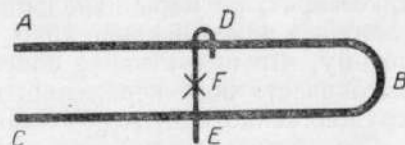


Рис. 23. Контур для демонстрации зависимости индуктивного сопротивления от частоты переменного тока.

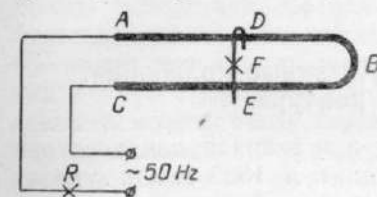


Рис. 24.

Та-ким образом этот дугообразный проводник окажется частью колебательного контура трансформатора. Дугообразный проводник располагается горизонтально. Его горизонтальные ветви соединяются проводником (верхний конец его загнут крючком так, чтобы проводник DE вместе с лампой F можно было двигать вдоль контура ABC), соединенным с патроном, в который ввинчена лампа. Лампа на 4, 6, 12 или 120 вольт подбирается опытным путем.

Сначала этот контур с лампочкой включим в городскую осветительную сеть переменного (50 герц) тока с последовательно с ним включенной лампой накаливания R в качестве реостата, как это показано на рис. 24.

Обнаруживаем, что лампа F при любом положении подвижного проводника DE не горит. Это объясняется тем, что активное и индуктивное (при частоте в 50 герц) сопротивления дуги DBE малы, и потому ток преимущественно идет по этой дуге, а не через параллельно

подключенную к ней лампу, сопротивление которой относительно велико. Затем этот же контур ABC включаем в гнезда первичной катушки трансформатора Тесла, вынув первичную и вторичную катушки. Передвигая DE вдоль ABC , обнаруживаем, что когда проводник DE с лампой F находится вблизи AC , лампа F ярко горит; по мере передвижения DE к концу B она горит все менее и менее ярко. Нить лампы накаливается потому, что индуктивное сопротивление дуги DBE для высокочастотного переменного тока велико и ток преимущественно идет через лампу.

То обстоятельство, что лампа F горит менее ярко по мере передвижения ее к B , свидетельствует о том, что с уменьшением площади контура DBE индуктивное сопротивление его уменьшается. Чтобы показать, что в этом случае имеет значение площадь DBE , а не длина проводника, можно взять не жесткий, а гибкий проводник и скручивать его, свивая DB и EB вместе. Эффект будет тот же (см. Галантин и др. „Физический эксперимент в школе“, т. V).

§ 9. Свободные и вынужденные колебания. Настройка контура.

Электрические колебания при разряде конденсатора были предсказаны В. Томсоном в 1853 г. Он указал условия их возникновения и дал формулу, дающую возможность определить период электрических колебаний, а значит, и их частоту. Рассматривая условия, в которых возникают электрические колебания (см. § 4), можно предположить, что период электрических колебаний, а значит, и их частота, зависят от величины емкости и индуктивности колебательного контура. Исследования показали, что эта зависимость в действительности существует. Оказалось, что период электрических колебаний, возникающих в идеальном контуре, т. е. в контуре, не имеющем активного сопротивления, может быть определен по формуле, носящей название формулы Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где T — период колебаний в секундах, L — индуктивность контура в генри, а C — емкость в фарадах.

Так как $\nu = \frac{1}{T}$, то частота колебаний в идеальном контуре может быть определена по формуле:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Формула Томсона выводится из уравнения Максвелла. Для реальных контуров, имеющих активное сопротивление, пользуются формулой:

$$T = \frac{2\pi\sqrt{LC}}{\sqrt{1 - \frac{r^2C}{4L}}},$$

где r — активное сопротивление контура.

Как видно из этой формулы, период колебаний зависит и от активного сопротивления контура, так как оно оказывает задерживающее действие на движение в контуре зарядов, вследствие чего период колебаний увеличивается. Кроме того, затухание колебаний происходит вследствие потерь энергии, и оно будет тем больше, чем больше активное сопротивление контура. Очевидно, что при значительном активном сопротивлении потери энергии, а следовательно, и затухание колебаний может быть столь значительным, что колебания не возникнут, а конденсатор разрядится (без перезарядки) током одного направления. Такой разряд называют *апериодическим*. График его дан на рис. 25.

Из формулы

$$T = \frac{2\pi\sqrt{LC}}{\sqrt{1 - \frac{r^2C}{4L}}}$$

видно, что разряд будет апериодическим, если $\frac{r^2C}{4L}$ будет больше единицы. Ясно, что выражение $\frac{r^2C}{4L}$ будет больше единицы, если омическое сопротивление контура r будет больше $2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Апериодический разряд аналогичен движению маятника, погруженного в густое масло. Такой маятник, выведенный из положения равновесия, медленно возвращается в него обратно, не совершая колебаний.

Незатухающие колебания, происходящие в идеальном контуре, лишенном активного сопротивления, называются свободными колебаниями.

Если затухания колебаний имеются, но они очень невелики, их, обычно, не учитывают и считают колебания свободными.

Рассмотренные нами в § 4 колебания в цепи с конденсатором и катушкой самоиндукции мы считали свободными. Возникали они потому, что конденсатор был нами предварительно заряжен. Периодические изменения силы тока в этой цепи были обусловлены периодически изменяющимся напряжением на пластинах конденсатора.

Свободные незатухающие колебания, происходящие под действием периодически изменяющейся э. д. с., принадлежащей самому контуру, называются собственными колебаниями.

Частота этих колебаний называется собственной частотой данного колебательного контура. Каждый колебательный контур характеризуется присущей ему собственной частотой, зависящей от емкости и индуктивности контура. (То же самое имеет место и в механических колебаниях. Так, например, каждый маятник имеет собственную, присущую ему частоту колебаний, зависящую от длины маятника и ускорения силы тяжести).

Как мы увидим в дальнейшем, электрические колебания могут происходить в колебательном контуре и под действием внешней периодически изменяющейся э. д. с.

Колебания, происходящие под действием постоянной контуру периодически изменяющейся э. д. с., называются вынужденными. Очевидно, что частота вынужденных колебаний в контуре равна частоте колебаний э. д. с.

Итак, каждый колебательный контур обладает присущей ему собственной частотой колебаний. С другой стороны, как об этом было сказано выше, период, а значит и частота колебаний в контуре, зависит от ве-

личины емкости и индуктивности контура. Отсюда ясно, что изменяя емкость или индуктивность контура или и то и другое одновременно, мы можем изменять частоту собственных колебаний контура или, как говорят, *настраивать контур на заданную частоту колебаний*. Эта настройка контуров имеет исключительно большое значение в радиотехнике.

Практически настройка колебательных контуров осуществляется с помощью катушек самоиндукции с переменной индуктивностью (посредством подвижного контакта в контур включаются или все витки катушки, или часть их) и конденсаторов переменной емкости.

§ 10. Электронный осциллограф (электроннолучевая трубка).

Познакомившись с электрическими колебаниями, мы должны в общих чертах познакомиться с методами их наблюдения. Механические колебания физических тел, воздействуя на наши органы чувств, становятся доступными для восприятия их нами. Так, мы видим колебания маятника, груза, подвешенного к пружине. Колебания камертона с длинными ветвями (вспомним камертон с острием, с помощью которого можно „записать“ колебания на закопченном стекле) обнаруживаются глазом. Колебания камертона с короткими ветвями воспринимаются нашим ухом как звук.

Электрические колебания непосредственно нами не воспринимаются. Для обнаружения их необходимо превратить электрические колебания в механические.

Задача эта может решаться различными путями.

Так, если пропускать ток, сила которого периодически изменяется, через обмотку электромагнита телефона (или электромагнитного громкоговорителя), то мембрана телефона (или диффузор громкоговорителя) будет колебаться. Происходит это потому, что колебания силы тока вызывают периодические изменения (колебания) силы притяжения, действующей на мембрану. Телефон не пригоден для регистрации колебаний тока высокой частоты, так как мембрана вследствие инерции не сможет следовать за колебаниями тока.



Рис. 25. График аperiodического разряда.

Меньшей инерцией обладает подвижная система в шлейф-осциллографе. Принцип действия его такой же, как и зеркального гальванометра: ток пропускается по легкой рамочке, которая может поворачиваться в магнитном поле постоянного магнита. В шлейф-осциллографе роль рамочки выполняет легкая узкая петля (шлейф). Такой осциллограф пригоден для обнаружения электрических колебаний до 20 000 герц.

Для исследования электрических колебаний более высокой частоты прибегают к помощи электронного (или иначе — катодного) осциллографа, основной частью которого является электроннолучевая трубка.

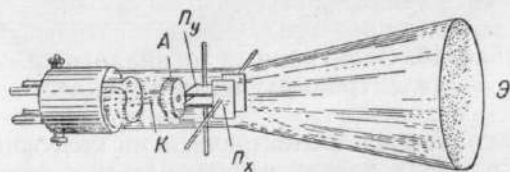


Рис. 26. Электроннолучевая трубка.

Электроннолучевая трубка устроена следующим образом. Из стеклянного баллона, имеющего на одном конце конусообразное расширение (рис. 26), воздух откачан до высокого вакуума. Внутренняя поверхность стекла в части трубки Э покрыта каким-либо веществом (например, окисью цинка), способным флуоресцировать под действием ударов электронов. Внутри трубки имеется несколько электродов. Буквой *K* обозначен катод (он может быть различного устройства), в основе которого — нить накала, испускающая при накаливании электроны. Буквой *A* обозначен анод (обычно цилиндрической формы), которому сообщается высокий положительный потенциал относительно катода (порядка нескольких сотен или тысяч вольт). За анодом помещаются две пары пластин: *Py* — пластины вертикального отклонения (или пластины игрек) и *Px* — пластины горизонтального отклонения (или пластины икс).

Проводники от электродов подводятся к штырькам на доколе трубки. На рис. 26 они для ясности показаны выведенными через стенки трубки.

Электроннолучевая трубка работает следующим образом. Накаленный катод *K* испускает электроны, ко-

торые под действием сил электрического поля летят по направлению к аноду, получая значительное ускорение, а значит — и скорость. Под действием электрических полей особых электродов, не показанных на рисунке (управляющий электрод около катода, второй, а иногда и третий анод с диафрагмами),¹ поток электронов обращается в тонкий пучок, в так называемый электронный луч.

Электронный луч, по выходе из анода, проходит через две пары пластин *Py* и *Px*. Если к последним не подведено напряжение, то электронный луч пройдет между ними, не претерпев отклонения, и попадет на экран Э, вызвав на нем появление светящегося пятнышка. Если на пластины *Py* подано переменное напряжение, то электронный луч, а значит и светлое пятнышко на экране, будет колебаться по вертикали. На эти пластины *Py* подается исследуемое напряжение.

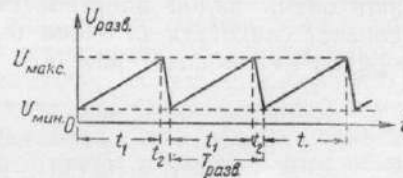


Рис. 27. График пилообразного напряжения.

На пластины *Px* с помощью особого генератора развертки подается так называемое пилообразное напряжение, график которого дан на рис. 27. Если на пластины *Px* подано пилообразное напряжение, а пластины *Py* не заряжены, то электронный луч и пятнышко на экране в течение промежутка времени, пока растет напряжение на пластинах *Px* (до верхнего конца зубца „пилы“), равномерно движутся по горизонтали. Когда же напряжение на пластинах *Px* резко упадет, луч и пятнышко на экране чрезвычайно быстро вернутся в исходное положение, после чего начнут опять равномерное движение по горизонтали. Если на пластины *Py* подано исследуемое переменное напряжение, а на пластины *Px* пилообразное, то пятнышко на экране будет участвовать одновременно в двух движениях. В результате, электронный луч „нарисует“ на экране развертку исследуемого напряжения во времени. Для того чтобы „рисованная“ на экране кривая казалась неподвижной,

¹ См. И. П. Жеребцов. Радиотехника. Связьиздат, 1953.

надо, чтобы период пилообразного напряжения или был равен периоду напряжения на пластинах P_y или был бы в целое число раз больше.

Если на пластины P_y подать переменное напряжение от городской осветительной сети, то на экране электроннолучевой трубки будет видна синусоида.

Заряд, приносимый пучком электронов на экран, необходимо отводить. С этой целью внутренние стенки трубки покрываются слоем проводящего вещества (графита), соединенного с землей. Так как электроны обладают очень малой инертностью, то электронный луч успевает следовать за очень быстрыми колебаниями — порядка миллионов герц.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.

Из изложенных первых семи параграфов в учебный план темы входят четыре: § 1 — искровой разряд, § 4 — электрические колебания, § 6 — затухающие и незатухающие колебания и § 7 — колебательный контур и возбуждение в нем колебаний. Основным в этой части учебного материала является создание у учащихся правильных представлений о колебательном контуре и об электрических колебаниях в нем. Опыт работы с учащимися X класса свидетельствует о том, что в решении этой задачи учитель физики встречается с весьма большими трудностями. Они вызваны многими причинами, основными из которых являются следующие. Рассказывая о возбуждении электрических колебаний в контуре, обладающем емкостью и индуктивностью, мы имеем дело со сдвигом фаз между током и напряжением, с трудным для учащихся вопросом о влиянии конденсатора и катушки самоиндукции на режим тока в контуре.

Этих вопросов учащиеся раньше не изучали. С другой стороны, объясняя процесс возбуждения электрических колебаний в контуре, без них нельзя обойтись; поэтому с ними приходится знакомить учащихся не предварительно, а во время рассмотрения электрических колебаний и в связи с ними. Изложение вопроса об электрических колебаниях в § 4 дано с учетом

этого обстоятельства, но кроме того, в § 2 и 3 кратко рассмотрен вопрос о емкости и индуктивности в цепи постоянного и переменного тока. В этих же параграфах даны начальные представления об емкостном и индуктивном сопротивлениях и единицах для их измерения. Понятие о реактивных сопротивлениях не входит в программу курса физики средней школы и потому не является обязательным. Но вместе с тем, формирование у учащихся самых общих и начальных представлений об емкостном и индуктивном сопротивлениях по ряду причин надо считать крайне желательным. И это не так трудно осуществить. Дело в том, что в соответствии с программой учащимся рассказывается об электроемкости проводников, о конденсаторах, об явлении самоиндукции, о катушках самоиндукции. Опыт работы с учащимися X классов установлено, что нужно очень немного времени для того, чтобы в связи с этим обязательным программным материалом и на базе его дать учащимся понятие об емкостном и индуктивном сопротивлениях. Многие учителя физики X класса так и поступают. В соответствии с этим некоторая часть материала § 2 и 3 может быть рассказана на уроке. При отсутствии такой возможности желательно использовать указанные параграфы во внеклассных занятиях.

В связи с этим остановимся как здесь, так и в последующих указаниях на некоторых методических ображениях применительно ко всем параграфам, а не только к тем, которые входят в учебный план темы.

§ 1. Рассказывая учащимся об опытах по намагничиванию стальной спицы током, возникающим при искровом разряде, надо напомнить им правило, с помощью которого можно определить, какой полюс окажется на верхнем конце спицы и какой — на нижнем (см. рис. 1). Очевидно, что для этого нужно знать знак зарядов, сообщенных нами внутренней обкладке лейденской банки. На наружной обкладке банки вследствие явления электростатической индукции появятся заряды противоположного знака. Заряды, одноименные с зарядами внутренней обкладки, будут отведены в землю. На рис. 1 показано заземление. Следует учесть, что если специального заземления и не сделано, а банка просто поставлена на стол, то и в этом случае ее наружная обкладка окажется заземленной, так как при всех

опытах по электростатике мы имеем дело с высоким потенциалом заряженных проводников, при котором сила тока, идущего через дерево и другие строительные материалы, оказываются не равной нулю, как это имеет место при напряжениях невысоких.

Как указано в тексте § 1, если активное сопротивление проволоки-обмотки стальной намагничиваемой спицы велико, то полюсы на спице появляются в соответствии с правилами электродинамики. Это происходит потому, что в этом случае имеет место аperiодический разряд конденсатора — разряд током одного направления (подробнее об этом сказано в § 9).

Опытное исследование искрового разряда, подтвердившее колебательный характер его, чрезвычайно интересно и поучительно. К сожалению, рассказывать об этих опытах на уроке, вероятно, не придется из-за недостатка времени. Поэтому применительно к данной части учебного материала возможна такая система его построения: а) рассказываем учащимся об опытах по намагничиванию стальной спицы током, возникающим при искровом разряде, и о результатах этих опытов, б) сообщаем о сделанном предположении, что при искровом разряде имеет место ток переменный, а не постоянный и в) говорим учащимся о том, что справедливость указанного предположения была экспериментально доказана, причем поставленные с этой целью опыты не только с несомненностью подтвердили, что при искровом разряде конденсатора возникает переменный ток, но и дали возможность подсчитать его частоту. Сообщив учащимся, что в различных опытах частота переменного тока оказалась различной, но во всех случаях порядка миллионов и десятков миллионов герц, переходим к заключительному выводу, приведенному в конце § 1. При этом важно учесть следующее соображение.

Для того чтобы у учащихся не сложилось неправильное представление о том, что причина возбуждения колебаний лежит в самой искре или в свойствах конденсатора, необходимо обратить их внимание на то, что обмотка спицы (о которой говорилось в начале § 1) является катушкой самоиндукции. Иными словами, разряд конденсатора происходит в цепи с емкостью и индуктивностью. Дальше (в § 3) учащиеся узнают, что

в такой цепи возникают электрические колебания и она называется колебательным контуром.

§ 2. Для осознанного усвоения условий, в которых в колебательном контуре возникают электрические колебания, необходимо представлять себе „поведение“ емкости и индуктивности в цепи переменного тока. Рассмотрение этого последнего вопроса является той ступенью в знаниях, от которой легко перейти к следующей — к рассмотрению процесса возбуждения колебаний в колебательном контуре. Некоторые возможности в этом отношении учителем физики могут быть найдены. Имея в виду необходимость подготовить учащихся к усвоению темы „Электромагнитные колебания и волны“, целесообразно сделать следующее.

При изучении темы „Электрическое поле“ учащиеся знакомятся с устройством конденсаторов, с их типами. Естественно в это время очень кратко рассмотреть и цель постоянного и переменного тока с включенным в них конденсатором. (Общие, начальные представления о постоянном и переменном токе, нужные для усвоения указанного вопроса, у учащихся X класса имеются.)

С этой целью можно показать учащимся опыты со включением конденсатора в цепь постоянного и переменного тока, описанные в § 2, и прийти к существенному выводу о том, что конденсатор в цепи переменного тока разрыва не создает. Это положение подтверждается опытом и тем упрощенным, доступным для учащихся объяснением, которое дано в § 2. Рассматривая конденсатор в цепи переменного тока, мы говорим, что в такой цепи конденсатор не создает разрыва, избегая выражения „переменный ток проходит через конденсатор“, дабы не создавать у учащихся неверных, ошибочных представлений. Иногда в процессе объяснения — почему конденсатор своим диэлектриком не создает разрыва в цепи переменного тока, мы сталкиваемся со следующим затруднением у учащихся. К правой щетке генератора (рис. 6), когда она является положительным полюсом, подтекают электроны с правой пластины конденсатора, накопившиеся на этой правой пластине в течение предыдущего полупериода. У учащихся создается впечатление, что в связи с этим полярность правой щетки генератора должна измениться на

обратную за счет пришедших к ней из цепи электронов. В этом случае следует сказать учащимся, что правая щетка генератора, несмотря на то, что к ней подходят электроны, остается положительной в связи с тем процессом разделения положительных и отрицательных зарядов (нарушения электрического равновесия), какой происходит внутри любого генератора и благодаря которому мы его и называем „источником“ тока.

Опыт работы с учащимися X класса свидетельствует о том, что на базе описанной в § 2 демонстрации конденсатора в цепи переменного тока (рис. 6) нетрудно (как в отношении времени, нужного для изложения, так и в отношении доступности для учащихся) дать учащимся понятие об емкостном сопротивлении, которое оказывает переменному току конденсатор, и о зависимости сопротивления конденсатора от его емкости. Зависимость емкостного сопротивления от частоты переменного тока может быть проиллюстрирована позже (когда будем демонстрировать опыты с трансформатором Тесла).

Представление о том, что емкостное сопротивление не вызывает потерь энергии, прямо вытекает из объяснения того, почему конденсатор не создает разрыва в цепи переменного тока.

Итак, вопрос о конденсаторе в цепи тока необходимо рассматривать в теме „Электрическое поле“. Если учитель придерживается такого плана, то ко времени урока, на котором будут рассматриваться электрические колебания, следует задать учащимся повторить этот материал.

§ 3. Невозможно понять „механизм“ возникновения электрических колебаний в колебательном контуре, если не учесть влияния катушки самоиндукции на режим тока в цепи. Поэтому: 1) изучению явления самоиндукции должно быть уделено достаточно внимание и 2) должна быть достаточно основательно рассмотрена цепь тока с катушкой самоиндукции. В соответствии с программой по физике для средней школы ознакомление учащихся с этими вопросами может быть осуществлено в следующей последовательности.

Явление самоиндукции рассматривается в связи с темой „Электромагнитная индукция“. Рассказываем учащимся о том, что э. д. с. индукции может быть

возбуждена в проводнике с током вследствие изменения его собственного магнитного поля, а не поля „постороннего“ для данного проводника. Устанавливаем, что возбуждение э. д. с. индукции в проводнике с током, вызываемое изменением его собственного магнитного поля, называется самоиндукцией, а возникающая в этом случае э. д. с. называется электродвижущей силой самоиндукции. Приходим к заключению, что э. д. с. самоиндукции возникает в любой цепи постоянного тока при замыкании и размыкании цепи, при всяком изменении силы тока в ней.

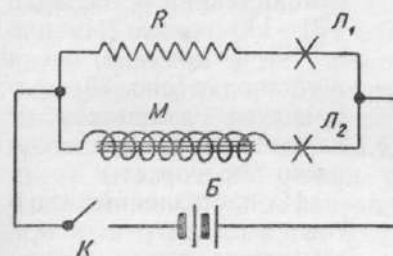


Рис. 28. Схема установки для демонстрации э. д. с. самоиндукции при замыкании цепи.

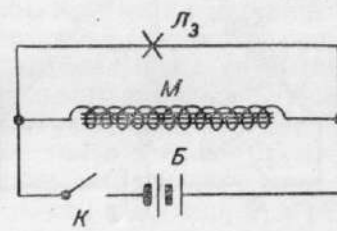


Рис. 29. Схема установки для демонстрации э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи.

В соответствии с законом Ленца э. д. с. самоиндукции при замыкании цепи противодействует току, так как имеет направление, противоположное току, а при размыкании цепи направление э. д. с. самоиндукции совпадает с током. Вследствие этого — при замыкании цепи сила тока нарастает от нуля до некоторого своего значения не мгновенно, а в течение некоторого, хотя и небольшого, промежутка времени. Точно так же при размыкании цепи — сила тока падает до нуля не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени. Далее, проверяем опытным путем справедливость выдвинутых положений: демонстрируем известные опыты возбуждения э. д. с. самоиндукции при замыкании и размыкании цепи. Схемы установок для этих демонстраций приведены на рис. 28 и 29.

В качестве катушки самоиндукции M используем сердечник школьного разборного трансформатора с надетой на него катушкой (нужную катушку подобрать на опыте).

L_1 и L_2 — лампы от карманного электрического фонаря, L_3 — лампа такая же или сигнальная неоновая („пятачковая“), с потенциалом зажигания в 127 вольт, B — батарея аккумуляторов приблизительно на 4 вольта. Демонстрируя возбуждение э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи, полезно обратить внимание учащихся на следующее обстоятельство. В цепь (рис. 28) включена батарея аккумуляторов на 4 вольта. Вспышка неоновой лампы при размыкании цепи свидетельствует

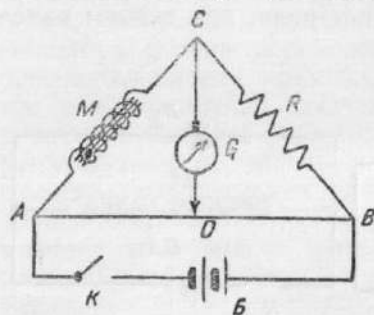


Рис. 30. Схема установки для демонстрации э. д. с. самоиндукции при замыкании и размыкании цепи.

о том, что при размыкании цепи возникает э. д. с. самоиндукции порядка 120—130 вольт. (Именно по этой причине, если в установке (рис. 28) применяется лампочка от карманного фонаря — она часто перегорает.) Из поставленных опытов вытекает, что при замыкании цепи (или при увеличении силы тока в цепи) э. д. с. самоиндукции противоположна току, а при размыкании цепи (или при уменьшении силы тока в цепи) э. д. с. самоиндукции по направлению совпадает с током. Индикаторами э. д. с. самоиндукции в обоих случаях служат лампы. В методическом отношении ценно поставить опыт в таком варианте, в котором наблюдалось бы направление э. д. с. самоиндукции при замыкании и размыкании цепи. Схема установки, нужной для этой цели, показана на рис. 30, где AB — реоход с движком, M — катушка самоиндукции такая же, как в предыдущих опытах, R — магазин сопротивлений, G — школьный универсальный гальванометр с нулем посредине шкалы, K — рубильник, B — батарея аккумуляторов на 4 вольта. До начала демонстрации подбираем такое сопротивление в магазине R , чтобы при замкнутой цепи в мостике CD тока не было. Демонстрацию можно вести в следующей последовательности. Замыкаем цепь рубильником K . Стрелка гальванометра отклоняется в ту или иную сторону и затем возвращается к нулю.

Очевидно, при установившемся токе в параллельных ветвях ACB и ADB потенциал в точках C и D одинаков; тока в мостике CD нет. При замыкании цепи, т. е. при появлении в цепи, а значит и в катушке M , тока, в последней возникла э. д. с. самоиндукции, существовавшая во все время нарастания силы тока от нуля до некоторого постоянного значения. В течение этого промежутка времени потенциал в точках C и D был различен, по мостику CD шел ток. Затем размыкаем цепь. Стрелка гальванометра опять отклоняется, но уже в сторону, противоположную той, в какую она отклонялась при замыкании цепи, и затем снова возвращается к нулю. Очевидно, что при размыкании цепи в катушке M снова возникла э. д. с. самоиндукции, существовавшая в течение того промежутка времени, пока сила тока изменялась от своего первоначального значения до нуля; потенциал точек C и D был различен, и по мостику CD снова шел ток. Но теперь уже ток в мостике CD идет в противоположном направлении, что свидетельствует о том, что направление э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи противоположно направлению ее при замыкании цепи.

Анализируя поставленные опыты, надо сказать учащимся о том, что э. д. с. самоиндукции возникает во всех участках цепи: и в линейных проводниках, и в релостате, и в катушке, но результаты опытов свидетельствуют о том, что в катушке возникает э. д. с. самоиндукции наибольшей величины.

Дальше можно перейти к понятию о коэффициенте самоиндукции (индуктивности) проводников, об единицах для измерения индуктивности и о факторах, влияющих на величину индуктивности проводников. Для этого можно использовать соответствующую часть материала § 3.

В заключение рассказываем учащимся о причинах образования искры при размыкании цепи и об образовании дуги при размыкании цепи тока большой мощности, а так же о способах борьбы с дугой (в частности, о масляных выключателях).

Ознакомление учащихся с понятием об индуктивном сопротивлении целесообразно осуществить немножко позже, а именно — в связи со следующей (по времени изучения) программной темой „Генераторы. Моторы.

Трансформаторы", после того, как учащимся будет дано понятие о переменном токе и способах генерирования его.

Усвоение учащимися происхождения индуктивного сопротивления переменному току не вызывает сколько-нибудь больших трудностей, если были достаточно основательно рассмотрены явления самоиндукции и переменный ток. Правильному представлению об индуктивном сопротивлении может помочь следующий эффектный опыт.

Когда в установке (по схеме рис. 28) замкнуть цепь, то лампочка L_2 загорится, но позднее лампочки L_1 . Если же очень часто замыкать и размыкать эту цепь ключом, то лампочка L_2 вовсе не горит. Замыкание и размыкание цепи тока в этом опыте аналогично увеличению и уменьшению силы тока. Отсюда естественный переход к индуктивному сопротивлению, оказываемому катушкой переменному току.

Не давая учащимся формул индуктивного сопротивления, следует все же сказать им о том, что индуктивное сопротивление возрастает с увеличением частоты переменного тока.

Для усвоения учащимися дальнейшего, существенно дать им понятие о том, что энергия переменного тока, идущего по катушке самоиндукции, в течение одной четверти периода (когда сила тока возрастает) переходит в энергию магнитного поля, а в течение второй четверти периода, когда сила тока падает до нуля, магнитная энергия поля переходит снова в энергию тока.

При указанной выше системе построения программного материала учащиеся будут подготовлены к осознанному усвоению условий возбуждения электрических колебаний в электрической цепи с емкостью и индуктивностью.

К уроку, на котором будет разбираться колебательный контур, следует задать учащимся повторить дома (в общих чертах) все, известное им об индуктивном сопротивлении и о катушке самоиндукции в цепи переменного тока.

Если последний вопрос отдельно не рассматривался, то на нем придется особенно основательно и не спеша остановиться, разбирая процесс возбуждения электрических колебаний в колебательном контуре. При нали-

чий времени полезно предварительно (до изучения электрических колебаний) кратко рассказать о конденсаторе (если этот вопрос раньше не изучался) и катушке самоиндукции в цепи переменного тока.

В связи с рассмотрением явления самоиндукции полезно учесть следующее соображение.

Как известно, электродвижущая сила есть величина скалярная, а не векторная. В соответствии с этим приписывать электродвижущей силе направление, строго говоря, нельзя. Тем не менее обычно э. д. с. присваивается знак. В ряде случаев это удобно, однако условность этого приема следует иметь в виду.

Излагая материал § 1—3, мы знакомим учащихся с рядом терминов, употребляемых в современной физике. Термин „емкость“ принято употреблять не только по отношению к величине, характеризующей известное свойство проводника, но и по отношению к прибору-конденсатору. Аналогично этому, термин „индуктивность“ употребляют, имея в виду или величину, характеризующую свойства проводника, или прибор — катушку самоиндукции. Термин „индуктивность“ (в смысле физической величины) чаще применяется, чем термин „коэффициент самоиндукции“. Эта терминология принята и в данной книге.

Термин „сила тока“ в последние годы все чаще и чаще заменяется термином „ток“. В связи с тем, что последнее из названий для указанной физической величины еще мало употребляется в средней школе, а также потому, что для учащихся не всегда может быть ясным, когда термин „ток“ относится к явлению, а когда к величине, характеризующей это явление, в ряде случаев в книге сохранен термин „сила тока“.

§ 4. Материал этого параграфа входит в учебный план и посвящен одному из основных вопросов темы. Существенно, чтобы при изучении его учащиеся поняли и осознали, что в основе электрических колебаний в контуре лежит преобразование электростатической энергии заряженного конденсатора в энергию магнитного поля и наоборот.

При изложении процесса возбуждения электрических колебаний в контуре мы сталкиваемся со сдвигом фаз между напряжением и током. Опыт работы с учащимися X класса свидетельствует о том, что это место темы

служит источником больших затруднений для учащихся. Мысль о том, что сила тока в контуре максимальна в то время, когда напряжение на обкладках конденсатора равно нулю, — нова для учащихся и потому неожиданна для них. Это затруднение, которое может повлечь за собой неверные в научном отношении представления, необходимо и возможно предусмотреть и избежать. Если в процессе объяснения возбуждения колебаний в контуре будет достаточно четко выявлена роль катушки самоиндукции, то для учащихся будет ясно, что запаздывание во времени изменения силы тока от изменения напряжения на обкладках конденсатора обусловлено „тормозящим“ действием катушки самоиндукции; что именно по этой причине сила тока в контуре с момента начала разряда конденсатора успевает нарасти до максимума только к тому моменту времени, когда напряжение на обкладках конденсатора станет равным нулю. А когда в следующую четверть периода сила тока начнет уменьшаться, „тормозящее“ действие катушки самоиндукции скажется в том, что она поддержит этот убывающий ток, вследствие чего он упадет до нуля к тому моменту времени, когда напряжение на обкладках конденсатора станет максимальным.

Усвоению учащимися этого процесса может существенно помочь график силы тока, данный на рис. 14. Может оказаться полезным и следующее дополнение, какое можно сделать на этом графике.

Говоря учащимся об изменениях силы тока и напряжения на конденсаторе в колебательном контуре, подчеркиваем, что напряжение на конденсаторе изменяется во времени так же по синусоидальному закону, как изменяется и сила тока. Отсюда — можно начертить не только график силы тока, но и график зависимости напряжения на обкладках конденсатора от времени, т. е. график напряжения. Начерченный отдельно от графика силы тока график напряжения будет также представлять собою синусоиду.

Если же мы хотим представить себе картину зависимости силы тока и напряжения от времени сразу для одних и тех же моментов времени, то тогда следует график напряжения нанести на те же координатные оси, на которых построен график силы тока, но при этом учесть, что максимальное значение напряжения будет

в тот момент времени, когда сила тока равна нулю и наоборот. В итоге получится график, показанный на рис. 31.

В некоторых школах учителя физики при изучении в X классе механических колебаний и волн знакомят учащихся с понятием о фазе колебания. В этом случае учащимся может быть сказано, что сдвиг фаз между напряжением и током в колебательном контуре равен четверти периода или 90° .

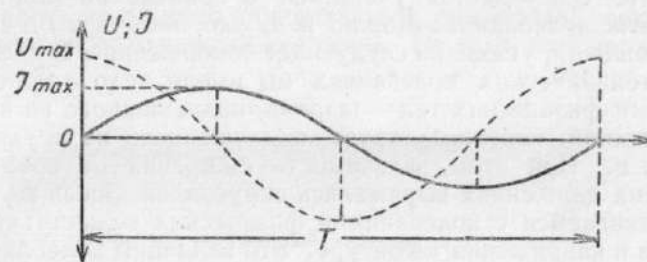


Рис. 31. График зависимости силы тока и напряжения от времени в цепи с емкостью и индуктивностью.

При изложении вопроса об электрических колебаниях существенно учесть, что иногда при объяснении колебаний в контуре создается впечатление, что электроны переходят с одной пластины конденсатора на другую, совершая колебания с огромной (по сравнению с действительной) амплитудой. Надо объяснять так, чтобы избежать такого ошибочного представления. В ориентированное движение под действием сил поля и э. д. с. самоиндукции приходят свободные электроны не только той пластины конденсатора, которая заряжена отрицательно, но также и свободные электроны соединительных проводов. Скорость распространения поля около $300\,000\text{ км/сек}$. Такова же и скорость распространения тока. Скорость же поступательного движения свободных электронов очень невелика: доли сантиметра в секунду. Поэтому на обкладку конденсатора, заряженную положительно, попадают электроны с ближайшей части провода, а не с обкладки, заряженной отрицательно. С этой последней электроны, в свою очередь, переходят в часть провода, присоединенного к этой обкладке, а не на

обкладку, заряженную положительно. В итоге заряды обкладок конденсатора не колеблются от одной обкладки конденсатора до другой, а компенсируются током. Можно подсчитать, что в медных проводах сечением в 1 мм^2 , при силе тока в несколько ампер, при частоте переменного тока в 50 герц амплитуда колебаний свободных электронов порядка 1 микрона. Амплитуда колебаний свободных электронов в диполе с частотой в миллиарды герц оказывается уже порядка размера атома.

Не сразу дается учащимся и понятие об электрических колебаниях. Можно и нужно помочь им в этом отношении, указав на следующее соображение. В учении о механических колебаниях мы имели дело с колебаниями физических тел — шарика, подвешенного на нити („нитяной маятник“), груза, подвешенного на пружине и т. п. При этом, зависимость смещения от времени в этих движениях выражалась синусоидой. Здесь же мы сталкиваемся с колебаниями физических величин: силы тока и напряжения в контуре. Эти величины колеблются (периодически изменяются) около нулевого значения.

Употребляемое нами в этом случае слово „движение“ надо понимать не в смысле механического перемещения, а в смысле изменения. Периодические изменения силы тока и напряжения в колебательном контуре и есть электрические колебания. Не случайно, что зависимость силы тока и напряжения от времени тоже выражается синусоидой. Полезно указать учащимся, что с колебаниями величин они уже познакомились, когда имели дело с переменным током. Как известно, при равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле в ней возникает э. д. с. индукции и индукционный ток, если рамка замкнута, периодически изменяющиеся во времени по синусоидальному закону. Поэтому и в этом случае график э. д. с. индукции и силы индукционного тока представляют собою синусоиду.

Вместе с тем существенно учесть, что рассмотренные нами электрические колебания связаны с определенным физическим процессом — с высокочастотным переменным током, имеющим место в колебательном контуре.

§ 5. Уяснению сущности понятия об электрических колебаниях чрезвычайно помогает механическая аналогия электрических колебаний с пружинным маятником,

но на это урочного времени не хватает. Этот параграф может быть использован во внеклассных занятиях.

При рассмотрении указанной аналогии полезно продемонстрировать пружинный маятник. При этом следует учесть, что попытки изготовить маятник таким, как он упрощенно изображен на левой половине рис. 15, дают отрицательные результаты: пружины сильно провисают. Для того чтобы устранить влияние на пружины силы тяжести шарика, его следует просверлить по диаметру и надеть на хорошо полированный, смазанный, горизонтально расположенный стержень. На этот же стержень

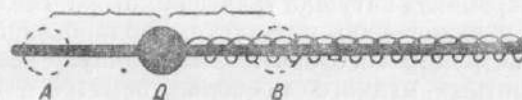


Рис. 32. Пружинный маятник на стержне.

надевается пружина, один конец которой прикрепляется к концу стержня, а другой — к шарiku (рис. 32). Шарик может быть помещен посередине стержня. В этом случае нужны две пружины, одни концы которых прикреплены к шарiku, а другие — к концам стержня.

§ 6. Представление о затухающих и незатухающих электрических колебаниях нужно дать учащимся, поэтому § 6 включен в учебный план темы. Сделать это не трудно, так как с затухающими и незатухающими механическими колебаниями учащиеся уже знакомы.

Применительно к материалу данного параграфа ограничимся только одним замечанием.

Строго говоря, затухающие колебания есть движение непериодическое, так как при затухании колебаний изменяется не только амплитуда, но и период колебаний. (Опять-таки, строго говоря, в этом случае время одного полного колебания „периодом“ можно назвать лишь условно, так как он не постоянен, а изменяется.) Но оказывается, что при небольших затуханиях период колебаний изменяется значительно меньше амплитуды. (Период колебаний несколько увеличивается.) Поэтому в таких случаях практически период можно считать неизменным. В соответствии с этим выполнен график

затухающих колебаний на рис. 16: период колебаний на нем показан неизменяющимся.

§ 7. Этот параграф включен в учебный план темы. Основная цель урока — продемонстрировать учащимся колебательный контур в действии. Возможны различные варианты подобной демонстрации: учащиеся могут быть показаны разнообразные контуры. Здесь (так же, как и в дальнейшем) нами выбран наиболее простой контур, наиболее близкий к тому, каким мы его себе представляли, разбирая процесс возбуждения колебаний, и потому наиболее доступный пониманию учащихся (см. рис. 18).

В качестве катушки самоиндукции может быть использована первичная катушка трансформатора Тесла, закрепленная в какой-либо подставке, изолированно от нее. Совсем нетрудно изготовить самодельную катушку из 5—10 витков медного провода диаметром 2—3 мм. Конденсаторы C_1 и C_2 — лейденские банки, поставленные на лист жести с клеммой или с припаянным к нему проводом для заземления; A — искровой разрядник тоже от трансформатора Тесла или любой другой, в частности, самодельный; B — катушка Румкорфа (возможно мощнее); D — лампа накаливания от 4 до 120 вольт. Лампа подбирается опытным путем в зависимости от мощности индукционной катушки. Вместо лампы можно включить через трансформатор тока тепловой амперметр (сила тока от 1 до 10 ампер). Соединения делаются медным проводом диаметром 3—4 мм.

Перед демонстрацией в классе прибор надо наладить так, чтобы лампа в контуре горела. Для этого подбираем опытным путем лампу, нить которой накаливалась бы током в собранном контуре. Как правило, удается очень быстро подобрать такую лампу (если есть набор ламп, рассчитанных на разное напряжение, а значит — и силу тока). Если нужной лампы подобрать не удастся, тогда нужно настраивать контур, меняя число включенных в цепь витков катушки самоиндукции, число лейденских банок и величину искрового промежутка.

Демонстрируя учащимся колебательный контур, необходимо выяснить роль индукционной катушки, питающей контур энергией, например так, как это сделано в § 7.

Очень часто учащиеся, рассматривая схему контура, данную на рис. 18, высказывают ошибочное предполо-

жение, что нить лампы накаливания в цепи контура накаливается переменным током от индукционной катушки, а не за счет тока, возникающего в контуре при электрических колебаниях.

Ток от индукционной катушки заряжает обкладки конденсаторов до тех пор, пока напряжение на шариках искрового разрядника A (рис. 18) не станет таким, при котором в искровом промежутке возникнет искра. Сопротивление сильно ионизированного воздуха в канале искры очень мало. В результате: 1) колебательный контур оказывается замкнутым искрой, и в нем возникают электрические колебания и 2) той же искрой индукционная катушка окажется замкнутой накоротко, так как сопротивление вторичной обмотки индукционной катушки очень велико, по сравнению с сопротивлением искрового промежутка. В связи с этим практически все напряжение, возникающее в катушке, падает на вторичную обмотку, а поэтому питание колебательного контура энергией от индукционной катушки прекращается. В связи с потерями энергии в контуре, колебания в нем затухают, искра в искровом промежутке гаснет. С этого момента времени индукционная катушка вновь начнет заряжать конденсаторы до тех пор, пока в искровом промежутке снова возникает искра и т. д.

Отсюда вытекает: 1) что указанное выше предположение ошибочно, 2) что колебания в контуре затухающие, так как убыль энергии в контуре восполняется не непрерывно, и 3) что искра выполняет роль автоматического прерывателя.

Индикатором колебаний в рассмотренном контуре служит лампа накаливания. Еще более нагляден контур с включенным в него гальванометром с поворачивающейся катушкой, стрелка которого поворачивается то в одну, то в другую сторону, что показало бы наличие колебаний в контуре. В этом случае в контуре надо получить колебания с небольшой частотой, или, что то же, с большим периодом. Считая, что подвижная система гальванометра типа д'Арсонваля в состоянии следовать за колебаниями с периодом в 2 сек., можно вычислить величину индуктивности и емкости, нужных для получения таких колебаний. Если взять индуктивность в 2000 генри, а емкость в 50 микрофард (или

индуктивность в 1000 генри, а емкость 100 микрофард), то тогда

$$T = 2\pi \sqrt{LC},$$

$$T = 2\pi \sqrt{2000 \cdot 0,00005} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{10}} \approx 2\pi \frac{1}{3} \approx 2 \text{ сек.}$$

Схема подобной установки показана на рис. 33.

Для заряда конденсаторов нужен источник постоянного тока на 220 вольт. Перекидывая переключатель

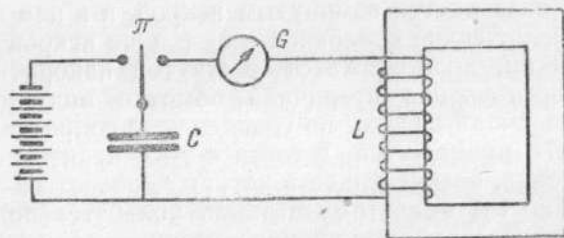


Рис. 33. Колебательный контур, электрические колебания в котором обнаруживаются гальванометром.

налево, заряжаем конденсатор, передвигая переключатель направо — разряжаем конденсатор на катушку самоиндукции. При каждом замыкании конденсатора на катушку самоиндукции стрелка гальванометра совершает несколько колебаний с периодом около 2 сек. и быстро убывающей амплитудой. Таким образом в этой установке мы наблюдаем переменный ток с периодом в 2 сек. или с частотой, равной 0,5 герц.

Если уменьшить емкость конденсатора раз в 10, период колебаний уменьшится примерно в 3 раза, что обнаруживается и на опыте. Если же затем уменьшить и индуктивность, взяв другую катушку самоиндукции, то гальванометр их уже не обнаружит вследствие инерции его подвижной системы.

Указанная демонстрация в силу своей наглядности и принципиальной простоты чрезвычайно ценна, поэтому каждая школа должна попытаться собрать такую установку, хотя это и сопряжено с некоторыми трудностями. Нужна большая батарея конденсаторов (50—100 μF), катушка самоиндукции с большой индуктивностью: 2000—

1000 Н. (В качестве последней может быть использована вторичная обмотка индукционной катушки Румкорфа и источник постоянного тока с э. д. с. около 200 вольт). (Может быть использован кенотронный выпрямитель.)

§ 8. Представляется существенным познакомить учащихся со свойствами высокочастотного переменного тока. Поэтому § 8 включен в учебный план темы.

Познакомиться со свойствами высокочастотного переменного тока можно, воспользовавшись трансформатором Тесла или ламповым генератором высокой частоты. Если остановить свой выбор на ламповом генераторе, то необходимо или сейчас же знакомить учащихся с устройством и действием такого генератора, что совсем не просто, или же пользоваться им, не разбирая вопроса о том, как в этом случае ток генерируется. И то и другое является методически необоснованным и потому неприемлемым. Устройство же и действие трансформатора Тесла могут быть восприняты очень легко. Этим будут закреплены только что данные учащимся представления о колебательном контуре и электрических колебаниях и продемонстрированы свойства переменного тока высокой частоты.

Показав учащимся прибор и рассказав об его устройстве, надо начертить схему трансформатора (см. рис. 19) на классной доске. Колебательный контур в трансформаторе знаком и хорошо понятен учащимся. Указания в тексте § 8 на настройку вторичной катушки трансформатора в резонанс по отношению к току в колебательном контуре учащимися могут не сообщаться.

Основная цель в демонстрации опытов с трансформатором Тесла — показать свойства высокочастотного переменного тока. В соответствии с этим из опытов, перечисленных в § 8, основными являются 8, 9, 10 и 11, которые поэтому описаны несколько подробнее. Наряду с этим целесообразно воспользоваться трансформатором для показа и некоторых других опытов и, в частности, тех, какие содержатся в данном параграфе.

В связи с опытом 2 (см. § 8) следует очень кратко рассказать учащимся об устройстве неоновой лампы. Производя этот опыт, можно держать лампу вертикально за поколь, а нижний контакт ее („пяточку“) при-

жать к верхнему концу вторичной катушки трансформатора. Роговидный разрядник для опыта 7 может быть сделан из медной проволоки диаметром около 2 мм. Кажущийся подъем искры вверх объясняется следующим образом.

При появлении первой искры образуется канал, заполненный горячими газами, поднимающимися вверх, вследствие чего каждый последующий разряд происходит выше предыдущего. Для глаза создается впечатление ползущей искры. На некоторой высоте расстояние между ветвями разрядника станет настолько большим, что имеющегося напряжения будет недостаточно для пробоя воздуха, тогда искровой разряд снова начнется в нижней части разрядника, и искра снова „ползет“ вверх и т. д.

Опыт 8, характеризуя свойства высокочастотного переменного тока, вместе с тем служит прекрасной иллюстрацией закона Фарадея для электромагнитной индукции. Полезно показать сначала аналогичный опыт с катушкой Томсона. Включив катушку Томсона в осветительную цепь переменного тока с частотой 50 герц и расположив виток проволоки с лампочкой очень близко к катушке (надев виток на конец сердечника, высовывающийся над катушкой), увидим, что лампочка не горит. Скорость изменения магнитного потока, охватываемого контуром витка, мала, так как невелика частота тока. В случае тока высокой частоты, при той же площади сечения магнитного потока, скорость изменения его значительно больше.

Имея в виду формирование мировоззрения учащихся, анализируя опыты 8, 9, 10 и 11, следует указать, что высокочастотный переменный ток, будучи такой же формы, как говорят электрики, как и ток с частотой в 50 герц, обладает такими свойствами, каких не имеет ток низкочастотный. Изменения количественные вызывают появление новых качеств. Эта мысль не должна быть новой для учащихся. Они сталкивались с ней и раньше, в частности, при изучении молекулярно-кинетической теории.

Полезно кратко рассказать учащимся о применении токов высокой частоты в технике.

1. Плавильные печи. (Одно из преимуществ — можно

получить расплавленный металл без всяких примесей.)

Емкость от нескольких граммов до 10 тонн.

Частоты — от 10^6 герц (для малых печей) до 50 герц (для больших).

2. Нагрев для поковки и штамповки. (Болванка помещается в соленоид и нагревается до нужной температуры.)

3. Поверхностный нагрев и закалка.

4. Сушка древесины. (Естественная сушка длится 1—2 года, паровая — 1 месяц, токами высокой частоты — от 1 до 4 дней в зависимости от породы древесины и ее влажности.)

Дерево помещается между металлическими пластинами, к которым подводится переменное напряжение 10 000—15 000 вольт (10^6 — 10^7 герц). Под действием электрического поля происходит нагревание во всем объеме дерева.

5. Нагрев порошков для изготовления пластмасс.

6. Сварка пластмассовых изделий. (Напряжение подводится к вращающимся роликам, между которыми прокладывается шов свариваемого изделия, например, плаща.)

Генераторы для перечисленных целей применяются машинные (для частоты до 10^4 герц) и ламповые (10^5 — 10^8 герц).

§ 9. Понятие о свободных и вынужденных колебаниях имеет большое значение для осознанного усвоения учащимися дальнейшего материала. Так, например, явление электрического резонанса можно понять, хорошо представляя себе, что каждый колебательный контур обладает присущей ему собственной частотой, что ее можно известными приемами изменять. Поэтому небольшому по объему материалу § 9 необходимо уделить должное внимание.

Формула Томсона дается учащимся без вывода; формула периода колебаний в реальном контуре, имеющем активное сопротивление, им не сообщается.

В связи с необходимостью настраивать контур на заданную частоту колебаний, мы встречаемся с применением конденсаторов переменной емкости и катушек самоиндукции с переменной индуктивностью. С первыми из них учащиеся уже должны быть знакомы, а ка-

тушку самоиндукции с переменной индуктивностью следует показать и рассказать об ее устройстве на данном уроке.

§ 10. В связи с тем широким распространением, какое получила электроннолучевая трубка (в радиотехнике — для характеристики ламп, контуров, усилителей, в телевидении, в радиолокации), необходимо познакомить учащихся в общих чертах с устройством этого прибора и принципом его действия.

Имея в виду цели, преследуемые общеобразовательной средней школой, нет необходимости рассказывать учащимся об устройстве электронного осциллографа подробно, со всеми деталями (помимо указанного соображения, на более подробное рассмотрение этого вопроса нехватит времени). Этими соображениями и определено содержание § 10. В основу положено описание упрощенной электроннолучевой трубки; опущено описание приспособлений, служащих для превращения потока электронов в электронный луч и для регулирования количества электронов, совокупность которых образует луч (управляющий электрод, второй, а возможно, и третий анод). Однако сказать учащимся о существовании таких приспособлений в трубке следует, так как они имеют значение в работе трубки. По тем же причинам не рассматривается устройство и действие генератора развертки, не дается схема всего электронного осциллографа. Все эти вопросы выходят за пределы основ физики, даваемых учащимся средней общеобразовательной школы, но могут служить интересными темами для внеклассных занятий, на которых может быть освещен и такой интересный и практически важный вопрос, как техническое применение токов высокой частоты (плавка металлов, нагрев для поковки и штамповки, поверхностный нагрев и закалка, сушка древесины, сварка деталей из пластмассы и др.).

Глава II.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

§ 11. Линейный вибратор.

Рассмотрим ряд колебательных контуров, изображенных на рис. 34.

Колебательный контур *I* уже достаточно хорошо знаком нам. Контур *II* имеет меньшую индуктивность и емкость; соответственно и период колебаний в нем

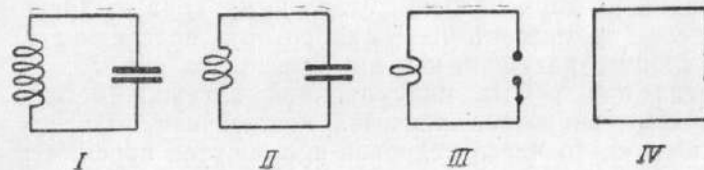


Рис. 34. Образование линейного (открытого) колебательного контура.

будет меньше. В контуре *III* катушка самоиндукции состоит из одного витка, а конденсатор заменен шариками. Если зарядить шарики, то в последнем контуре, так же как и в предыдущих, возникнут электрические колебания. При вычислении периода колебаний в *I* контуре можно считать активное сопротивление контура ничтожно малым, индуктивность контура равной индуктивности катушки (пренебрегая индуктивностью соединительных проводов), а емкость контура — равной емкости конденсатора (пренебрегая емкостью соединительных проводов). В *III* контуре индуктивностью и емкостью соединительных проводов пренебрегать уже нельзя. Контур *IV* не имеет катушки самоиндукции и конденсатора, но обладает индуктивностью и емкостью. И, наконец, выпрямив проводник контура *IV*, мы получим линейный колебательный контур. Если концам его сообщить разноименные заряды, то начнется разряд, потечет ток, электростатическая энергия перейдет в энергию магнитного поля тока; исчезающее магнитное поле вызовет ток прежнего направления, в результате

чего концы проводника перезарядятся, и т. д. Этот проводник окажется колебательным контуром. Такого вида контур называется *открытым колебательным контуром*. Контур, в котором возбуждаются колебания, обычно называют вибратором. Последний из рассмотренных контуров называют линейным вибратором или диполем. (Более подробно на типах колебательных контуров мы остановимся в § 24.)

§ 12. Электромагнитное поле.

Представим себе, что имеется линейный вибратор, состоящий из двух половин, отделенных друг от друга искровым промежутком. К вибратору присоединена индукционная катушка, как это указано на рис. 35.

Когда при работе индукционной катушки между половинами вибратора появится достаточная разность потенциалов, то через искровой промежуток проскочит искра и возникнут электрические колебания. Мы уже знаем (см. § 4), что при этом возникнут периодически меняющиеся электрическое и магнитное поля. Рассмотрим их применительно к линейному вибратору. Допустим, что в начальный момент возникновения колебаний верхняя половина вибратора заряжена положительно, а нижняя — отрицательно. Силовые линии появившегося электрического поля лежат в плоскостях, проходящих вдоль вибратора, и направлены сверху вниз. Напряженность во всех точках электрического поля в этот момент максимальна, а напряженность магнитного поля равна нулю. Затем начнется разряд вибратора, в нем возникнет ток и появится магнитное поле. Замкнутые магнитные линии этого поля лежат в плоскостях, перпендикулярных к оси вибратора, а направление их может быть определено с помощью известного правила винта (на рис. 35 указаны магнитные силовые линии только вокруг двух точек вибратора). Таким образом, векторы напряженностей электрического и магнитного полей лежат в перпендикулярных плоскостях. В первую четверть периода напряженность электрического поля падает до нуля, а напряженность магнитного поля возрастает до некоторого максимума. Во вторую четверть периода происходит перезарядка

половин вибратора: нижняя заряжается положительно, верхняя — отрицательно. Силовые линии электрического поля теперь направлены снизу вверх, вектор напряженности электрического поля изменил свое направление на противоположное. Численное значение его возрастает до максимума, а напряженность магнитного поля падает до нуля. Дальше начинается разряд перезаряженных половин вибратора. В течение третьей четверти периода напряженность электрического поля падает до нуля, а напряженность магнитного поля меняет направление на противоположное и возрастает до максимума. В четвертую четверть периода верхняя половина вибратора заряжается положительно, нижняя отрицательно. Напряженность электрического поля, изменив направление на противоположное, возрастает до максимума, напряженность магнитного поля падает до нуля. Дальше описанный процесс периодически повторяется. Появляющиеся вокруг вибратора электрическое и магнитное поля органически связаны друг с другом и являются проявлениями одного и того же процесса — электрических колебаний.

Эта совокупность связанных друг с другом периодически изменяющихся электрического и магнитного полей называется *электромагнитным полем*.

Как уже было указано, периодически изменяющиеся векторы напряженностей электрического и магнитного полей перпендикулярны друг другу, причем максимуму напряженности электрического поля соответствует нулевая напряженность магнитного поля и наоборот. Следует сказать, что такое соотношение векторов напря-

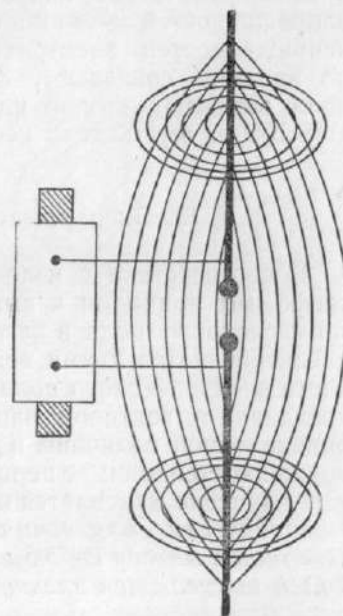


Рис. 35. Электрическое и магнитное поля линейного вибратора.

женностей имеет место в непосредственной близости к вибратору. Эту часть электромагнитного поля называют первой или индуктивной зоной.

Структура этой части поля довольно сложная. Исследования показывают, что на расстоянии, превышающем в 5—6 раз длину вибратора, соотношение векторов напряженностей иное: максимумы (и нулевые значения) напряженностей электрического и магнитного полей по времени совпадают. Эту часть электромагнитного поля называют второй или волновой зоной (с ней мы еще будем иметь дело несколько позже).

§ 13. Электромагнитные колебания.

В соответствии с изложенным в предыдущем параграфе, мы приходим к выводу, что каждая точка электромагнитного поля в каждый данный момент времени характеризуется двумя векторами: вектором напряженности электрического поля определенной величины и направления и вектором напряженности магнитного поля определенной величины и направления. Эти векторы напряженностей взаимно перпендикулярны, и каждый из них периодически изменяется по величине и по направлению. *Периодические изменения векторов напряженностей связанных между собою электрического и магнитного полей называются электромагнитными колебаниями.*

§ 14. Связь между электрическим и магнитным полями.

В учении об электростатике мы познакомились со статическими электрическими полями, т. е. полями, создаваемыми покоящимися зарядами, и со способом изображать их с помощью электрических силовых линий. Сейчас существенно вспомнить, что электрические линии статического поля начинаются на положительном заряде и оканчиваются на отрицательном, т. е. представляют собою обрывающиеся линии с зарядами на концах. С другой стороны, нам известно, что если электрический заряд движется, то вокруг линии движения заряда возникает магнитное поле, изображаемое нами силовыми линиями в виде концентрических замкнутых окружно-

стей в плоскостях, перпендикулярных к линии движения заряда. Вопрос о том, существует ли какая-либо связь между электрическим и магнитным полями, до сих пор оставался открытым. Но без рассмотрения его нельзя обойтись, если мы хотим получить хотя бы самые общие представления об электромагнитных волнах. В соответствии с этим остановимся на следующих рассуждениях.

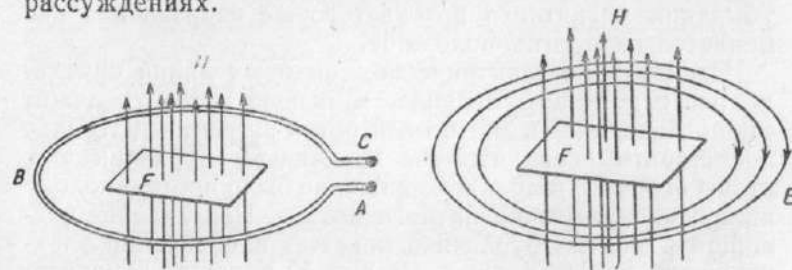


Рис. 36.

Рис. 37. Явление электромагнитной индукции.

Нам известно, что при изменении магнитного потока, охватываемого контуром какого-либо проводника, в нем возникает э. д. с. индукции. На рис. 36 показан виток проволоки ABC , контур которой пронизывается изменяющимся магнитным потоком H . В этом витке возникает э. д. с. индукции потому, что свободные электроны в проводнике ABC перемещаются по направлению к одному концу проводника, вследствие чего на этом конце проводника появляется отрицательный заряд, а на другом — положительный. До сих пор оставался не затронутым вопрос о том, почему свободные электроны в проводнике пришли в движение. Происходит это потому, что вокруг изменяющегося магнитного поля возникает изменяющееся электрическое поле, силовые линии которого представляют собою замкнутые кривые, как это показано на рис. 37. Электрическое поле существует в течение того промежутка времени, пока изменяется магнитное поле. Это электрическое поле и заставляет перемещаться свободные электроны в проводнике до тех пор, пока силы этого поля не будут уравновешены силами поля, созданного скопившимися на концах проводника ABC зарядами противоположного знака.

В соответствии со сказанным, если проводник замкнут, то в нем возникает индукционный ток.

Направление силовых линий появляющегося электрического поля зависит не только от направления изменяющегося магнитного потока, но и от того, возрастает он или убывает. При возрастании магнитного потока направление электрических силовых линий одно, при убывании магнитного потока того же направления оно меняется на противоположное.

Направление электрических силовых линий определяется с помощью правила, в основе которого лежит закон Ленца. Если магнитный поток возрастает, то надо представить себе, что мы ввинчиваем буравчик так, чтобы его поступательное движение было противоположным направлению магнитного потока. Направление вращения рукоятки буравчика покажет направление электрических силовых линий. На рис. 37 показано направление электрических силовых линий, соответствующее увеличению магнитного потока. Если магнитный поток уменьшается, то буравчик надо ввинчивать так, чтобы его поступательное движение совпало с направлением магнитного потока. Направление электрических силовых линий будет, очевидно, противоположным по сравнению с предыдущим случаем. Абсолютное значение напряженности появляющегося электромагнитного поля зависит только от скорости изменения магнитного силового потока.

Таким образом, основным фактором в известном нам явлении электромагнитной индукции является возникновение электрического поля. С помощью проводника, в котором возникает э. д. с. индукции (или индукционный ток, если проводник замкнут), мы только обнаруживаем факт существования электрического поля. Если проводника и не будет, электрическое поле все равно появится. Мы приходим к выводу, что изменяющееся магнитное поле охватывается кольцеобразно замкнутыми линиями изменяющегося электрического поля.

Как мы видим, данное электрическое поле существует вне зависимости от электрических зарядов, причем силовые линии этого поля не обрываются, а замкнуты. Такое поле называют электродинамическим.

Напряженность этого поля не зависит от того, в какой среде оно существует. Поэтому не зависит от среды и величина э. д. с. индукции, возникающая в том или

ином проводнике. Величина э. д. с. индукции, как это известно из закона Фарадея, зависит только от скорости изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника. Разумеется, что сила индукционного тока при одной и той же э. д. с. будет различной в проводниках с различным сопротивлением.

Естественно поставить вопрос: а что же можно сказать о таком случае, когда мы будем иметь изменяющийся электрический поток, а не магнитный? Исследования показывают, что изменяющееся электрическое поле окружено кольцеобразно замкнутыми линиями изменяющегося магнитного поля, как это показано на схеме рис. 38. Магнитное поле существует только во время изменения электрического поля. Это явление называют электрической индукцией.

Это магнитное поле существует вне зависимости от магнитных полюсов, причем силовые линии поля замкнуты, так же как и в случае магнитного поля постоянного тока.

Направление магнитных силовых линий также зависит не только от направления электрического силового потока, но и от того, возрастает он или убывает. Если электрический поток возрастает, то надо представить себе, что мы ввинчиваем буравчик так, что направление его поступательного движения совпадает с направлением электрического потока. Направление вращения рукоятки буравчика покажет направление магнитных силовых линий. Если электрический поток уменьшается, то буравчик надо ввинчивать так, чтобы направление его поступательного движения было противоположным направлению электрического потока. Направление магнитных силовых линий в этом случае будет противоположным по сравнению с предыдущим. На рис. 38 показано направление магнитных силовых линий, соответствующее уменьшению электрического силового потока.

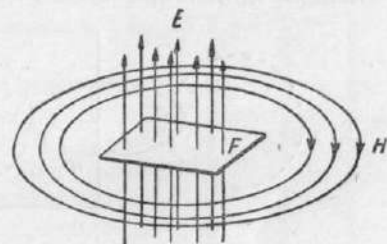


Рис. 38. Явление электрической индукции.

Абсолютное значение напряженности магнитного поля зависит только от скорости изменения электрического силового потока.

Итак, всякое изменение магнитного поля вызывает появление изменяющегося электрического поля, силовые линии которого замкнуты и охватывают линии магнитного поля (электромагнитная индукция). И, наоборот, всякое изменение электрического поля вызывает появление изменяющегося магнитного поля,

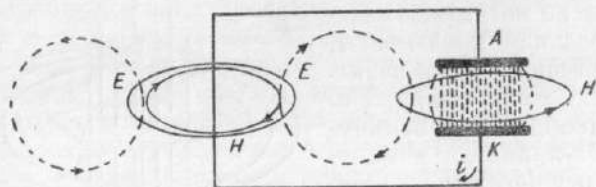


Рис. 39.

силовые линии которого замкнуты и охватывают линии электрического поля (электрическая индукция). Напряженность появляющегося поля зависит только от скорости изменения первичного поля.

В соответствии со всем изложенным выше мы должны представлять себе, что и в электрическом колебательном контуре магнитное поле возникает не только вокруг проводов, соединяющих обкладки конденсатора, но и вокруг изменяющегося электрического поля самого конденсатора. Возникающие около колебательного контура поля схематично могут быть показаны так, как это условно изображено на рис. 39.

На этом рисунке линии магнитного поля показаны сплошными, а линии электрического поля пунктирными.

Рассмотренная нами связь между электрическим и магнитным полями убеждает нас в том, что эти поля связаны друг с другом и являются родственными друг другу. Надо сказать, что результаты глубокого изучения электромагнитных явлений, произведенного учеными, свидетельствуют о том, что магнитное и электрическое поля действительно являются двумя сторонами единого материального объекта — электромагнитного поля. (На вопросе о материальности электромагнитного поля мы в дальнейшем остановимся подробнее.)

§ 15. Электромагнитные волны.

Теория и экспериментальные данные показывают, что возникающее около вибратора электромагнитное поле распространяется от вибратора в окружающем пространстве. Как же происходит процесс распространения электромагнитного поля? Допустим, что проводник *A* (рис. 40) представляет собою часть линейного вибратора. Параллельно этому вибратору поместим другой проводник *B*.

В вибраторе *A* имеют место электрические колебания. В связи с этим появляется переменное магнитное поле, которое вызовет в проводнике *B* переменное электрическое поле, благодаря чему в этом проводнике в соответствии с законами индукции возникает переменный ток. В § 14 мы установили связь между магнитным и электрическим полями. С точки зрения связи между полями мы должны сказать, что независимо от того, будет ли *B* проводник или стержень из изолятора, в нем все равно возникнет переменное электрическое поле. Только в случае, если *B* будет проводник, то в нем возникнет не только переменное электрическое поле, но и переменный ток, а если *B* будет изолятор, то в нем возникнет только переменное электрическое поле. Это переменное электрическое поле, в свою очередь, вызовет появление переменного магнитного поля H_2 . Это магнитное поле H_2 вызовет в соседнем изоляторе *C* новое переменное электрическое поле и т. д. Для простоты рассуждений мы представили себе процесс распространения электромагнитных колебаний в серии стержней из изоляторов и только в одну сторону от вибратора. Но то же самое произойдет и в сплошном изоляторе, который всегда можно себе представить состоящим из отдельных слоев, расположенных радиально по всем направлениям от вибратора.

Чем дальше от вибратора *A* возьмем мы тот или иной слой изолятора, тем больше будут отставать в нем колебания электрического и магнитного полей от таких

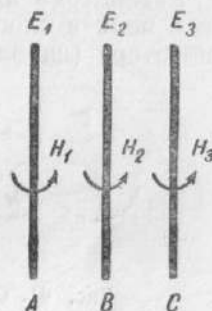


Рис. 40.

же колебаний около вибратора. Иными словами говоря, распространение электромагнитного поля в пространстве происходит хотя и с очень большой, но все же с конечной скоростью (в вакууме — со скоростью $3 \cdot 10^{10}$ см/сек = 300 000 км/сек).

Применим приведенные нами рассуждения к случаю небольшого линейного вибратора А (рис. 41).

Рассмотрим процесс распространения электромагнитного поля в плоскости, перпендикулярной к линейному вибратору (диполь) и проходящей через его середину.

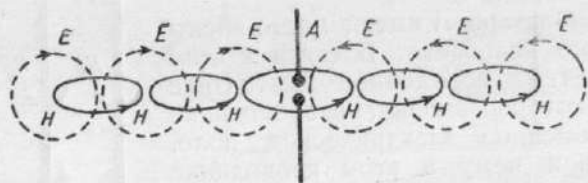


Рис. 41. Схематическое изображение процесса распространения электромагнитного поля.

Будем иметь в виду электромагнитное поле не в непосредственной близости к вибратору, а начиная с расстояния от вибратора, превышающего в несколько раз длину самого вибратора. Условимся обозначать на чертеже электрическое или магнитное поле одной силовой линией.

Электрические колебания в вибраторе создадут переменное магнитное поле, которое на рисунке условно обозначено одной замкнутой сплошной линией, охватывающей диполь. Изменяющееся магнитное поле вызовет появление изменяющегося электрического поля, силовые линии которого охватывают линии магнитного поля. Это электрическое поле на рисунке обозначено двумя пунктирными замкнутыми линиями. Появившееся переменное электрическое поле вызовет, в свою очередь, появление нового изменяющегося магнитного поля и т. д.

В итоге, электромагнитное поле распространяется в окружающем вибратор пространстве все дальше и дальше от вибратора. На рис. 41 показано распространение электромагнитного поля в прямо противоположных направлениях, лежащих в одной плоскости. Тот же процесс происходит по всем направлениям как в этой

плоскости, так и во всех других, перпендикулярных к диполью.

Электрические силовые линии электромагнитного поля лежат в плоскостях, проходящих вдоль оси вибратора, а силовые линии магнитного поля лежат в плоскостях, перпендикулярных оси вибратора.

Рассматривая процесс распространения электромагнитного поля, мы мысленно разложили электрическое и магнитное поля на „элементарные поля“. Такие „элементарные электрические поля“, накладываясь друг на друга, создадут „результатирующее“ электрическое поле.

Установлено, что силовые линии электрического поля диполя в одной плоскости, проходящей вдоль диполя, могут быть изображены так, как это показано на рис. 42 (на нем не показана часть поля, ближайшая к вибратору). Эта картина поля верна для какого-то одного момента времени. (Это есть „мгновенная фотография поля“.)

Взглянув на рис. 41 и представив себе, что первая сплошная линия, охватывающая диполь и символизирующая магнитное поле, в свою очередь, охватывается электрическими силовыми линиями, как охватывают друг друга звенья цепи, мы получим картину, подобную той, какая изображена на рис. 42. (Отступления в форме силовых линий от кольцевой обусловлены уменьшением амплитуды колебаний вектора напряженности электрического поля в плоскости, проходящей вдоль оси диполя — по мере удаления от середины диполя к его концам.)

Можно попытаться образно представить себе и результат наложения „элементарных“ магнитных полей. На рис. 43 черным кружком изображено сечение диполя плоскостью, перпендикулярной диполью, сплошной

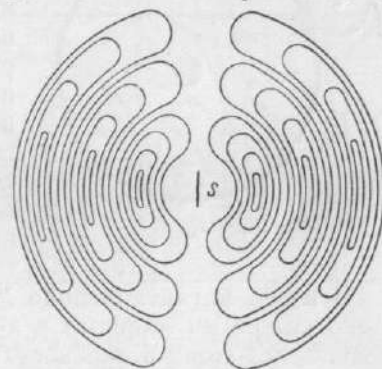


Рис. 42. Электрическое поле диполя в плоскости, проходящей через ось диполя, для одного момента времени.

линией вокруг него — переменное магнитное поле, обусловленное током в диполе. Точки (за этой линией условно обозначают «сечение электрических силовых

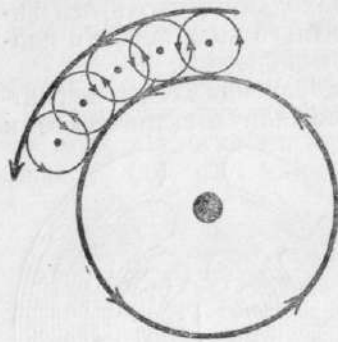


Рис. 43.

линий» (они перпендикулярны к рассматриваемой плоскости) электрического поля, распространяющегося в этой плоскости по всем направлениям. Окружности вокруг точек символизируют «элементарные магнитные поля». Эти поля в одних местах гасят, в других — усиливают друг друга, создавая «результатирующее» поле, условно обозначенное второй окружностью, охватывающей диполь.

В итоге магнитное поле диполя может быть изображено силовыми линиями в виде concentрических окружностей, лежащих в плоскостях, перпендикулярных к оси диполя, как это показано на рис. 44.

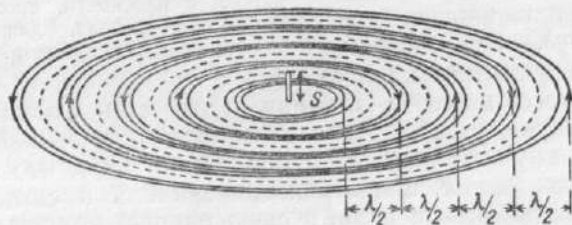


Рис. 44. Магнитное поле диполя в плоскости, перпендикулярной диполю, для одного момента времени.

На рис. 42 и 44 электрическое поле показано отдельно от магнитного. Следует иметь в виду, что они связаны друг с другом и представляют собою единство — электромагнитное поле. На рис. 45 осуществлена попытка схематично изобразить электромагнитное поле, распространяющееся вдоль земной поверхности. И эта картина условно изображает электромагнитное поле в какой-то один момент времени.

При желании дать динамику этого процесса, надо чертить все новые и новые линии поля, создавая картину распространения поля и, следовательно, появления новых линий.

Итак, электромагнитное поле, появившееся вокруг диполя А (рис. 41) в результате явления электромагнитной и электрической индукции, распространяется по всем направлениям.

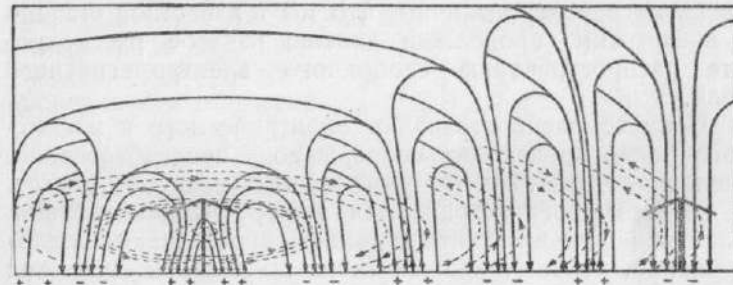


Рис. 45. Схематическое изображение распространяющегося электромагнитного поля для одного момента времени.

Выше, приступая к рассмотрению процесса распространения электромагнитного поля вокруг диполя, мы сказали, что будем иметь в виду электромагнитное поле не в непосредственной близости к вибратору, а начиная с расстояния от вибратора, превышающего в несколько раз длину самого вибратора. Дело в том, что, как показали исследования, области поля, ближайшая к вибратору и удаленная, отличны друг от друга. Вблизи вибратора (в I зоне) картина поля меняется в соответствии со стадиями электрических колебаний в вибраторе. Электрическое и магнитное поля здесь обусловлены зарядами в вибраторе и током в нем. Явления электромагнитной и электрической индукции в этой зоне не имеют решающего значения. По мере удаления от вибратора влияние первого из указанных факторов уменьшается, а второго увеличивается. И, наконец, на некотором расстоянии от вибратора (II зона) существуют только электрическое и магнитное поля, появившиеся в результате явлений электромагнитной и электрической

индукции, которые и обуславливают распространение электромагнитного поля.

Это электромагнитное поле оказывается уже не связанным с зарядами и токами в диполе и продолжает самостоятельное и независимое от диполя существование как самостоятельный физический объект, распространяясь в пространстве со скоростью света. Такое электромагнитное поле называют свободным.

В связи с этим закономерности в I и II зонах электромагнитного поля различны, что мы в известной степени и обнаружим, продолжив дальше начатое рассмотрение распространения свободного электромагнитного поля.

Процесс распространения электрического и магнитного полей происходит непрерывно и последовательно, аналогично тому, как это происходит в резиновом шнуре, в котором распространяются поперечные колебания. Электрическое и магнитное поля распространяются одновременно, поэтому каждая точка поля характеризуется вектором напряженности электрического поля и вектором напряженности магнитного поля. Векторы эти взаимно перпендикулярны. Изменения их во времени по величине и по направлению происходят по синусоидальному закону. Поэтому графически зависимость напряженности магнитного и электрического полей от времени выражается синусоидой. В связи с тем, что электрическое и магнитное поля распространяются одновременно, максимумы и нулевые значения напряженностей электрического и магнитного полей (в отличие от того, что имеет место в I зоне) во времени совпадают.

Период колебаний напряженности магнитного поля и напряженности электрического поля, а также частота этих колебаний такие же, как частота электрических колебаний в вибраторе. В каждой данной точке электромагнитного поля колебания векторов напряженности электрического и магнитного полей запаздывают по фазе, по сравнению с фазой колебания этих векторов в точках, ближе расположенных к вибратору.

Величина запаздывания находится в зависимости от расстояния между этими точками. Это происходит вследствие того, что электромагнитное поле распространяется не мгновенно, а с конечной скоростью, хотя и очень большой.

Наибольшие значения векторов напряженности электрического и магнитного полей (амплитуда колебаний их) изменяются обратно пропорционально расстоянию от диполя.

Если провести сферическую поверхность вокруг точки посредине вибратора, как около центра, то амплитуда колебаний вектора напряженности в точках пересечения этой сферической поверхности с плоскостью, перпендикулярной к вибратору в его середине, будет максимальной. Амплитуда колебаний вектора напряженности в точках пересечения сферической поверхности с плоскостями, проводимыми перпендикулярно к вибратору все выше и выше или ниже плоскости, проходящей через середину вибратора, постепенно уменьшается.

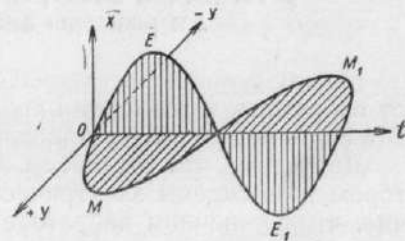


Рис. 46. Электромагнитная волна, движущаяся вправо.

Распространяющееся в пространстве электромагнитное поле называется электромагнитной волной. График электромагнитной волны дан на рис. 46. Прямая Ot — направление распространения волны. Перпендикулярные к ней отрезки дают в некотором масштабе величину и направление векторов напряженности электрического и магнитного полей для точек поля, лежащих на этой прямой. Значения векторов взяты для одного и того же момента времени. Соединив концы этих отрезков плавной кривой, получим две синусоиды, дающие представление о распространении электромагнитной волны вправо от точки O .

Прямая, перпендикулярная к векторам напряженностей электрического и магнитного полей, дающая направление, по которому происходит распространение электромагнитной волны, называется лучом.

В связи с тем, что векторы напряженностей электрического и магнитного поля перпендикулярны лучу, приходим к выводу, что *электромагнитные волны есть волны поперечные.*

Расстояние между двумя ближайшими точками поля, в которых векторы напряженностей электрического поля и векторы напряженностей магнитного поля равны по величине и по направлению (находятся в одной фазе, $E = E_1$ и $H = H_1$), называется длиной волны. Длина волны, очевидно, равна тому расстоянию, на которое распространяются электромагнитные колебания за время одного периода.

§ 16. Длина электромагнитной волны и размеры вибратора.

Между длиной электромагнитной волны, уходящей от вибратора, и размерами вибратора существует связь. Эта связь может быть установлена следующим путем.

Допустим, что мы имеем линейный вибратор, в котором возбуждены электрические колебания. Это значит, что в линейном вибраторе имеет место переменный ток. Изучая постоянный ток, мы привыкли к мысли о том, что во всех частях неразветвленной цепи постоянного тока сила тока одинакова. Оказывается, что в случае переменного тока в вибраторе картина совсем иная. Прежде всего, так как вибратор периодически заряжается и разряжается, сила тока и направление его в каждом данном участке вибратора периодически меняется: она возрастает до некоторого максимума, затем падает до нуля, дальше, изменив свое направление на противоположное, снова возрастает до того же максимума, а затем падает до нуля и т. д. Кроме того, сила тока в различных частях вибратора в один и тот же момент времени различна: она максимальна в середине вибратора и уменьшается до нуля на концах его. Это значит, что амплитуда колебаний силы тока в разных участках вибратора различна: максимальная в середине и равна нулю по концам. Изменения силы тока в вибраторе аналогичны известным нам колебаниям струны, издающей основной тон. Известно, что в колеблющейся струне, в результате сложения поступательной волны с отраженной, возникают стоячие волны. Колеблющаяся струна кажется нам такой, как это показано на рис. 47, на котором изображены оба крайние положения струны.

Ординаты на этом графике дают амплитуду колебаний каждой точки струны. В середине струны образуется пучность, по концам — узлы. Смещения части струны кверху от среднего положения считаются положительными, книзу — отрицательными. Все точки струны в каждый данный момент имеют одинаковые по направлению, но разные по величине смещения. Нечто подобное происходит с силой тока в вибраторе.



Рис. 47. Стоячая волна в струне.

Направление тока во всех частях вибратора в каждый данный момент времени одинаково, сила же тока наибольшая в середине, а по направлению к концам его падает до нуля. Эти колебания силы тока можно также изобразить графически (рис. 48).

Здесь ординаты дают амплитуду колебаний силы тока каждой части вибратора. Таким образом, движение электрических зарядов в вибраторе можно рассматривать как стоячую волну тока с пучностью посредине и с узлами на концах. Но стоячая волна связана с размерами тела. Известно, что в случае механических колебаний длина стоячей полуволны (расстояние между



Рис. 48. Стоячая волна тока в линейном вибраторе.

двумя ближайшими узлами) равна половине длины поступательной волны в струне, а значит и половине длины звуковой волны в воздухе. Так, например, длина струны на рис. 47 равна половине длины волны, вызываемой этой струной в воздухе. Длина вибратора также равна половине длины электромагнитной волны, уходящей от вибратора. (Естественно, что может возникнуть вопрос о том, почему длина волны линейного вибратора не может быть вычислена по формуле Томсона. Об этом будет сказано в § 25.)

§ 17. Материальность электромагнитного поля. Энергия поля.

В § 15 было отмечено, что на некотором удалении от вибратора электромагнитное поле существует самостоятельно, независимо от вибратора. Оно распространяется в окружающем пространстве в виде электромагнитных волн. Познакомимся еще с одним существенным свойством электромагнитных волн. Допустим, что на пути этих волн мы поставим приемный контур, подобный вибратору, о котором шла речь в начале § 11. Пусть это будут металлические трубочки со вдвинутыми в них с небольшим трением металлическими стерженьками (так, чтобы можно было, меняя длину их, изменять емкость, а значит, и частоту собственных колебаний). Эти проводники соединены с чувствительным гальванометром, который может реагировать на переменный ток (например, тепловой). Получим контур, показанный на рис. 49.

Когда до него дойдет периодически меняющееся электромагнитное поле, то оно вызовет в контуре периодически изменяющееся смещение электронов, т. е. высокочастотный переменный ток, который и будет обнаружен гальванометром. Вдвиганием и выдвиганием металлических стерженьков, т. е. изменением длины приемного линейного контура, можно добиться некоторого наибольшего отклонения стрелки гальванометра. В приемном контуре возникнут электрические колебания. Такой контур называют резонатором. Таким образом, в резонаторе появился ток, а за счет энергии этого тока появилась теплота. Откуда взялась эта энергия? Чтобы ответить на этот вопрос, остановимся на следующих рассуждениях.

В вибраторе, получающем энергию от того или иного источника тока (в рассмотренных нами до сих пор примерах от индукционной катушки), возникают электри-



Рис. 49.
Линейный вибратор переменной длины.

ческие колебания. В результате, как это мы уже выяснили, появляется электромагнитное поле, характеризующееся колебательным процессом, в нем протекающим. По современным воззрениям *электрическое поле есть материальное образование*, ибо не может протекать какой бы то ни было физический процесс там, где нет материи в той или иной ее форме. Электромагнитные волны, очевидно, также материальны.

Приведенный выше опыт с резонатором убеждает нас в том, что электромагнитное поле и электромагнитные волны являются носителями энергии. Это обстоятельство также служит подтверждением материальности поля, так как нельзя представить себе энергию, не связанную с материей. Эта энергия и воспринимается резонатором. Источником ее является энергия, подводимая к вибратору. Таким образом от вибратора распространяются материальные электромагнитные волны, обладающие энергией.

Можно упрощенным путем придти к существенному для нас выводу о том, что величина энергии электромагнитных волн зависит от частоты колебаний. Мы установили, что в резонаторе, о котором шла речь в этом параграфе, когда до него доходит периодически меняющееся электромагнитное поле, возникает ток. По закону Ома сила тока в контуре

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

С другой стороны, электродвижущая сила прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника.

$$E = -k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Очевидно, что при одном и том же изменении магнитного потока, чем меньше будет время, в течение которого это изменение произойдет, тем больше будет электродвижущая сила, а значит и сила тока в контуре. Но время изменения магнитного потока будет тем меньше, чем меньше период пришедших к контуру колебаний. И, наконец, период колебаний будет тем меньше, чем больше будет частота колебаний. Таким образом, есть основания считать, что принесенная электромаг-

нитными волнами энергия зависит от частоты колебаний. Исследование этого вопроса приводит к выводу, что энергия электромагнитных волн при прочих равных условиях прямо пропорциональна частоте колебаний. Оказывается, что при частоте колебаний в 50 герц (частота переменного тока в городской осветительной сети) энергия, уносимая электромагнитными волнами, составляет ничтожную долю энергии в колебательном контуре. При высоких же частотах она может достигать до 80%. (Кроме частоты, имеют еще значение и свойства самого контура.)

С фактом излучения электромагнитных волн электрической цепью мы уже сталкивались и раньше, при изучении магнитного поля тока. Магнитная стрелка, установившаяся в плоскости магнитного меридиана и расположенная вблизи кольцевого проводника, каждый раз при включении тока в кольцо поворачивается на некоторый угол и занимает новое положение. Но для такого поворота стрелки надо совершить работу, хотя бы и очень небольшую. Откуда берется нужная для этого энергия? Ответ может быть только один: в момент установления тока в кольце от него исходят электромагнитные волны, уносящие с собою энергию, за счет которой и совершается работа по перемещению стрелки.

Излучение электромагнитных волн происходит только в момент появления тока в цепи или, что то же, — только в момент ускоренного движения электрических зарядов в цепи, что и имеет место при замыкании цепи. Когда ток в цепи установится постоянный, излучения электромагнитных волн не происходит.

§ 18. Причины затухания колебаний в вибраторе.

В главе об электрических колебаниях мы указали только на одну причину затухания колебаний в вибраторе: потери энергии тока, связанные с переходом ее в теплоту. Перечислим наиболее существенные причины, вызывающие убыль энергии в вибраторе и связанное с нею затухание колебаний.

1. Превращение энергии тока в тепло во всех проводниках с активным сопротивлением.

2. Затухание в искре вследствие нагревания электродов и воздуха в искровом промежутке. Этот источник затуханий очень значителен.

3. Утечки в изоляторе конденсатора.

4. Искрение и стекание зарядов с острых краев деталей контура.

5. Утечки вследствие вихревых токов в металлических телах, находящихся поблизости от контура.

6. Затухание вследствие излучения электромагнитных волн, уносящих с собою энергию. Контур, рассмотренный нами в § 4, излучает мало, линейный вибратор, рассмотренный в § 11, — очень значительно. В подобного рода контурах эта причина затухания колебаний — одна из основных.

Для того чтобы колебания в вибраторе были незатухающими, убыль энергии в нем, вызываемую указанными причинами, в частности излучением, надо непрерывно восполнять. В упоминавшихся нами до сих пор искровых вибраторах источником пополнения убыли энергии в контуре служила индукционная катушка. В § 7 мы уже установили ее роль в возбуждении колебаний. Убыль энергии восполняется ею непрерывно, а порциями, почему искровой колебательный контур и является генератором затухающих колебаний.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.

§ 11, 12, 13. Небольшой по объему материал этих параграфов входит в учебный план темы. Основное в нем — понятие об электромагнитном поле. Изложение этого вопроса должно быть подчинено следующей цели: показать, что непрерывно и периодически изменяющиеся, связанные друг с другом электрическое и магнитное поля являются двумя сторонами одного физического объекта, называемого нами электромагнитным полем. Важно, чтобы учащиеся поняли, что простое наложение электрического поля на магнитное не создает того, что мы понимаем под электромагнитным полем. Так, если мы к заряженному проводнику поднесем магнит, то это сочетание электрического и магнитного полей не создаст электромагнитного поля как потому, что в данном

случае поля стационарны, так и потому, что они не связаны друг с другом.

Об областях поля, называемых I и II зоной, надо сказать учащимся пока очень кратко, так как обоснование делению электромагнитного поля на I и II зону может быть дано позже, после изучения учащимися вопросов о связи между электрическим и магнитным полями и о распространении электромагнитного поля.

Общие представления о линейном вибраторе, о котором идет речь в § 11, необходимы потому, что в следующем § 12 рассматривается электромагнитное поле открытого контура.

§ 14. В методических указаниях к § 15 дано обоснование положению, в соответствии с которым нельзя рассматривать процесс распространения электромагнитного поля с точки зрения „отшнуровывания“ электрических силовых линий. Этот процесс может быть правильно в научном отношении объяснен с точки зрения основных идей теории Максвелла: взаимосвязи электрического и магнитного полей. Таким образом, вопрос о связи между электрическим и магнитным полями является фундаментальным и отправным в создании представления о сложном процессе распространения электромагнитного поля. Поэтому на изложение учащимся материала § 14 учителем физики должно быть обращено особое внимание.

Естественное место вопроса о взаимосвязи электрического и магнитного полей в теме „Электромагнитная индукция“. При изучении этой темы, в связи с рассмотрением закона Фарадея для электромагнитной индукции, естественно должен возникнуть вопрос о том, почему при изменении магнитного потока, охватываемого контуром проводника, в нем возникает э. д. с. индукции, а значит, и индукционный ток, если проводник замкнут. В итоге приходим к заключению, что изменяющееся магнитное поле вызывает появление изменяющегося электрического поля. Постановка этого вопроса и решение его логично и необходимо вытекает из закона Фарадея. С другой стороны, после рассмотрения явления электромагнитной индукции также неизбежно должен возникнуть вопрос о том, не вызывает ли изменяющееся электрическое поле появления маг-

нитного поля. Отсюда — изучение явления электрической индукции.

Так как обычно связь между электрическим и магнитным полями в школе вовсе не рассматривается, то поэтому пришлось включить этот вопрос в тему, поставив его перед рассмотрением электромагнитного поля.

Взаимосвязь электрического и магнитного полей появилась в теме в связи с необходимостью объяснить процесс распространения электромагнитного поля. Поэтому имеющиеся в параграфе правила для определения направления индуктированного электрического и магнитного полей могут быть опущены.

В процессе изучения явления электромагнитной и электрической индукции чрезвычайно важно учесть, что с динамическими полями учащиеся встречаются впервые. В соответствии с этим необходимо особое внимание обратить на особенность этих полей: 1) электрическое поле существует независимо от электрических зарядов, а магнитное — независимо от магнитных полюсов, 2) электрические силовые линии электрического поля, в отличие от поля статического, замкнуты и 3) по своей природе эти поля таковы, что они существуют непрерывно изменяясь.

Примерным учебным планом на изучение материала § 11—15 отводится учебного времени 2 часа. Целесообразно на материал § 11—13 отвести один час, а другой час на § 15.

§ 15. По издавна установившейся традиции процесс распространения электромагнитного поля часто рассматривается с точки зрения так называемого отшнуровывания электрических силовых линий. Такое описание явления ошибочно и не соответствует истинной природе явления. Излучение электромагнитных волн и распространение электромагнитного поля обусловлено не отшнуровыванием силовых линий и их перемещением, а током смещения и явлениями электромагнитной и электрической индукции, лежащими в основе теории Максвелла. Почему ее не приложить к рассмотрению процесса излучения и распространения электромагнитного поля? Причины, повидимому, лежат в упомянутой выше традиции, в излишнем увлечении диаграммами Герца и в неточном и ошибочном их толковании.

Рассмотрение процесса излучения с точки зрения отшнуровывания электрических силовых линий влечет за собой отрыв магнитного поля от электрического: отшнуровывание электрических линий происходит без участия магнитного поля. В таком описании явления исключается превращение электрического поля в магнитное и наоборот, а самое магнитное поле оказывается некоторым „довеском“ к электрическому. Кроме того, как известно, современная физика рассматривает электрические и магнитные силовые линии как линии векторов напряженностей этих полей E и H . Представление ученых времен Фарадея о том, что электрические и магнитные силовые линии материальны и механически взаимодействуют друг с другом, в наше время явно ошибочно и неприемлемо.

Таким образом, только потому, что описание процесса излучения посредством отшнуровывания электрических силовых линий не соответствует истине, от него нужно решительно отказаться.

Вместе с тем учителям физики хорошо известны те неверные представления, которые возникают у многих учащихся в связи с таким описанием явления. Нередко у них создается впечатление, что одни и те же отшнуровавшиеся электрические силовые линии перемещаются в пространстве, или что электромагнитные волны представляют собою совокупность движущихся электрических и магнитных силовых линий. Ясно, насколько вредны в научном и мировоззренческом отношении такие представления.

Итак, верное в научном отношении описание явления распространения электромагнитного поля может быть дано при современном состоянии науки только на основе теории Максвелла. Этот прием и использован в настоящей книге.

Процесс распространения электромагнитного поля, в силу указанных выше причин, рассмотрен в § 15 относительно подробно. Рассказывая учащимся о распространении электромагнитного поля, учителю полезно учесть следующие соображения.

Процесс распространения электромагнитного поля происходит не мгновенно во всем пространстве, окружающем диполь, а постепенно, с конечной скоростью. Поэтому изменения поля в каждой последующей точке

несколько запаздывают, по сравнению с изменениями поля в предыдущей точке. В связи с тем, что скорость распространения электромагнитного поля велика (порядка 300 000 км/сек), при относительно небольших расстояниях может создаваться ошибочное впечатление мгновенного распространения поля. (Учащимся должно быть известно, что по той же причине сначала предполагали, что и свет распространяется мгновенно.)

Из описания процесса распространения электромагнитного поля должно быть очевидным, что оно существует непрерывно изменяясь, что оно по самой своей природе не может быть статическим, так как индуктированное электрическое или магнитное поле существует только во время изменения первичного поля.

Изображение поля с помощью силовых линий — условный прием. Каждый такой чертеж дает структуру поля в какой-то один момент времени, так как распространение электромагнитного поля представляет собою сложный процесс непрерывного изменения и, следовательно, обновления поля.

Надо считать естественным стремление представить себе сложную картину процесса распространения электромагнитного поля.

Задача эта нелегкая и может решаться различными путями. Один из них тот, который использован в § 15 (рис. 41—45).

Следует учесть затруднения, возникающие у учащихся и в другой области: различие в закономерностях в I и II зонах электромагнитного поля. О существовании этих зон придется сказать учащимся, так как во всем дальнейшем материале темы мы и будем иметь дело со II зоной, а не с I, которая рассматривалась нами до этого. Закономерности же в I и II зонах весьма различны. Так, например, в I зоне напряженность магнитного поля обратно пропорциональна квадрату расстояния, а напряженность электрического поля обратно пропорциональна кубу расстояния, во II зоне — напряженность магнитного и электрического поля обратно пропорциональна расстоянию в первой степени. Максимуму напряженности магнитного поля в I зоне соответствует нулевое значение напряженности электрического поля, а максимальные и нулевые значения

напряженности этих полей во II зоне совпадают. Возможный путь в преодолении трудностей, возникающих при ознакомлении с этим вопросом, указан в тексте § 15.

В связи с тем, что нулевые значения напряженностей электрического и магнитного полей во II зоне совпадают во времени, нередко возникает вопрос о том, куда же девается в этот момент времени энергия электрического и магнитного полей, нет ли здесь нарушения

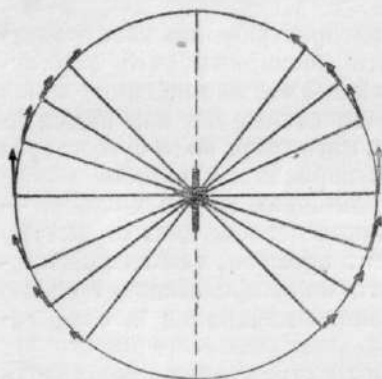


Рис. 50. Зависимость амплитуды колебания вектора напряженности электрического поля от угла между лучом и диполем.

закон сохранения энергии. При такой постановке вопроса упускается из вида, что в данном случае речь идет о распространяющемся электромагнитном поле, о поле динамическом. В точке поля, в которой напряженность электрического и магнитного полей имеет нулевое значение, в этот момент времени энергия равна нулю, но она не исчезла, а перешла вместе с перемещающейся электромагнитной волной в соседнюю область поля. Уменьшение энергии в одной точке поля сопровождается увеличением энергии в последующей точке поля. Достигнув максимального значения, энергия и в этой точке начнет уменьшаться, а в следующей возрастать и т. д.

Наибольшие значения напряженностей электрического и магнитного полей (амплитуда колебаний) уменьшаются по мере удаления от диполя обратно пропорционально расстоянию до него.

Кроме того, как об этом сказано в § 15, амплитуда колебаний зависит от угла между лучом и диполем (прямо пропорциональна синусу этого угла). На рис. 50 показаны значения амплитуды колебания вектора напряженности электрического поля в зависимости от угла между лучом и диполем. Числовое значение амплитуд колебания векторов напряженности магнитного поля в этих точках такое же, но сами векторы перпендику-

лярны к плоскости чертежа. Это значит, что наиболее интенсивно излучение диполя в плоскости, перпендикулярной диполю и проходящей через его середину. По другим направлениям, составляющим с диполем угол меньше 90° , интенсивность излучения уменьшается, а в направлении, совпадающем с осью диполя, диполь не излучает вовсе. Об этой зависимости амплитуды колебаний от угла между лучом и диполем учащимся можно не рассказывать.

В процессе изложения материала § 15 понадобятся чертежи. Многие из них (в том числе и чертеж электромагнитной волны на рис. 46) могут быть выполнены на классной доске во время урока. Более сложные чертежи, например, изображение электрического и магнитного полей вибратора, и особенно чертеж рис. 45 необходимо приготовить заранее. Чертежи целесообразно сделать на листах чертежной бумаги такого размера, чтобы они были хорошо видны учащимся. При ответах учащиеся могут пользоваться этими же чертежами.

§ 16. В учебный план темы не включен. Помещен для учителя.

§ 17. Материал этого параграфа входит в учебный план неполностью: сведения о зависимости энергии электромагнитного поля от частоты колебаний, вследствие недостатка времени, придется опустить.

Убеждение в материальности электромагнитного поля чрезвычайно важно в научном отношении и имеет большое мировоззренческое значение. Представление о материальности электрического и магнитного полей должно быть создано у учащихся еще раньше: при изучении тем „Электрическое поле“ и „Магнитное поле“. Мысль о том, что мир материален и что в основе любого физического процесса лежит движущаяся материя, очевидно, прививалась учащимся на протяжении всего времени изучения ими физики. Справедливость этой мысли должна подтверждаться для учащихся всем тем, что им известно из школьного курса физики.

Поэтому представление о материальности электромагнитного поля не может и не должно быть для учащихся неожиданным. Изучая электромагнитное поле, учащиеся должны понять, что электромагнитное поле существует как самостоятельный физический объект, что оно существует непрерывно изменяясь. Познакомились учащиеся

и с довольно сложным процессом распространения электромагнитного поля. С другой стороны, никакой физической процесс не может протекать там, где ничего нет. Отсюда — заключение о том, что и электромагнитное поле представляет собою движущуюся материю. Еще при первом знакомстве учащихся с электрическим полем (а дальше — и с магнитным полем) вероятно им было рассказано о том, что тот вид материи, какой мы называем полем, отличен от материи в форме вещества, что материя в форме поля — не молекулярного, а более сложного строения. То же самое относится и к электромагнитному полю. Более сложными, чем механические, оказываются и формы движения материи в виде поля.

В защиту представления о материальности электромагнитного поля свидетельствуют и соображения, приведенные в § 17.

В итоге, в процессе изучения физики в средней школе учащиеся знакомятся с двумя основными формами материи: в форме вещества и поля.

§ 18 помещен для учителя. Учащимся полезно сказать о потерях энергии в контуре, связанных с излучением, и о том, что замкнутый контур излучает слабо, открытый — сильно. За недостатком времени не придется касаться причин, по которым интенсивность излучения этого типа контуров резко различна.

Более подробно о типе колебательных контуров и их способности излучать электромагнитные волны рассказано в § 24.

Глава III.

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.

§ 19. Экспериментальное обнаружение электромагнитных волн.

Рассказав об электромагнитных колебаниях и волнах, кратко остановимся на истории развития этого учения.

Электрические колебания при разряде конденсатора были предсказаны в 1853 г. В. Томсоном. Он указал условия их возникновения и дал формулу для опреде-

ления их периода. В 1867 г. Максвелл получил уравнения, устанавливающие связь между электрическим и магнитным полями. Связь эта состоит в том, что изменение магнитного поля вызывает появление электрического поля и наоборот — изменение электрического поля вызывает появление магнитного (об этой связи мы говорили в § 14). Из уравнений Максвелла вытекает ряд следствий. В частности, что электромагнитное поле должно распространяться в пространстве, т. е., что должны существовать электромагнитные волны, распространяющиеся со скоростью $3 \cdot 10^{10}$ см/сек или, что то же, $300\,000$ км/сек, т. е. со скоростью света. Это обстоятельство, в случае экспериментального подтверждения его, свидетельствовало бы о тождественности электромагнитных и световых волн. Теория, рассматривающая свет как электромагнитные волны, называется электромагнитной теорией. Таким образом, электромагнитная теория света оказалась бы подтвержденной экспериментально.

Для экспериментальной проверки существования электромагнитных волн и определения скорости их распространения надо было получить волны небольшой длины, удобные для экспериментирования. Связь между длиной волны, скоростью ее распространения и периодом, или частотой, выражается формулами:

$$\lambda = \nu T,$$

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

Следовательно, при частоте в 10^6 Hz получим волны, длина которых

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^{10}}{10^6} = 3 \cdot 10^4 \text{ см} = 300 \text{ м}.$$

Волна такой большой длины для экспериментирования в условиях лаборатории неудобна. Для получения более коротких волн нужно было создать контур с возможно малой емкостью и индуктивностью, в результате чего частота колебаний возрастает. Это обстоятельство и было использовано в 1888 г. Герцем в его опытах. Герц пользовался колебаниями с частотой в 10^9 Hz, при которых получались волны длиной 30 см. Один из

вibratorов Герца представлял собою два линейных проводника с искровым промежутком между ними и с двумя небольшими шарами на концах. Заряжался контур от индукционной катушки. Электромагнитные волны, излучаемые этим вибратором, обнаруживались резонатором в виде дугообразно изогнутого проводника с шариками на концах (рис. 51).

Когда электромагнитная волна доходит до этого резонатора, то в нем возникают электрические колебания, вследствие чего между его шариками проскакивает искра. Пользуясь этим резонатором, можно проследить

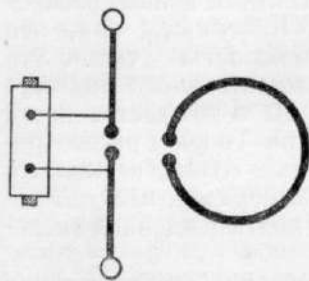


Рис. 51. Вибратор и резонатор Герца.

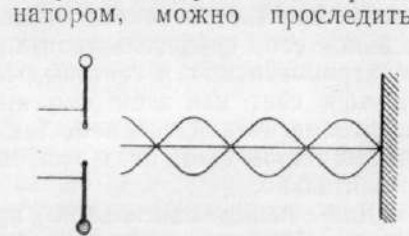


Рис. 52. Электрические стоячие волны между вибратором и металлическим листом.

распределение электромагнитных волн в пространстве, окружающем вибратор. Таким образом Герц на опыте обнаружил существование электромагнитных волн. Оказалось, что электромагнитные волны отражаются от проводящих электричество поверхностей, как отражается свет от зеркала. Это обстоятельство было обнаружено и использовано Герцем в его опытах.

Как известно из учения о механических колебаниях и волнах, при сложении поступательной волны с отраженной возникают стоячие волны. Стоячие волны являются существеннейшим признаком волновой природы явления. Оказалось, что если на пути электромагнитных волн, идущих от вибратора, поместить металлический лист, то между ним и вибратором возникают стоячие волны с узлами и пучностями электрического и магнитного полей (рис. 52).

Узел напряженности магнитного поля лежит там, где имеется пучность напряженности электрического

поля, и наоборот. Перемещая между вибратором и зеркалом резонатор, можно убедиться, что в нем периодически то возникают, то исчезают искры в зависимости от того, находится ли резонатор в данный момент в пучности или в узле напряжения стоячей волны. Таким образом, этими опытами Герц экспериментально показал существование электромагнитных волн и их отражение от металлических поверхностей.

§ 20. Тождественность электромагнитных и световых волн.

Опыты со стоячими электромагнитными волнами, описанные в предыдущем параграфе, могут быть использованы для определения длины электромагнитных волн и скорости их распространения. В самом деле: расстояние между двумя соседними узлами или пучностями равно длине стоячей полуволны. Она может быть измерена на основании данных опыта, как расстояние между двумя ближайшими положениями резонатора, при которых между его шариками проскакивает искра. Длина же стоячей полуволны, как известно, равна половине поступательной волны. Отсюда можно узнать длину электромагнитных волн, излучаемых данным вибратором. Период колебаний линейного вибратора может быть вычислен с большой точностью по его геометрическим размерам. Зная длину волны и период колебаний, можно по известной формуле $v = \frac{\lambda}{T}$ вычислить скорость распространения электромагнитных волн. Это и было сделано.

Результат получился знаменательным: скорость распространения электромагнитных волн в вакууме оказалась равной скорости света, т. е. $3 \cdot 10^{10}$ см/сек или 300 000 км/сек. Это было первое подтверждение тождественности электромагнитных и световых волн.

Дальнейшее исследование электромагнитных волн значительно упростилось благодаря применению с 1890 г. так называемого когерера и параболических зеркал. Когерер представляет собою стеклянную трубочку (рис. 53), в которую входят два стерженька, оканчи-

вающихся в ней металлическими пробочками *a* и *b*, между которыми находятся металлические опилки. Когерер оказался очень чувствительным к электромагнитным волнам. Его опилки помещаются на место искрового промежутка в резонаторе, а стерженьки, выходящие из стеклянной трубочки, соединяются с гальваническим элементом или с аккумулятором и с гальванометром или звонком (рис. 54).

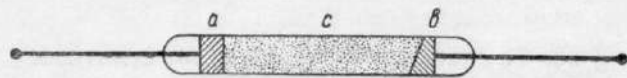


Рис. 53. Когерер.

Опилки в трубочке, плохо контактируя, оказывают току большое сопротивление, звонок не звонит, и если в цепи включен гальванометр—стрелка его не отклоняется. Но, когда до цепи с когерером доходят электромагнитные волны и в когерере возникает ток, между опилками в когерере проскакивают искорки; спаивая их в непрочный мостик, в результате чего сопротивление опилок резко уменьшается и звонок начинает зво-

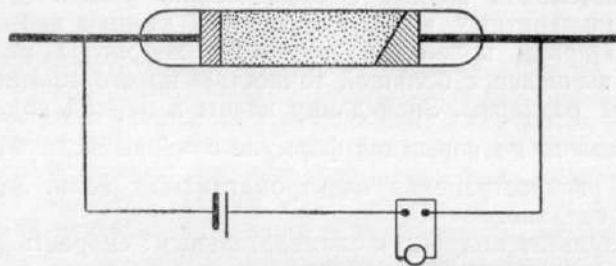


Рис. 54.

нить. Достаточно слегка встряхнуть когерер, чтобы образовавшийся между опилками контакт был нарушен. Если электромагнитные волны больше не поступают, то сопротивление когерера снова станет большим и звонок перестанет действовать. Если к когереру вновь подойдут электромагнитные волны, то звонок опять зазвонит, и т. д.

Другим прибором, способствовавшим дальнейшему исследованию электромагнитных волн, было параболическое зеркало (рис. 55)—металлический лист, которому придана параболическая форма. Если в фокальной линии параболического зеркала поместить искровой разрядник вибратора (провода от шариков искрового промежутка выводятся наружу через заднюю стенку зеркала), то вследствие того, что электромагнитные волны отражаются от металлических поверхностей, они окажутся направленными в одну сторону—в сторону отверстия зеркала. В фокальной линии другого параболического зеркала можно поместить когерер (провода от него, которые должны присоединиться к элементу и звонку, выводятся наружу тоже через заднюю стенку зеркала). Схема таким образом смонтированных вибратора и цепи резонатора с когерером показана на рис. 56, а внешний вид—на рис. 57.

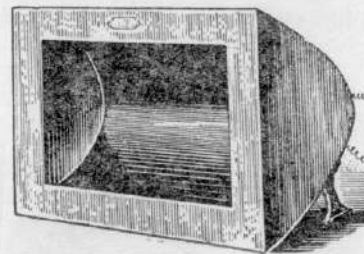


Рис. 55. Параболическое зеркало.

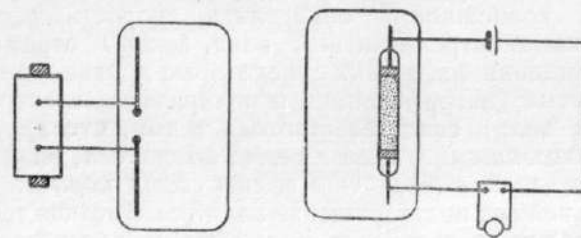


Рис. 56. Схематическое изображение вибратора и резонатора с параболическими зеркалами.

Пользуясь ими, можно проследить за путями распространения электромагнитных волн. Расположив параболические зеркала так, как это указано на рис. 58, удалось установить, что электромагнитные волны отражаются от металлических поверхностей по законам отражения света.

Диэлектрики оказались прозрачными для электромагнитных волн: если заслонить отверстие параболического зеркала вибратора деревянной доской, картоном, стеклом, и т. п., то звонок в цепи когерера, расположенной напротив, звонит. Если заслонить вибратор металлическим листом, этого не происходит. Расположив приборы так, как это указано на рис. 59, установили, что и преломление электромагнитных волн происходит по законам преломления света (призма

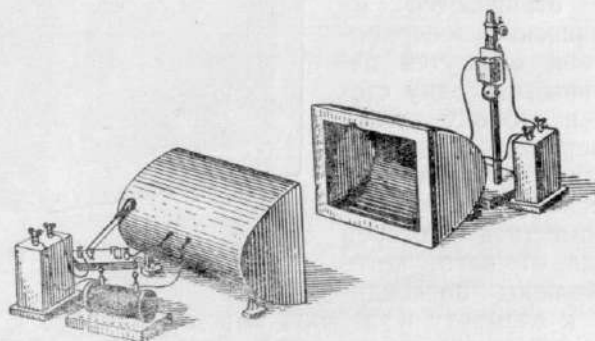


Рис. 57. Внешний вид установки по схеме рис. 56.

делалась из асфальта или парафина). Все эти опыты, давшие возможность определить скорость распространения электромагнитных волн, законы отражения и преломления их, а также некоторые другие, нами не упомянутые (интерференция и поляризация электромагнитных волн), свидетельствовали о том, что *природа электромагнитных волн и света одинакова, различие состоит лишь в том, что волны света короче.*

Дальнейшее подтверждение электромагнитная теория света получила в работах выдающегося русского ученого П. Н. Лебедева (1866—1912 гг.), который, построив малых размеров вибратор и резонатор, получил электромагнитные волны длиной 3—4 мм. Самый факт получения столь коротких электромагнитных волн имел большое научное значение, так как приближал экспериментально получаемые электромагнитные волны к волнам света.

Но еще большее значение имело другое обстоятельство. В оптике было известно явление так называемого

двойного преломления в кристаллах исландского шпата, состоящее в том, что луч света, падающий на грань кристалла, разделяется в нем на два луча. Используя полученные им короткие электромагнитные волны, П. Н. Лебедев опытным путем обнаружил двойное преломление их в кристаллах. Этими блестящими работами, выполненными с большим искусством тонкого экспериментатора, П. Н. Лебедев окончательно подтвердил, что все законы оптики, включая и двойное лучепреломление, справедливы и для электромагнитных волн.

В связи с тождественностью электромагнитных и световых волн, здесь следует упомянуть и о другой замечательной работе П. Н. Лебедева.

Из электромагнитной теории света вытекало, что свет должен производить давление на поверхность, на которую он падает. Световое давление очень незначи-

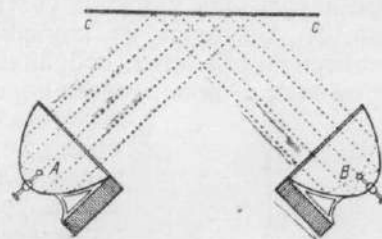


Рис. 58. Отражение электромагнитных волн.

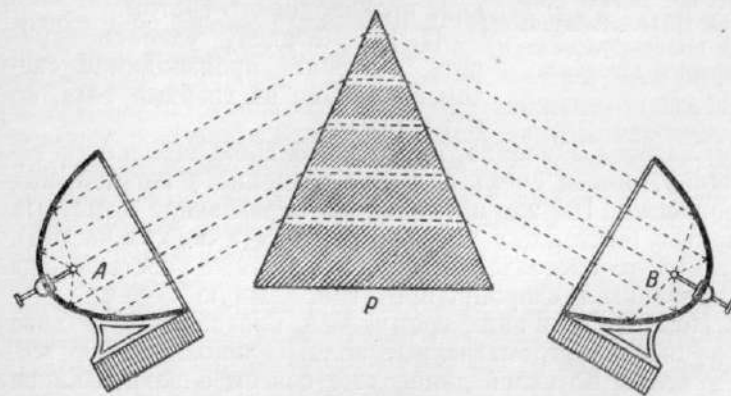


Рис. 59. Преломление электромагнитных волн.

тельно. Черная (поглощающая) поверхность, освещенная солнечными лучами, падающими на нее перпендику-

лярно, испытывает давление около $4 \cdot 10^8$ грамма. Поэтому долгое время не удавалось обнаружить световое давление экспериментально. Основной частью прибора, которым пользовался П. Н. Лебедев, служило подвешенное на тонкой кварцевой нити легкое стеклянное коромысло с двумя легкими кружочками на концах (рис. 60). Это коромысло помещалось в сосуд, в котором создавался вакуум для того, чтобы токи воздуха, возникающие при нагревании кружков светом, не поворачивали коромысло. На один из кружочков направлялся свет от электрической дуги, собранный линзой. Свет давил на кружочек и, поворачивая коромысло на некоторый угол, закручивал кварцевую нить. Коромысло переставало поворачиваться, когда сила давления света оказывалась уравновешенной силой упругости деформированной нити. Угол поворота коромысла определялся по отклонению луча света, посланного на зеркальце *S*. Зная угол поворота коромысла и упругость материала нити, можно определить величину силы, закрутившей нить. Эта сила и есть сила давления, производимого светом.

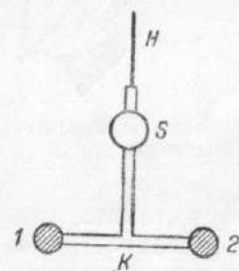


Рис. 60. Деталь прибора П. Н. Лебедева для определения светового давления.

Световое давление, несмотря на свою небольшую величину, имеет очень большое значение в космических процессах. Им же объясняется образование кометных хвостов (состоящих из очень мелких и легких частиц), а также то обстоятельство, что кометные хвосты всегда направлены в сторону, противоположную Солнцу.

Позже, уже в наше время, А. А. Глаголева-Аркадьева получила электромагнитные волны длиной до 0,08 мм. Эти волны по своей длине уже совсем близки к длине волны инфракрасных лучей.

Таким образом, тождественность электромагнитных и световых волн, впервые установленная работами Герца и Лебедева, была подтверждена работами и последующих ученых.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС.

§ 21. Настройка контуров в резонанс.

Для обнаружения электрических колебаний в контуре прибегают к электрическому резонансу. При изучении механических колебаний мы познакомились с явлением резонанса, установив, что передача колебаний от одного тела к другому происходит в максимальном размере тогда, когда период

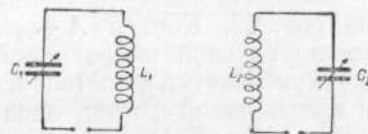


Рис. 61. Два настраивающихся контура.

собственных колебаний резонатора совпадает с периодом колебаний вибратора. Это положение остается в силе и в случае электрических колебаний. Если в каком-либо вибраторе возбуждены электрические колебания, то в приемном контуре возникнут колебания (вынужденные) такой же частоты. Амплитуда их будет максимальна, если период собственных колебаний резонатора совпадает с периодом колебаний в вибраторе. Таким образом для того, чтобы передача энергии от вибратора к резонатору происходила в максимальном размере, надо, чтобы периоды колебаний (или, что то же самое, частоты колебаний) вибратора и резонатора были одинаковыми. Надо, как говорят, настроить контуры в резонанс. Так как период колебаний зависит от емкости и индуктивности контура, то для настройки одного контура в резонанс с каким-либо другим надо изменять его емкость или индуктивность, или и то и другое одновременно. На практике часто прибегают к настройке контура на желаемую частоту колебаний изменением емкости, включая в контур конденсатор переменной емкости. Очевидно, что условия резонанса двух контуров могут быть выражены следующими формулами:

$$T_1 = T_2,$$

$$2\pi\sqrt{L_1 C_1} = 2\pi\sqrt{L_2 C_2},$$

$$L_1 C_1 = L_2 C_2.$$

На рис. 61 схематически показаны два настраивающихся контура.

Как мы увидим в дальнейшем, явление электрического резонанса широко используется в радиотехнике.

§ 22. Опытное обнаружение резонанса.

Наблюдать явление электрического резонанса можно на многих опытах. Остановимся только на некоторых из них.

Соберем два колебательных контура, изображенных на рис. 62. Контур *A* состоит из лейденской банки и прямоугольной проволочной рамки с искровым промежутком. Контур *B* состоит из такой же лейденской банки и проволочной рамки, одна сторона которой *df* может перемещаться. От стержня, соединенного с внутренней обкладкой банки *B*, идет станиоловая полоска *e*, наклеенная на крышку банки и на ее боковую стенку и немного

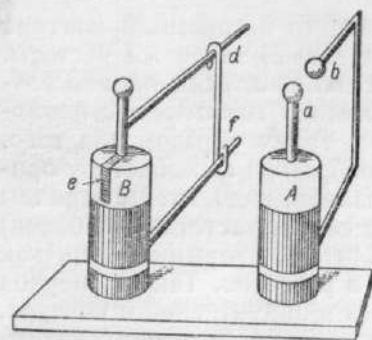


Рис. 62. Вибратор и резонатор с искровым разрядником в качестве индикатора колебаний.

не доходящая до наружной обкладки этой банки. Этот промежуток между внутренней и наружной обкладками банки является искровым промежутком в контуре *B*. Расположим один контур на некотором расстоянии от другого так, как показано на рис. 62.

Соединим шарики разрядника *ab* контура *A* с выводами вторичной обмотки индукционной катушки Румкорфа. В искровом разряднике контура *A* начнет проскакивать искра; в контуре *A* появятся затухающие электрические колебания, он будет играть роль вибратора.

В контуре *B* возникнут вынужденные электрические колебания той же частоты. Контур *B* является резонатором. Передвигая подвижную перемычку *df* в резонаторе *B*, мы увидим, что при некотором положении

перемычки искра в искровом промежутке контура *B* будет „жирная“, при других положениях перемычки — еле заметная, а если перемычка сильно сдвинута в одну или другую сторону от первого своего положения — искры вовсе не будет. Очевидно, что передвигая перемычку *df*, мы изменяли индуктивность в резонаторе *B*. (Вспомним, что такой проводник, согнутый в форме рамки, оказывает высокочастотному току большое индуктивное сопротивление. См. § 8.) В связи с этим изменялась и частота собственных колебаний резонатора. При

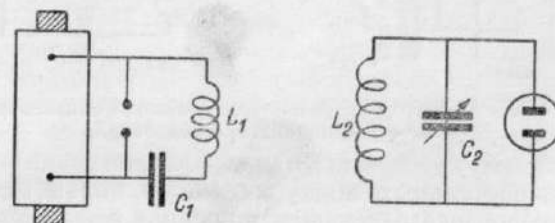


Рис. 63. Вибратор и резонатор с неоновой лампочкой в качестве индикатора колебаний.

совпадении собственной частоты колебаний резонатора *B* с частотой собственных колебаний вибратора *A* амплитуда колебаний в резонаторе *B* становится максимальной, что обнаруживается жирной искрой. Резонатор оказался настроенным в резонанс с вибратором. При отсутствии резонанса вынужденные колебания в контуре *B* происходят с очень небольшой амплитудой.

Произведем еще один опыт, обнаруживающий явление резонанса, воспользовавшись для настройки контуров конденсатором переменной емкости.

С этой целью можно воспользоваться в качестве вибратора контуром, описанным в § 7, который мы употребляли для обнаруживания колебаний. Резонатором может служить контур, индикатором колебаний в котором служит или неоновая сигнальная лампа или же лампочка от карманного фонаря. Схема установки с неоновой лампой дана на рис. 63, а с лампочкой от карманного фонаря на рис. 64.

В обоих случаях катушка L_2 такая же, как L_1 , или сотовая, смонтированная на панельке; C_2 — конденсатор

переменной емкости, с помощью которого производим настройку резонатора.

Лампа в резонаторе горит при одном положении подвижных пластин конденсатора и не горит при других положениях этих пластин.

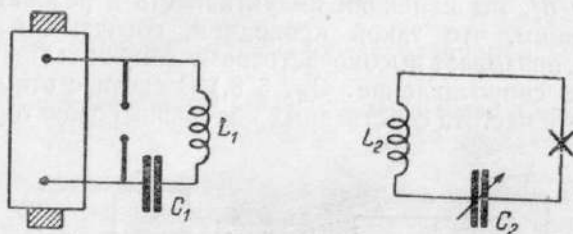


Рис. 64. Вибратор и резонатор с лампой накаливания в качестве индикатора колебаний.

В колебательных контурах могут иметь место два случая резонанса: резонанс напряжений и резонанс токов.

Очень эффектный опыт, обнаруживающий резонанс напряжений в цепи, питаемой от осветительной сети переменным током частотой в 50 герц, можно наблюдать на установке, изображенной на рис. 65, где C — конденсатор приблизительно в 4 микрофарады, L — катушка переменной индуктивности, в качестве которой может быть использован школьный разборный трансформатор. Надев на сердечник трансформатора катушку с самым большим числом витков, накладываем половины сердечника друг на друга, не стягивая их болтом, чтобы в последующем можно было, смещая одну половину сердечника относительно другой, изменять величину индуктивности катушки. M — лампочка накаливания в 40 ватт. Цепь подключается к городскому переменному току с частотой в 50 герц, а затем, смещением одной половины сердечника трансформатора относи-

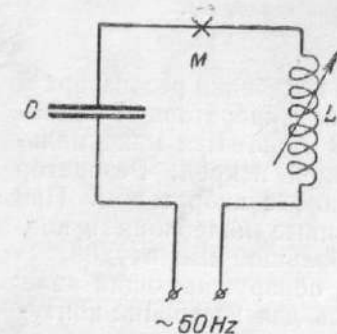


Рис. 65. Схема установки для демонстрации резонанса напряжений.

тельно друг на друга, не стягивая их болтом, чтобы в последующем можно было, смещая одну половину сердечника относительно другой, изменять величину индуктивности катушки. M — лампочка накаливания в 40 ватт. Цепь подключается к городскому переменному току с частотой в 50 герц, а затем, смещением одной половины сердечника трансформатора относи-

тельно другой плавно изменяем индуктивность катушки. Лампа начинает гореть все более и более ярко и, наконец, при некотором положении смещаемой нами половины сердечника наступает резонанс напряжений, и лампа вспыхивает сильным белым светом.

Объяснение этому явлению может быть дано следующее.

В § 2 и 3 мы познакомились с индуктивным и емкостным сопротивлением и формулами для вычисления их. Первое из них выражается формулой:

$$X_L = \omega L = 2\pi\nu L,$$

а второе формулой:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

Вспомним (это важно для дальнейших рассуждений), что эти формулы показывают, что индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте тока, а емкостное — обратно пропорционально ей. Известно также, что полное сопротивление цепи, имеющей активное и индуктивное сопротивление, определяется формулой:

$$Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2},$$

а полное сопротивление цепи, имеющей активное и емкостное сопротивление — формулой:

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Каково же полное сопротивление цепи, имеющей и активное, и индуктивное, и емкостное сопротивления?

Теория доказывает, что полное сопротивление такой цепи выражается формулой:

$$Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}$$

или

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

где r — активное сопротивление цепи. В эту формулу индуктивное и емкостное сопротивление входят в виде разности. Поэтому при равенстве их общее сопротивление цепи уменьшится, став равным только активному

сопротивлению. Сила тока в цепи резко возрастет — наступит резонанс напряжений. Он проявится в том, что на обкладках конденсатора и на концах катушки самоиндукции возникнут значительные напряжения, превосходящие приложенное внешнее напряжение.

Известно, что можно заставить колебаться с большой амплитудой тяжелый груз, подвешенный на тросе, легкими толчками при подтягивании нитки, привязанной к тросу, если эти слабые толчки будут происходить в такт с колебаниями груза.

Итак, резонанс напряжений проявляется в том, что полное сопротивление контура, оказываясь равным только активному сопротивлению контура, становится минимальным, а сила тока — максимальной.

В описанном выше опыте, сдвигая одну половину сердечника трансформатора относительно другой, мы изменяли индуктивность катушки самоиндукции и тем самым добивались того, что индуктивное сопротивление контура оказывалось равным емкостному. В итоге — сопротивление контура оказывалось минимальным, сила тока возрастала и лампа начинала гореть очень ярко.

Можно показать, что резонанс напряжений, а значит, и условия, при которых переменный ток встретит в цепи только активное сопротивление (а если оно будет мало, то сила тока резко возрастет), наступят тогда, когда период тока в данной цепи окажется равным

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

В самом деле, как уже указывалось, явление резонанса наступает, если

$$X_L - X_C = 0 \text{ или } X_L = X_C.$$

Тогда

$$\omega L = \frac{1}{\omega C},$$

$$2\pi\nu L = \frac{1}{2\pi\nu C},$$

но

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Имеем:

$$\frac{2\pi L}{T} = \frac{1}{2\pi C},$$

$$T^2 = 4\pi^2 LC,$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Но по этой же формуле определяется период собственных колебаний контура. Отсюда видно, что резонанс наступает в том случае, если период подведенного к контуру переменного напряжения совпадает с периодом собственных колебаний контура.

Описанный опыт резонанса напряжений интересно сопоставить с опытами (см. § 2 и 3), поставленными с целью выявить роль индуктивности и емкости в цепи переменного тока.

При включении последовательно с лампой емкости или индуктивности лампа горела менее ярко, чем без них. Здесь же она горит чрезвычайно ярко. Это наглядно подтверждает, что действие емкости и самоиндукции противоположны и „гасят“ друг друга.

Резонанс напряжений применяется в радиотехнике для получения в контурах максимального напряжения и максимального тока.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.

§ 19, 20. В соответствии с программой учащиеся должны быть знакомы с основами электромагнитной теории света. Для того чтобы это знакомство не было поверхностным и явно необоснованным, необходимо установить тождественность электромагнитных и световых волн. Наиболее логичный, последовательный и убедительный путь, ведущий к установлению этого тождества, лежит в доказательстве того, что электромагнитные и световые волны подчиняются одним и тем же законам. А этот факт, как известно, и был блестяще доказан опытами Г. Герца и П. Н. Лебедева. Поэтому познакомить учащихся с опытами Г. Герца и П. Н. Лебедева необходимо.

В наше время не так трудно воспроизвести большинство упомянутых опытов и в школьной обстановке.

При отсутствии параболических зеркал и когерера для экспериментального обнаружения электромагнитных волн можно воспользоваться следующей упрощенной установкой.

В качестве источника электромагнитных волн можно использовать электростатическую машину с вращающимися дисками или искровой разрядник с индукционной катушкой. Таким образом, электрическая машина или искровой разрядник, питаемый индукционной катушкой, будет служить нам вибратором.

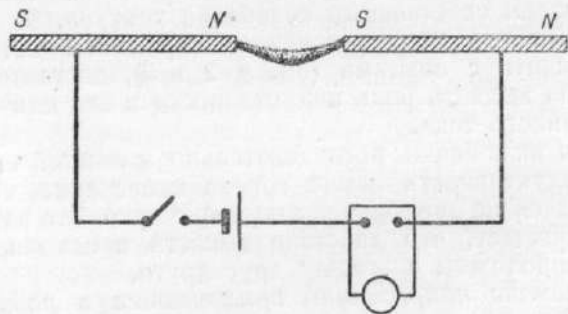


Рис. 66. Цепь с самодельным когерером для обнаружения электромагнитных волн А. С. Попова.

Самодельный когерер, соединенный последовательно с электрическим звонком, подключается к аккумулятору (или батарее аккумуляторов, в зависимости от напряжения, на какое рассчитан звонок). Упрощенный самодельный когерер устраивается следующим образом.

Две стальные намагниченные спицы длиной 30—40 см каждая зажимаются в деревянные штативы (если штативы металлические, то спицы надо изолировать от штативов) и располагаются горизонтально по одной прямой линии так, чтобы полюсы их, расположенные один против другого, были разноименные. Расстояние между полюсами 3—4 мм. На эти полюсы насыпают железные опилки (не очень мелкие). Часть из них падает, а другая часть замыкает полюсы спиц своеобразной „гирляндой“. К другим концам спиц присоединяются гибкие провода, идущие к звонку и элементу, как это указано на схеме рис. 66.

Расположив на столе вибратор (электростатическую машину или искровой разрядник с индукционной катушкой), напротив него на некотором расстоянии, определяемом опытным путем, ставим цепь с когерером. Возбуждаем искру в вибраторе. В тот момент, когда в вибраторе проскакивает искра, звонок в цепи резонатора начинает звонить (разумеется, при замкнутом рубильнике в этой цепи, показанной на рис. 66). Легким ударом по столу слегка сотрясаем когерер, звонок перестает звонить. Если в вибраторе вновь вызвать искру, звонок опять начинает звонить, и т. д. Расстояние между полюсами спиц, замыкаемых опилками, подбирается опытным путем.

Звонок может быть заменен гальванометром, но в этом случае, подбирая расстояние между полюсами спиц, надо следить за тем, чтобы, случайно приведя их в непосредственное соприкосновение, не пережечь гальванометр.

В ряде случаев удается добиться устойчивой работы описанной установки при расстоянии от вибратора до приемной цепи с когерером порядка 10 и даже 15 м.

После опытов Герца следует кратко рассказать учащимся об опытах П. Н. Лебедева, причем для экономии времени описание его установки для определения давления света можно не давать.

Подводя итоги работам Г. Герца и П. Н. Лебедева, надо уделить достаточное внимание тождественности электромагнитных и световых волн.

В § 17 шла речь о материальности электромагнитного поля и о том, что оно обладает энергией. Очевидно, что этот вывод должен быть распространен и на свет.

В связи с затронутым вопросом учителю физики полезно вспомнить также следующее

Световое давление свидетельствует о том, что свет (электромагнитные волны) обладает не только энергией, но и массой. В самом деле: понятие о давлении связано с понятием о силе, а значит — с количеством движения ($Ft = mv$), а это последнее приводит нас к заключению, что свет обладает массой. Данные, полученные П. Н. Лебедевым в результате его опытов, позволяют вычислить массу света.

П. Н. Лебедев установил, что сила давления света выражается следующей формулой:

$$F = \frac{W}{c},$$

где F — сила давления света, W — энергия, приносимая светом в 1 сек., c — скорость света.

Энергия, приносимая светом в 1 сек., очевидно, равна всей приносимой энергии, деленной на время действия света.

Тогда получаем:

$$F = \frac{E}{ct},$$

где E — энергия света, а t — время его действия.

Из второго закона динамики известно, что сила давления, производимого каким-либо телом, измеряется изменением количества движения за единицу времени:

$$F = \frac{mv - mv_0}{t}$$

или

$$F = \frac{mv}{t},$$

если начальная скорость тела равна нулю.

Второй закон динамики применим не только к твердому телу, но и к потоку жидкости или газа, причем в этом случае m есть масса всей жидкости или газа, изменяющих свое количество движения. Второй закон динамики должен быть справедлив и для потока света. Тогда для светового давления мы имеем два выражения:

$$F = \frac{E}{ct} \quad \text{и} \quad F = \frac{mv}{t}.$$

Приравняв правые части этих равенств, получаем:

$$\frac{E}{ct} = \frac{mv}{t}.$$

Сокращая обе части равенства на t и учтя, что v в правой части равенства есть скорость света c , получаем:

$$\frac{E}{c} = mc,$$

откуда

$$E = mc^2.$$

В этой формуле E — энергия света, c — скорость света, m — масса света.

Энергия света может быть определена, скорость света известна; из уравнения $E = mc^2$ может быть вычислена масса света.

Итак, свет (электромагнитные волны) обладает и энергией, и массой.

§ 21, 22. Явление резонанса лежит в основе радио-передачи и радиоприема, поэтому материалу указанных параграфов нужно уделить достаточное внимание.

Наиболее простая и потому наиболее доступная школе демонстрация резонанса на лейденских банках (Лоджа). При налаживании демонстрации необходимо учесть, что успех опыта в значительной мере зависит от величины искрового промежутка в резонаторе (расстояние между наружной обкладкой банки и концом станиолевой полоски, соединенной с внутренней обкладкой банки и наклеенной на крышку банки и на ее боковую стенку). Величину этого промежутка надо подобрать на опыте.

Полезно также показать и еще один из опытов, описанный в § 22, например, на схеме рис. 64.

Настройку резонатора в этой установке производим с помощью конденсатора переменной емкости. Собрав установку, сначала следует убедиться, что вибратор развивает нужную мощность. Для этого надо оба контура сначала поставить близко друг к другу и проверить, горит ли лампа в приемном контуре. После этого, отодвигая один из них от другого, надо найти такое их положение, при котором явление резонанса наиболее хорошо обнаруживается (лампа в резонаторе горит при одном положении подвижных пластин конденсатора и не горит при других положениях этих пластин).

Для демонстрации на уроке всех опытов, упомянутых в § 22, времени нехватит. Поэтому придется ограничиться постановкой двух, а может быть и одного опыта из перечисленных в тексте.

Особенно эффективна и полезна демонстрация резонанса напряжений в цепи, питаемой переменным током от осветительной сети. Этот опыт и его толкование

ценны потому, что таким путем вскрываются условия, в которых наступает резонанс, и практическое осуществление этих условий с помощью приема, основанного на том, что действия емкости и индуктивности противоположны и „гасят“ друг друга.

Вопрос о резонансе напряжений (а также и токов) может служить интересной темой для внеклассных занятий.

Материал § 17, 19, 20, 21 и 22 прорабатывается на двух уроках. Возможно следующее распределение этого материала по времени: § 17, 19, 20—1 час и § 20 и 21—1 час.

Глава V.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОСВЯЗИ.

§ 23. Изобретение радио А. С. Поповым.

7 мая 1895 года русский ученый А. С. Попов (1859—1906 гг.) на заседании „Русского физико-химического общества“ сделал доклад о сконструированном им приборе. Свой доклад А. С. Попов закончил словами: „В заключение могу выразить надежду, что мой прибор при дальнейшем усовершенствовании его может быть применен к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией“.

Эта дата — день рождения одного из величайших изобретений человеческого гения — радио. 24 марта 1896 г. на заседании того же общества А. С. Попов передал на расстояние в 250 м первую в мире радиограмму. Осенью 1898 г. А. С. Попов и его помощник П. Н. Рыбкин установили свои приборы на кораблях „Европа“ и „Африка“ для связи в море. В 1899 г. ими были установлены радиостанции на острове Гогланд и на берегу возле города Котка на расстоянии около 50 км. С помощью этих радиостанций поддерживалась связь во время спасательных работ по снятию севшего на камни около острова Гогланд русского броненосца „Генерал-адмирал Апраксин“. (За границей до сих пор делаются попытки оспорить приоритет А. С. Попова

в изобретении радио и выдать за изобретателя радио итальянца Маркони. Эти попытки давно документально опровергнуты. Первая схема приемника Маркони появилась в 1897 г. В одной из своих заявок в патентное бюро Маркони сам писал о том, что ему известны статьи А. С. Попова в трудах Русского физико-химического общества за 1895 г.)

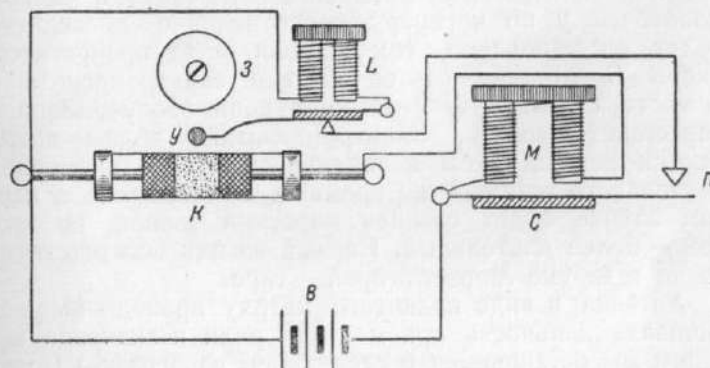


Рис. 67. Первый в мире приемник электромагнитных волн А. С. Попова.

В своем приемнике электромагнитных волн А. С. Попов использовал когерер, автоматически встряхиваемый в нужные моменты времени. Схема приемника А. С. Попова показана на рис. 67.

Когерер *К* включен в цепь батареи *В* и электромагнита *М*, перед полюсами которого находится якорь *С*. Провод, игравший роль приемной антенны, присоединялся А. С. Поповым к одному из выводов когерера.

Когда под влиянием проходящих электромагнитных волн, воспринимаемых антенной, сопротивление когерера уменьшается, якорь *С* притягивается магнитом *М* и замыкает цепь звонка *З*. Молоточек *у* звонка *З* ударяет по чашке звонка, а также по трубочке когерера, вызывает звон и одновременно восстанавливает сопротивление когерера.

Таким образом, электромагнит *М*, притягивающий к себе якорь *С*, когда по обмотке электромагнита проходит ток, является электромагнитным реле. Срабаты-

вая, реле замыкает цепь звонка. Пока приемник посредством антенны воспринимает электромагнитные волны, сопротивление когерера под их влиянием остается небольшим (несмотря на удары молоточка у звонка З по когереру), якорь С остается притянутым к электромагниту М, поэтому цепь звонка остается замкнутой и звонок звонит. Если передающая станция прекратит посылку электромагнитных волн, то последним ударом молоточка у по когереру сопротивление последнего будет восстановлено, ток в цепи реле прекратится, якорь С отойдет от сердечника электромагнита и в месте контакта П разомкнет цепь звонка. Звонок перестанет звонить. Электромагнитные волны посылаются передатчиком в течение короткого или более длительного промежутка времени. В приемнике в первом случае будет слышен короткий звонок, во втором — более длительный. Первый из них соответствует точке в азбуке Морзе, второй — тире.

Антенна в виде поднятого кверху проводника увеличивала дальность приема. (На роли и значении антенны мы остановимся в следующем параграфе.) Пользуясь такого рода приемником электромагнитных волн и искровым передатчиком (вibratorом), оказалось возможным передавать условные сигналы без проводов. Таков был первый радиоприемник Попова. Во время спасательных работ в 1899 г. по снятию с камней броненосца „Генерал-адмирал Апраксин“ А. С. Поповым и его помощником П. Н. Рыбкиным был впервые применен прием на телефонные трубки.

Значение трудов А. С. Попова состоит в том, что он открыл новое средство связи: сконструировал первый в мире радиоприемник, применил впервые приемную антенну и электромагнитное реле, которое под воздействием приходящих колебаний включало местную батарею, заставлявшую звонить звонок или приводившую в действие пишущий прибор.

Дальнейшие усилия А. С. Попова, а за ним и ряда других ученых, были направлены на усовершенствование передатчиков и приемников и на увеличение дальности передачи и приема.

С результатами работ в этом направлении мы кратко познакомимся в следующих параграфах этой книги.

§ 24. Типы колебательных контуров.

В § 14 мы рассмотрели явление электромагнитной и электрической индукции. Напряженность магнитного или электрического поля, возникающего при изменении первичного поля (в первом случае электрического, во втором — магнитного), тем больше, чем быстрее происходят изменения первичного поля. В § 15 мы рас-

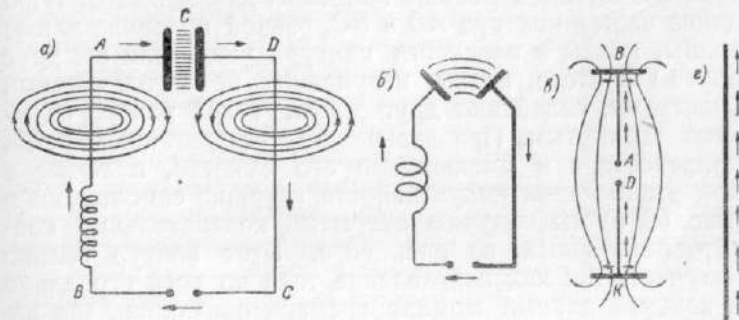


Рис. 68. Переход от замкнутого колебательного контура к открытому.

смотрели процесс распространения электромагнитного поля и установили, что в основе этого процесса лежат явления электромагнитной и электрической индукции, причем частота колебаний напряженности электрического и магнитного полей равна частоте электрических колебаний в контуре. Отсюда вытекает, что для получения интенсивных электромагнитных волн необходимо, чтобы частота колебаний в контуре была достаточно высокой. Однако только этого условия недостаточно, чтобы контур сильно излучал электромагнитные волны. Способность слабо или сильно излучать электромагнитные волны зависит еще от формы колебательного контура.

Колебательный контур, изображенный на рис. 68, а излучает очень слабо по следующим причинам. В каждый данный момент времени заряды пластин конденсатора равны по абсолютной величине и противоположны по знаку и удалены друг от друга на расстояние, значительно меньшее половины длины излучаемой волны.

Токи в противоположных частях контура (в AB и DC , а также в AD и BC) в каждый данный момент времени имеют противоположные направления. (Направление тока в контурах на рис. 68 указано для одного момента времени.) Магнитные поля противоположных частей контура с токами противоположных направлений — вне контура противоположны и ослабляют друг друга, так как расстояние между противоположными частями контура значительно меньше половины длины волны. (При длине частей контура AD и BC , равной половине длины волны, волны в плоскости контура усиливали бы друг друга.) В итоге, волны, излучаемые противоположными участками, ослабляют друг друга. Такой контур называют замкнутым. При дальнейшем раздвигании пластин конденсатора и уменьшении его емкости, а также и при уменьшении индуктивности катушки самоиндукции (рис. 68, б) мы получим открытый колебательный контур, показанный на рис. 68, в. Этот контур сильно излучает, так как направление тока по всей его длине в каждый данный момент времени одинаково, так же как одинаково и направление магнитных линий по всей длине провода. И, наконец, искрового промежутка в линейном вибраторе может и не быть, так как электрические колебания в нем могут быть вызваны, как это мы дальше увидим, и без него. Кроме того, при достаточно большой длине вибратора могут быть удалены и пластины конденсатора. Тогда открытый колебательный контур обратится в линейный проводник — вибратор (см. рис. 68, г), в котором могут быть возбуждены электрические колебания.

Линейный вибратор, с которым мы до сих пор имели дело, и является открытым колебательным контуром.

Таким образом, сильно излучающий контур должен удовлетворять следующим требованиям: 1) колебания в нем должны быть достаточно высокой частоты и 2) в нем не должно быть участков с противоположным направлением токов, или же расстояние между такими участками не должно быть малым по сравнению с длиной излучаемой волны.

§ 25. Назначение антенны. Распространение радиоволн.

Для обеспечения достаточной дальности радиопередачи нужно, чтобы вибратор был сильно излучающим. Мы уже установили, что с этой целью следует прибегнуть к открытому колебательному контуру — линейному вибратору. Было обнаружено, что вертикальный провод (вибратор) излучает сильно, а расположенный горизонтально (особенно, если он невысоко над землей) излучает слабо (см. § 15). Поэтому проводник (вибратор) располагают вертикально. Чем он длиннее, тем больше излучение. Но длина вибратора, кроме того, связана еще и с длиной излучаемой им волны. Как уже говорилось (см. § 16), в линейном контуре возникают стоячие электрические волны. В связи с известным уже нам соотношением между длиной стоячей полуволны и длиной излучаемой волны, длина вибратора должна быть равна половине длины излучаемой волны: $\lambda = \frac{l}{2}$. В радиотехнике употребляют и корот-

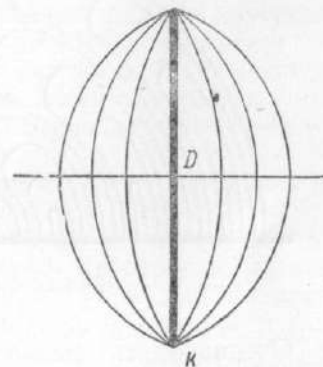


Рис. 69. Сечение вибратора проводящей плоскостью.

кие и длинные волны, доходящие до нескольких сотен и даже тысяч метров. При волне, например, в 1200 м надо было бы взять вибратор длиной 600 м, а при более длинных волнах еще более длинные (высокие) вибраторы. Понятно, что технически такие вибраторы невыполнимы. Исследования показали, что размеры вибратора могут быть сильно сокращены. Оказалось, что можно уменьшить размеры вибратора вдвое, не изменяя периода колебаний в нем и длины излучаемой волны.

Электрические силовые линии линейного вибратора идут симметрично относительно проводящей плоскости, проведенной перпендикулярно вибратору через его середину (рис. 69). Потенциал в этой точке вибратора

равен нулю. Роль такой проводящей плоскости может играть земля, с которой надо соединить середину вибратора. Тогда нижнюю половину вибратора, обозначенную на рис. 68 и 69 буквами *DK*, можно отбросить; от этого распределение силовых линий в верхней половине вибратора не изменится.

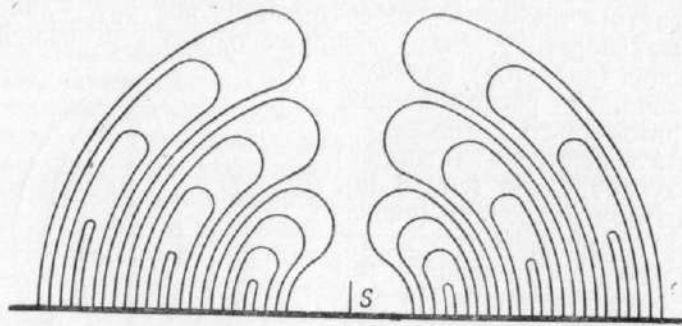


Рис. 70. Электрическое поле заземленного вибратора.

Очевидно, что длина волны, излучаемой соединенным с землей вибратором, выразится формулой

$$\lambda = 4l,$$

где l — длина вибратора.

Таким образом, вибратор заземляют для того, чтобы не делать его очень больших размеров. (При использовании ультракоротких волн необходимости в заземлении нет, так как размеры вибратора и без того невелики.)

Кроме того, заземлением вибратора преследуют еще и другие цели, о которых будет сказано ниже.

Силовые линии электрического поля заземленного вибратора показаны на рис. 70. (Сравните эту картину поля с показанной на рис. 42.)

Однако при длинных волнах уменьшения длины вибратора, достигаемого этим способом, может оказаться недостаточным.

Кроме того, в отдельных случаях (при индуктивной связи излучающего вибратора с контуром генератора) в вибраторе возникают вынужденные колебания, амплитуда которых будет максимальна в случае резонанса

(т. е. когда собственная частота вибратора будет равна частоте генератора). Отсюда — необходимость изменять частоту колебаний в вибраторе, в связи с чем будет изменяться и длина излучаемых вибратором волн. Помимо этого, необходимо изменять частоту колебаний вибратора (настраивать вибратор) для того, чтобы передатчик имел возможность работать на волнах различной длины.

Указанные задачи практически решаются включением в линейный вибратор конденсатора, или катушки самоиндукции, или и того и другого одновременно.

Исследования показали, что включением в вибратор конденсатора можно уменьшить длину испускаемых им волн, а включением катушки самоиндукции — увеличить длину волн.

Кратко остановимся на вопросе о том, почему это так происходит.

Прежде всего заметим, что на первый взгляд может показаться, что длина излучаемой вибратором волны может быть вычислена на основе формулы Томсона: $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Вычислив по этой формуле период колебаний (для этого нужно знать емкость и индуктивность вибратора), а значит, и частоту колебаний, и зная скорость распространения электромагнитных волн (а она известна), из формулы $\lambda = \frac{c}{\nu}$ можем найти длину волны.

Однако это не так. Оказывается, что формулу Томсона к линейному вибратору (без некоторых поправок) применять нельзя. Дело в том, что сила тока в линейном вибраторе в разных участках его различна: посередине она максимальна, а на концах равна нулю. Поэтому вибратор нельзя охарактеризовать индуктивностью, какой он обладает для переменного тока, сила которого одинакова во всех частях вибратора. Ведь именно поэтому в § 16 мы вынуждены были прибегнуть к другому способу вычисления длины волны, излучаемой линейным вибратором.

С другой стороны, в линейном вибраторе заряды тоже распределены неравномерно. Плотность зарядов на концах вибратора максимальна, а посередине равна нулю. Следовательно, линейный вибратор нельзя охарактеризовать емкостью, которой он обладает при равномерной плотности зарядов во всех частях вибратора.

Вывод отсюда ясен: формулу Томсона, строго говоря, нельзя применять к линейному вибратору, не вводя в нее соответствующих поправок.

К замкнутому контуру она применима по следующим соображениям. В линейном вибраторе частота колебаний очень велика (мала емкость и индуктивность вибратора), а длина волны мала и соизмерима с длиной вибратора. В замкнутом контуре частота колебаний меньше (емкость и индуктивность контура значительно больше), а длина волны больше. В замкнутом контуре при относительно малой частоте колебаний можно считать, что сила тока во всех участках цепи в каждый данный момент времени одинакова, как и при постоянном токе (такое распределение тока называют квазистационарным).

Формулу Томсона можно применить и к линейному вибратору, введя в формулу так называемые динамическую емкость и динамическую индуктивность. Они меньше статических и могут быть вычислены по формулам:

$$C_{дин} = \frac{2}{\pi} C_{стат} \quad \text{и} \quad L_{дин} = \frac{2}{\pi} L_{стат}$$

Вывод этих формул выходит за пределы курса математики средней школы, поэтому мы прибегаем к другому пути для того, чтобы показать, как влияют емкость и индуктивность, включенные в цепь линейного вибратора, на длину излучаемой им волны. А именно: применим все же формулу Томсона и к этому контуру, используя только качественную сторону формулы, говорящую о том, что с увеличением емкости или индуктивности контура период колебаний в нем тоже увеличится, а значит, увеличится и длина волны, и наоборот.

То обстоятельство, что динамические емкость и индуктивность несколько меньше статических при такой постановке вопроса, не будет иметь для нас значения.

Последовательное включение конденсатора в линейный вибратор вызывает уменьшение длины волны, излучаемой вибратором. Происходит это потому, что к емкости, которой обладает вибратор, добавляется емкость последовательно с ним соединенного конденсатора. Известно, что при последовательном соединении

конденсаторов общая емкость их меньше емкости каждого из конденсаторов в отдельности. Следовательно, общая емкость уменьшается и период колебаний также уменьшается, частота колебаний увеличивается, а длина волны уменьшается.

Последовательное включение катушки самоиндукции (индуктивности) в линейный вибратор вызывает увеличение длины волны, излучаемой вибратором. Происходит это потому, что к индуктивности, которой обладает вибратор, добавляется индуктивность последовательно с ним соединенной катушки самоиндукции. При последовательном соединении катушек самоиндукции общая индуктивность их равна сумме индуктивностей отдельных катушек (если катушки своими магнитными полями не взаимодействуют друг с другом). В данном случае общая индуктивность увеличивается, увеличивается и период колебаний, частота колебаний уменьшается, а длина волны увеличивается.

Таким образом, включая в линейный вибратор конденсатор переменной емкости и катушку самоиндукции, мы получаем возможность в довольно широких размерах менять длину излучаемой вибратором волны. Конденсатор и катушка включаются или последовательно (рис. 71) для получения волн меньших, чем собственная волна вибратора без конденсатора и катушки самоиндукции, или параллельно (рис. 72) для получения волн больших, чем собственная волна вибратора без катушки и конденсатора.

При включении катушки самоиндукции и конденсатора так, как это показано на рис. 72, вызывает увеличение длины излучаемой волны не только катушка самоиндукции, но и конденсатор, так как этот последний соединен параллельно с емкостью вибратора.

Итак, как указывалось выше, нижняя половина DK вибратора, изображенного на рис. 68, v , может быть отброшена, а верхняя его половина AB — заземлена в точке A . В результате пластина конденсатора, обозначенная на том же рисунке буквой K , окажется заземленной землей, а пластина B конденсатора обычно



Рис. 71. Последовательное включение индуктивности и емкости в вибратор.

выполняется в виде системы проводников, возможно выше подвешенных при помощи изоляторов к мачтам.

Таким образом, мы видим, что линейный вибратор обратился в систему проводников, испускающих волны, длину которых мы можем изменять.

Эта система проводников, представляющая собою сильно излучающий открытый колебательный контур, называется передающей антенной.

В приемном контуре (вibrаторе) также нужна антенна. Оказывается, что хорошо излучающая антенна является и хорошо улавливающей электромагнитные волны, поэтому приемная антенна устраивается так же, как и передающая. Принципиального различия между ними нет. Очень часто антенной называют не весь открытый колебательный контур, а систему проводов (в отдельных случаях — один провод), играющих роль одной обкладки конденсатора. Как уже указывалось, второй обкладкой конденсатора служит земля. Иногда ее заменяют вторым проводом, подвешенным невысоко над землей и изолированным от нее. Такой провод называют противовесом. Обычно противовесом пользуются в тех случаях, когда применяется так называемая внутренняя антенна (антенна, находящаяся внутри помещения) и при передвижных радиостанциях. На самолетах в качестве противовеса используется корпус самолета. На морских и речных судах заземлением служат корпус судна и вода.

Рис. 72. Параллельное включение в вибратор индуктивности и емкости.

Заземление, кроме указанной выше роли (уменьшаются размеры вибратора, земля является второй обкладкой конденсатора), играет еще и другую роль. Заземление служит для предохранения радиоприемников от разрядов атмосферного электричества. Антенна может оказаться наэлектризованной до весьма высокого потенциала не только во время грозы, но и сухим наэлектризованным снегом, а летом пылью и мелким песком, поднятыми ветром. Защита приемника от разряда

осуществляется переключением наружной части антенны от верхнего ее конца до приемника непосредственно на заземляющий провод посредством так называемого грозового переключателя (перекидной рубильник). По понятным причинам необходимо твердо придерживаться правила: заземлять антенну после каждого пользования приемником и, безусловно, во время грозы. Ясно также, что этой защитной роли не выполняет противовес.

Заземление выполняет еще и другую, не менее важную функцию. Подвижные пластины конденсатора переменной емкости (ротор) в приемниках заземляются. Это обстоятельство облегчает настройку приемника, так как человек, подносящий руку к ручке настройки, не изменяет емкости конденсатора, потому что он сам для токов высокой частоты оказывается заземленным.

Электрические колебания возбуждаются или непосредственно в контуре антенны (рис. 72) или в другом контуре, связанном с контуром антенны, в котором он, в свою очередь, вызывает колебания (рис. 73).

На рис. 73 показана так называемая индуктивная связь контуров. Магнитное поле катушки L_1 пересекает катушку L_2 . В контуре II антенны возникают колебания того же периода и частоты, что в контуре I.

Проводники электричества оказывают на электромагнитные волны направляющее действие. Земля является проводником. Поэтому электромагнитные волны (в радиотехнике обычно называемые радиоволнами), идущие от антенны, распространяются вдоль поверхности земного шара, несмотря на ее кривизну. Благодаря этому возможно осуществить связь на Земле с антиподами. Способность огибать Землю сильно выражена у длинных волн (3 000—30 000 м).

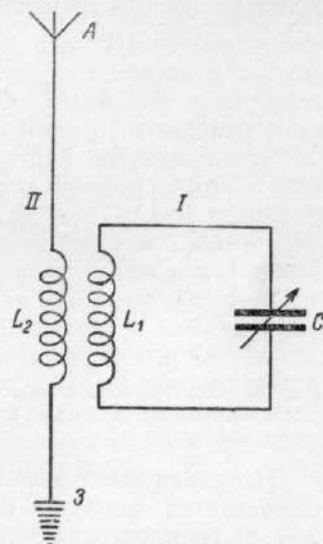


Рис. 73. Индуктивная связь контуров.

На рис. 74 схематично показано распространение электрического поля вдоль земной поверхности, а использованный нами ранее рис. 45 схематично изображает распространение вдоль Земли электрического и магнитного (электромагнитного) полей. Каждый из этих рисунков дает условную картину поля для одного момента времени, так же как и все предыдущие, изображающие распространяющееся поле.

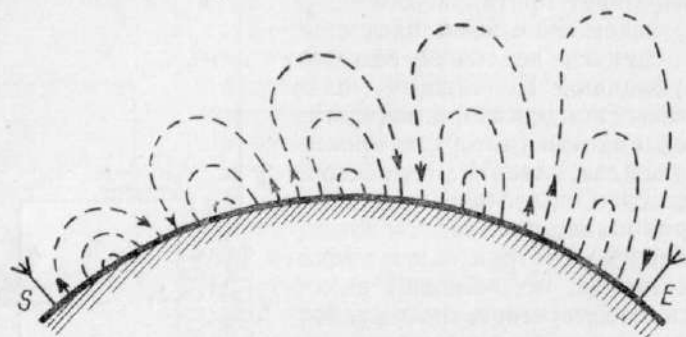


Рис. 74. Электрическое поле, распространяющееся вдоль земной поверхности.

Направляющее действие Земли на короткие волны сказывается меньше, поэтому короткие волны (10—200 м) распространяются не только вдоль поверхности Земли, но и над ней. Эти волны сильно преломляются так называемой ионосферой и потому возвращаются обратно на поверхность земли. (Ионосферой называют ионизированный слой атмосферного воздуха. Ионизация воздуха вызывается разными причинами, в частности—ультрафиолетовыми и космическими лучами. В настоящее время установлено, что ионосфера состоит из нескольких слоев. Высота, толщина и проводимость этих слоев меняются в течение суток и года. Кроме того, обнаружены периодические изменения ионосферы, повторяющиеся через 11 лет, что, очевидно, связано с изменениями деятельности Солнца.) Короткие волны также могут обойти кругом земного шара: отразившись от ионосферы, волна идет к Земле, вновь отражается от ионосферы и снова возвращается к Земле и т. д.

Еще более короткие волны (длина которых меньше 10 м) в состоянии пройти ионосферу насквозь и уйти в межпланетное пространство. Такие волны в радиотехнике используются для связи на небольших расстояниях в пределах прямой видимости, так как эти волны сильно поглощаются местными предметами (зданиями, лесами и т. д.).

Напряженность распространяющегося от антенны электромагнитного поля уменьшается с увеличением расстояния. Это происходит потому, что объем поля по мере удаления от антенны увеличивается, а также и потому, что распространяющееся электромагнитное поле вызывает во встречающихся на его пути проводниках электрические токи, на что расходуется энергия поля.

Происходят потери энергии электромагнитных волн и в диэлектриках. Электромагнитные волны вызывают колебания электронов в молекулах диэлектриков — так называемые токи смещения. В силу указанных причин энергия электромагнитных волн по мере удаления от вибратора уменьшается, уменьшается и максимальное значение периодически изменяющихся напряженностей электрического и магнитного полей. Это обстоятельство ограничивает дальность радиопередач и вызывает необходимость прибегнуть к различным способам усиления колебаний, воспринимаемых приемником.

§ 26. Радиотелеграф.

Вначале радиосвязь осуществлялась путем телеграфирования с помощью азбуки Морзе. Электрические колебания генерировались с помощью колебательного контура с искровым разрядником. Такой контур создает затухающие колебания. В настоящее время такие установки не применяются.

Для более полного понимания дальнейшего сначала кратко рассмотрим устройство и действие искрового радиотелеграфа. Приемная и передающая станции или, как обычно говорят, передатчик и приемник, показаны схематично на рис. 75.

К искровому разряднику в контуре передатчика подводятся по проводам разноименные заряды от индукционной катушки. При каждом проскакивании искры

в контуре передатчика возникают затухающие колебания. Такие же колебания возникают и в контуре антенны A_1 . Ток от индукционной катушки или от альтернатора подается к искровому промежутку с помощью телеграфного ключа или на очень короткое время, что соответствует точке азбуки Морзе, или на несколько более длительный промежуток времени, что соответствует тире той же азбуки. Соответственно этому и

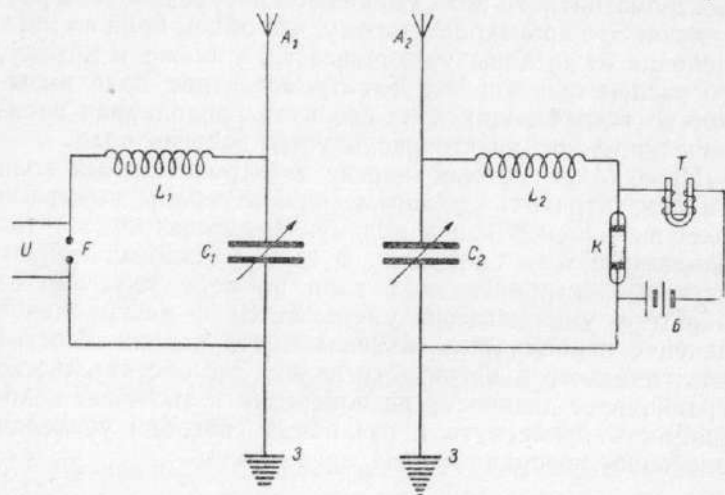


Рис. 75. Искровой передатчик и приемник для радиотелеграфирования.

электромагнитные волны, излучаемые антенной, не непрерывные, а состоят из ряда серий волн разной длительности. Электромагнитные волны, дойдя до антенны A_2 приемника, возбуждают в ней и в контуре L_2C_2 приемника такой же частоты колебания, как и в контуре передатчика, но амплитуда этих колебаний будет меньше, как в связи с тем, что максимальное значение напряженности электрического и магнитного полей уменьшается обратно пропорционально расстоянию от вибратора (см. § 15), так и в связи с теми потерями энергии электромагнитных волн, о которых говорилось в предыдущем параграфе.

Колебания в контуре приемника возникают также сериями, длительность которых соответствует длитель-

ности серии волн, посланных передатчиком. На приемной станции вместо искрового разрядника включен когерер K , последовательно с которым соединен телеграфный аппарат T и батарея аккумуляторов или элементов B . Каждый раз при возбуждении колебаний в контуре приемника через когерер, а значит и через телеграфный аппарат, проходит ток, длительность которого зависит от длительности подошедшей серии волн.

Для того чтобы когерер по окончании серии волн восстановил свое сопротивление и вследствие этого прекратился бы ток в цепи телеграфа, с помощью особого приспособления осуществляется так называемое декогерирование — встряхивание когерера. Таким образом якорь в телеграфном аппарате оказывается притянутым к сердечнику электромагнита только пока антенна приемника воспринимает электромагнитные волны. В итоге, телеграфный аппарат, в зависимости от длительности входящих к приемнику серий электромагнитных волн, записывает на движущейся бумажной ленте точки или тире, сочетания которых дают буквы и слова в той их последовательности, в какой они были посланы передатчиком.

Частота колебаний в передатчике, а значит и длина волны, на которой он работает, регулируется конденсатором переменной емкости в контуре передатчика.

Настройка приемного контура в резонанс с передатчиком осуществляется с помощью конденсатора переменной емкости C_2 в контуре приемника.

В соответствии с тем, что было сказано в предыдущем параграфе, необходимо учесть, что присоединением антенны к контуру передатчика и приемника мы обращаем их в открытые колебательные контуры.

§ 27. Детектирование. Прием телеграфирования на слух. Приемник с кристаллическим детектором.

В ряде случаев представляется более удобным и целесообразным принимать телеграммы, составленные с помощью азбуки Морзе, на слух. Прибором для приема колебаний звуковой частоты (от 16 до 20 000 герц) является известный нам телефон. Но, если в контур приемника, изображенного на рис. 75, вместо когерера

включить телефон, изъав за ненадобностью телеграфный аппарат и батарею элементов, в телефоне никакого звука мы не услышим. Это объясняется тем, что хотя серии волн, доходящих до приемника, а значит и серии колебаний в нем (каждой серии волн будет соответствовать серия колебаний в контуре), и разделены промежутками, но каждая серия состоит из колебаний высокой частоты порядка 10^6 герц, так что мембрана телефона благодаря инерции следовать за ними не может. (Вспомните гальванометр для постоянного тока, включенный в цепь переменного тока — стрелка его стоит на месте, хотя ток через его катушку идет.) Если бы мембрана и следовала за пришедшими колебаниями, наше ухо их не восприняло бы, так как они лежат за пределами звуковой частоты. Следовательно частоту колебаний, приходящих в телефон, надо понизить. Эта задача разрешается с помощью так называемых детекторов.

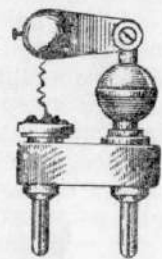


Рис. 76. Кристаллический детектор.

В радиотехнике употребительны два типа детекторов: кристаллический и ламповый. Кристаллы некоторых веществ — свинцового блеска (PbS), пирита (FeS), карборунда (SiC) обладают униполярной (односторонней) проводимостью: хорошо проводят ток только в одном направлении и плохо — в другом. Такой кристалл может быть использован как выпрямитель; будучи включенным в цепь переменного тока, он обратит его в ток одного направления, но изменяющийся по силе. Кристалл (так обычно в радиотехнике называют кусочек мелкокристаллического вещества, состоящий из большого количества кристаллов) смонтирован в металлическую чашечку, присоединяемую посредством одной ножки штепсельной вилки к одному концу цепи переменного тока, а к другому концу цепи присоединяется вторая ножка штепсельной вилки, соединенная с проволокой, свернутой в виде спиральной пружинки, другим концом прикасающейся к кристаллу (рис. 76). Спиральная пружинка закреплена в конце рычажка, поворачивающегося другим концом вокруг шарнира.

При пользовании детектором надо найти так называемую чувствительную точку кристалла, контактируя

конец пружинки с кристаллом в разных его местах.

Детектор D и телефон T , соединенные последовательно, включаются или так, как показано на рис. 77, или составляют отдельную детекторную цепь, индуктивно связанную с контуром антенны, как показано на рис. 78.

Настройка приемников в резонанс с передатчиком производится с помощью конденсатора переменной емкости C .

Рассмотрим первый из приведенных приемников (рис. 77). Когда электромагнитные волны дойдут до антенны A приемника, в контуре LC возникнут электрические колебания — появится переменный ток высокой частоты. Этот ток попадает и в цепь детектора с телефоном, присоединенную к контуру LC параллельно, причем здесь с ним произойдет следующее.

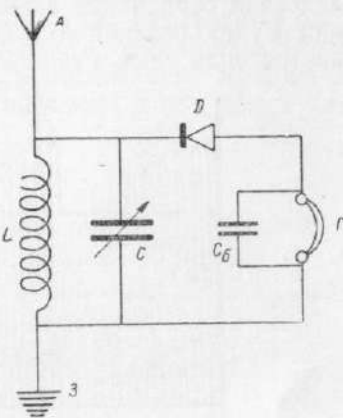


Рис. 77. Приемник с кристаллическим детектором.

Пропуская ток только в одном направлении, детектор обратит высокочастотные колебания тока в импульсы высокой частоты, но одного направления. По обмотке электромагнита пойдет пульсирующий (изменяющийся по силе) ток одного направления. Этот процесс изображен графически на рис. 79. Верхний график на этом

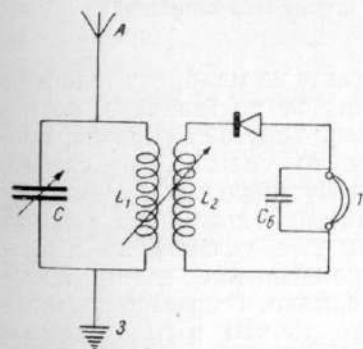


Рис. 78. Индуктивная связь контура антенны с детекторной цепью.

рисунке изображает затухающие колебания в колебательном контуре LC , указанном на рис. 77, а средний — импульсы тока в телефоне. На нижнем графике этого рисунка показаны средние значения силы тока в течение

отдельных импульсов в телефоне. Импульсы тока одного направления, идущие по обмотке электромагнита в телефоне, будут периодически усиливать магнитные действия сердечника электромагнита, но степень усиления будет различной в соответствии с тем, как изменяется сила тока в течение каждого импульса. В связи

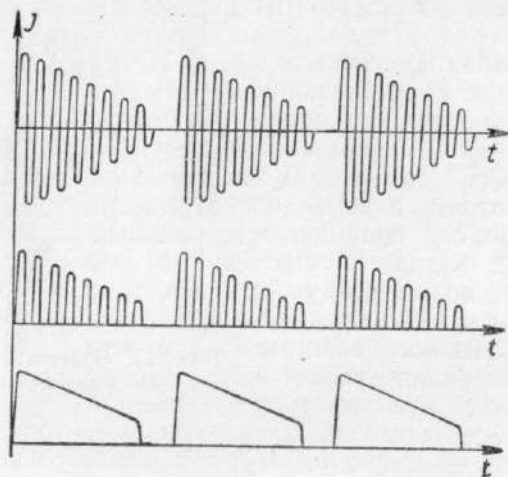


Рис. 79. Детектирование затухающих колебаний.

с этим со стороны электромагнита на мембрану телефона будет действовать изменяющаяся по величине, но постоянная по направлению сила. Упругая мембрана, притягиваясь к электромагниту то сильнее, то слабее, колеблется, издавая звук (немзыкальный). Мембрана звучит все время, пока до антенны приемника доходят электромагнитные волны. Как уже указывалось в предыдущем параграфе, электромагнитные волны посылаются передатчиком не непрерывно, а сериями, длительность которых соответствует точкам и тире азбуки Морзе. В соответствии с этим различна и длительность звучания мембраны телефона. Длительному звучанию соответствует тире азбуки Морзе, короткому — точка.

В приемнике по схеме рис. 78 происходит то же самое. Разница только в том, что колебания, возникающие в контуре L_1C , передаются в детекторную цепь непосредственно, а индуктивно, благодаря тому, что

переменное магнитное поле катушки L_1 пересекает витки катушки L_2 .

В обеих схемах рис. 77 и 78 показано, что к телефону параллельно присоединяется так называемый блокировочный конденсатор C_0 . Емкость этого конденсатора подбирается так, что импульсы постоянного тока через него пройти не могут и все попадают в телефон, а для высокочастотной слагающей детектированного тока путь через него открыт.

Кроме того, блокировочный конденсатор дает некоторое увеличение громкости приема.

Без блокировочного конденсатора переменное напряжение от конденсатора переменной емкости C (рис. 77) в колебательном контуре антенны подается на детектор через телефон. Значительная часть напряжения падает на телефоне, а напряжение, подводимое к детектору (которое им выпрямляется), уменьшается. При наличии блокировочного конденсатора напряжение на детекторе увеличивается, возрастает и громкость.

В радиотехнике в наше время пользуются незатухающими колебаниями. В частности, их применяют и в радиотелефонии. В этом случае прием на слух осуществляется следующим образом.

На верхнем графике рис. 80 изображены незатухающие колебания в антенном контуре приемника, на среднем графике — импульсы тока в телефоне, на нижнем графике показаны средние значения силы тока в течение отдельных импульсов в телефоне. Мы видим, что в отличие от того, что имело место в случае затухающих колебаний, среднее значение силы тока в течение импульса остается постоянным.

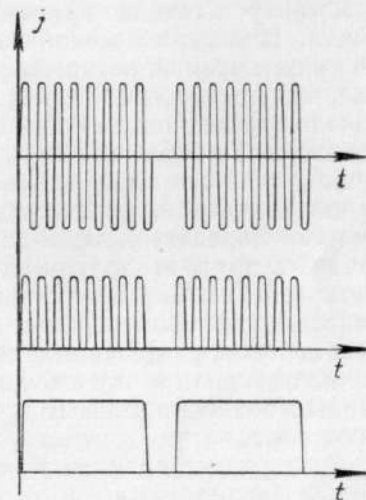


Рис. 80. Детектирование незатухающих колебаний.

Мембрана вследствие инерции не сможет колебаться в такт с каждым импульсом высокой частоты, но так как импульсы все направлены в одну сторону и средние значения силы тока импульсов одинаковы, то электромагнит в телефоне все же притянет мембрану, которая займет некоторое среднее положение относительно магнита.

В момент притягивания мембраны к магниту она издаст звук — щелчок. Мембрана остается притянутой к магниту в течение времени прохождения серии колебаний. В момент же окончания серии мембрана, теперь не притягиваемая, возвращается в свое обычное положение, что опять сопровождается щелчком. Таким образом, начало и конец каждой серии колебаний сопровождается щелчком. Так как они возникают не при каждом колебании, а только при появлении и прекращении целой серии колебаний, продолжительность которых регулируется передатчиком, то оказывается, что щелчки следуют друг за другом со звуковой частотой, различаемой ухом. Длительности серий соответствует длительность промежутков времени между щелчками. Два щелчка, разделенных коротким промежутком времени, означают точку азбуки Морзе, два щелчка, разделенных более длительным промежутком времени, означают тире.

Телеграммы принимаются или на слух, или записываются автоматически особыми приборами.

§ 28. Электронная лампа как детектор.

Электронная лампа сыграла совершенно исключительную роль в деле развития радиотехники. Она применяется в целях генерирования незатухающих колебаний, усиления их, детектирования. Она же используется для обращения переменного тока в постоянный (как говорят — для выпрямления переменного тока). Электронная лампа в наше время получила широкое применение не только в радиотехнике, но и в самых различных областях современной науки и техники.

Существуют электронные лампы различных типов. Здесь мы кратко остановимся на устройстве и принципе действия электронной лампы, называемой двухэлектродной электронной лампой или иначе — диодом.

Двухэлектродная электронная лампа представляет собою стеклянный или металлический баллон, внутри которого помещены два электрода.

Воздух из баллона почти полностью удален. (В зависимости от вещества баллона лампы часто так и называют: стеклянные, металлические. Последние из указанных ламп в наше время получили широкое распространение.) Одним электродом в диоде служит тонкий металлический проводничок (проволока), называемый нитью накала или катодом, другим электродом служит металлическая пластинка (в ряде случаев ей придается форма цилиндра или плоской коробочки, внутри которых помещается нить накала). Этот электрод называют анодом. От электродов делаются выводы наружу. Баллон укрепляется на цоколе, сделанном из изолятора, в котором закреплены штырьки. К ним припаиваются выводы от электродов. Лампа включается в цепь с помощью так называемой ламповой панельки — пластинки из диэлектрика, в которую вмонтированы металлические гнезда. Число гнезд и их расположение соответствуют числу и расположению штырьков на цоколе лампы. Нить накала чаще всего делается из вольфрама, но также и из некоторых других металлов, а анод — из какого-либо трудно окисляющегося металла (никель, молибден и др.). В баллоне лампы создается очень высокий вакуум. Известно, что насосом нельзя откачать воздух полностью из какого-либо сосуда: в нем всегда останется некоторое количество воздуха, поэтому при изготовлении лампы в баллон заранее (еще до откачки насосом) вводят так называемые поглотители (getter). Поглотителями служат щелочные металлы: магний, барий или их сплавы. (Часто поглотители помещают в маленький металлический „карманчик“, припаянный к аноду. Разбив стеклянный баллон пришедшей в негодность электронной лампы, можно увидеть этот „карманчик“. Иногда он виден через стекло баллона.) После откачки воздуха насосом баллон помещают в переменное магнитное поле (поле, созданное переменным током). Возникающие в металлических частях лампы, в том числе и в поглотителе, вихревые токи, нагревают их. Нагревание доводят до такой температуры, при которой поглотитель испаряется. При последующем охлаждении лампы пары поглотителя конденсируются и оседают,

главным образом, на стекле баллона, покрывая стекло тонким налетом. Этот слой металла и поглощает почти полностью остатки воздуха, а также и газы, выделяющиеся из электродов лампы, которые нагреваются во время работы лампы. Магний придает стеклу баллона зеркальный вид, а барий дает налет золотисто-коричневого цвета. Лампы с вольфрамовой нитью накала не имеют геттеров, так как пары вольфрама играют эту роль.

При накаливании катода током скорость хаотического движения свободных электронов нити накала возрастает, в результате чего отдельные из них получают энергию, достаточную для выхода электронов за пределы нити. Явление выделения свободных электронов с поверхности того или иного тела получило название электронной эмиссии. Испускание электронов нагреваемым телом называется термоэлектронной эмиссией.

Количество электронов, выделяемых катодом за каждую секунду, называют током эмиссии, или просто эмиссией, и выражают обычно в миллиамперах. Эмиссия катода возрастает с повышением температуры и с увеличением размеров катода. Кроме того, эмиссия катода сильно зависит от рода металла, из которого сделана нить накала. Для увеличения эмиссии вольфрамовую нить накала активируют различными способами, в частности, нанося на поверхность нити лампы окись бария, стронция, кальция.

Если аноду сообщить положительный потенциал, то под действием сил электрического поля электроны, испускаемые катодом, придут в ориентированное движение по направлению от катода к аноду, образовав внутри лампы ток, который называют анодным током. (Высокий вакуум в баллоне лампы и нужен для того, чтобы молекулы воздуха не мешали двигаться электронам к аноду. Кроме того, наличие воздуха, а значит и кислорода, в баллоне лампы укорачивало бы срок службы нити накала, а вследствие ионизации воздуха летящими в нем электронами возникал бы ионный ток, мешающий нормальной работе лампы.)

Для получения анодного тока в лампе ее включают в электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 81.

На этой схеме буквой *A* обозначен анод лампы, буквой *K* — нить накала. *Бн* — батарея аккумуляторов или

гальванических элементов для накаливания катода. Эту батарею называют батареей накала. Для накала катода маломощных ламп употребляют батареи с э. д. с. порядка нескольких (4—6) вольт. *Ба* — батарея аккумуляторов (небольшой емкости) или гальванических элементов, положительный полюс которой соединяется с анодом лампы, а отрицательный — с нитью накала. Эту батарею называют батареей анода или анодной батареей. Для маломощных ламп употребляют анодные батареи с э. д. с.

порядка нескольких десятков (80—100) вольт. В установке, изображенной на рис. 81, различают две следующих электрических цепи: 1) цепь накала, состоящую из батареи накала, проводов и нити накала и 2) анодную цепь, состоящую из анодной батареи, проводов и пространства внутри лампы между анодом и катодом. Имея в виду электронное направление тока (техническое направление противоположно электронному), можно проследить за путем тока в обеих указанных цепях.

В цепи накала электроны идут от отрицательного полюса батареи накала по проводу к катоду и дальше по другому проводу — к положительному полюсу батареи накала. В анодной цепи электроны идут от отрицательного полюса анодной батареи по проводу к нити накала, от нее внутри лампы от катода к аноду и, наконец, от него по проводу к положительному полюсу батареи анода. (Внутри батареи накала и батареи анода ток представляет собою, как известно, поток ионов.)

Силу анодного тока можно измерить, включив в анодную цепь миллиамперметр. (Сила анодного тока в маломощных лампах порядка десятков миллиампер.) Разность потенциалов между анодом и катодом называют анодным напряжением или напряжением на аноде. Оно может быть измерено вольтметром, включаемым между анодом и катодом (см. рис. 81).

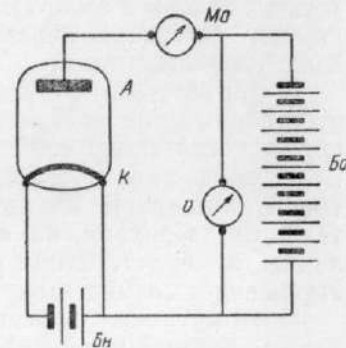


Рис. 81. Схема установки для обнаружения анодного тока в диоде.

Исследования показывают, что сила анодного тока зависит от температуры нити накала (а температура нити накала, в свою очередь, зависит от силы тока накала), а также от напряжения на аноде.

При одной и той же температуре нити накала сила анодного тока возрастает с увеличением напряжения на аноде. Однако наступает такой момент, когда сила анодного тока перестает увеличиваться, несмотря на увеличение напряжения на аноде. Наступает этот момент тогда, когда все вылетающие из катода электроны принимают участие в образовании тока. Такой ток называют током насыщения.

В соответствии со всем сказанным выше, очевидно, что анодный ток появляется в цепи лампы только в том случае, если аноду сообщен положительный потенциал. Если анод имеет отрицательный потенциал, то электроны, вышедшие из нити, сами являющиеся отрицательными зарядами, на анод не попадут. Ток в цепи лампы не будет. Лампа размыкает цепь. (Употребляют выражение: „лампа заперта для тока“.)

Поэтому, если включить между анодом и нитью лампы источник переменного напряжения, например, вторичную (повышающую) обмотку трансформатора, первичная обмотка которого включена в осветительную сеть переменного тока (рис. 82), то в анодной цепи лампы будет течь ток только во время тех полупериодов переменного тока, когда анод лампы получает положительный потенциал.

Электроны во внешней цепи движутся от анода к нити. Имея в виду техническое направление тока, мы должны сказать, что ток в анодной цепи лампы идет вне лампы от нити к аноду. Обмотка II^{δ} трансформатора служит для питания нити накала кенотрона. Правая часть рисунка дает графическое изображение выпрямления тока (без фильтра).

В анодной цепи лампы пойдет ток одного направления, но изменяющийся по силе. Такой ток называют *пульсирующим током*. Электронные лампы, предназначенные для выпрямления переменного тока, называют кенотронами, а выпрямители с такой лампой — кенотронными выпрямителями.

В рассмотренном нами выпрямителе используются полупериоды переменного тока только одного направле-

ния. Такой выпрямитель называют *однополупериодным выпрямителем*. Для того чтобы ток и напряжение в нагрузочном сопротивлении, питаемом выпрямителем, были постоянными, прибегают к так называемому *сглаживающему фильтру*. На рис. 82 Dp , C_1 , C_2 — соответственно дроссель и конденсаторы такого фильтра.

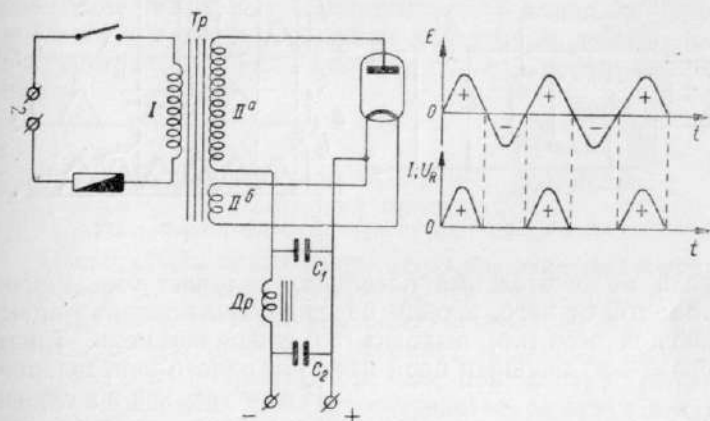


Рис. 82. Схема однополупериодного выпрямителя.

В радиотехнике обычно применяют кенотронные лампы с двумя анодами, что дает возможность использовать оба полупериода (положительный и отрицательный) переменного тока. Выпрямитель в этом случае называют *двухполупериодным*. Схема его показана на рис. 83. Повышающая обмотка трансформатора должна давать напряжение в два раза большее, чем при однополупериодном выпрямлении. Она имеет вывод от средней точки, являющийся отрицательным полюсом выпрямителя.

Нить лампы накаливается переменным током от отдельной обмотки трансформатора (II^{δ} на рис. 83), понижающей напряжение сети до напряжения, нужного для накала нити. Вывод от средней точки этой обмотки (или один из концов нити накала) служит положительным полюсом выпрямителя. (Имеется в виду техническое направление тока.) Аноды кенотрона работают поочередно. В первую половину периода ток идет (имеется в виду электронное направление тока) от того анода,

который имеет положительный потенциал, и дальше, пройдя через одну из половин повышающей обмотки, выходит во внешнюю цепь. Во вторую половину пе-

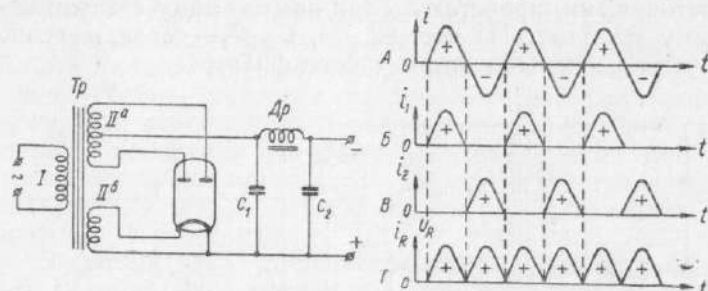


Рис. 83. Схема двухполупериодного выпрямителя.

риода положительный потенциал получает уже другой анод; ток от него, пройдя через другую половину повышающей обмотки, выходит во внешнюю цепь. Таким образом во внешней цепи идет ток одного направления.

И этот ток, как и в случае однополупериодного выпрямления, пульсирующий.

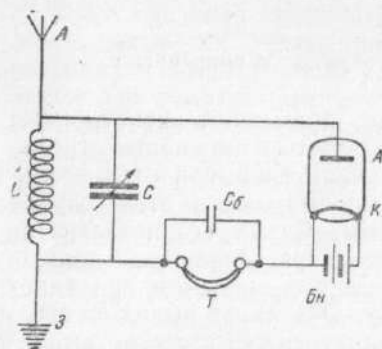


Рис. 84. Приемник с диодом в качестве детектора.

На правой части рис. 83 приведено графическое изображение выпрямления переменного тока таким выпрямителем (без фильтра). D_p , C_1 и C_2 на этом рисунке сглаживающий фильтр, назначение которого такое же, как и в однополупериодном выпрямителе.

Подведем краткие итоги сказанному о двухэлектродной электронной лампе. Двухэлектродная лампа обладает однополярной проводимостью. В связи с этим она может быть использована для выпрямления переменного тока.

Но отсюда вытекает, что двухэлектродная лампа может быть использована в качестве детектора в при-

емном контуре вместо того кристаллического детектора, о котором шла речь в предыдущем параграфе. С этой целью диод может быть включен в детекторную цепь приемника так, как это показано на рис. 84. Приемник с диодным детектором работает совершенно так же, как и приемник с кристаллическим детектором, поэтому все сказанное в предыдущем параграфе о принципе работы приемника с кристаллическим детектором должно быть распространено и на данный приемник с диодным детектором.

§ 29. Электронная лампа как усилитель. Ламповый приемник.

Электронная лампа имеет огромное значение в радиотехнике, в частности потому, что она может быть использована не только для детектирования колебаний, но и для усиления их, что имеет решающее значение для дальности приема, так как при распространении электромагнитных волн в пространстве, амплитуда колебаний напряженности поля уменьшается по мере удаления от передатчика. Для усиления принимаемых колебаний употребляют трехэлектродную лампу (триод).

В триоде, кроме катода и анода, как это имеет место в диоде, имеется третий электрод, который называют управляющей сеткой или просто сеткой. Этот электрод располагается между катодом и анодом и выполняется в виде цилиндрической или плоской спирали из проволоки, окружающей катод (нить накала). Анод же делается из металлического листа, согнутого в форме цилиндра или плоской коробочки, охватывающей нить с сеткой. От сетки делается из лампы вывод наружу. На рис. 85 схематически показано устройство триода и условное обозначение его на схемах.

Электроны, вылетающие из накаливаемой нити, на своем пути к аноду проходят через сетку. Наличие сетки между катодом и анодом дает возможность управлять потоком электронов, движущихся от катода к аноду. Осуществляется эта задача следующим образом. Сообщим сетке положительный потенциал, соединив сетку с положительным полюсом батареи аккумуляторов (или гальванических элементов) B_c , как это указано на рис. 86.

В анодной цепи появится ток, наличие которого обнаружит миллиамперметр M_a . Будем изменять положительный потенциал сетки, присоединяя провод, идущий от нее к батарее сетки B_c так, чтобы включенным

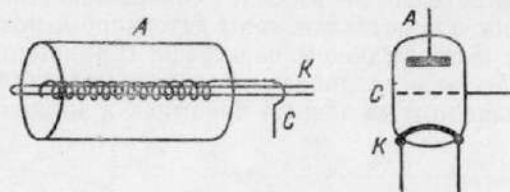


Рис. 85. Трехэлектродная электронная лампа (триод).

в цепь сетки оказывалось различное число аккумуляторов этой батареи. (Например, сначала один аккумулятор, затем два, затем три.) Мы увидим, что по мере увеличения положительного потенциала сетки сила анодного

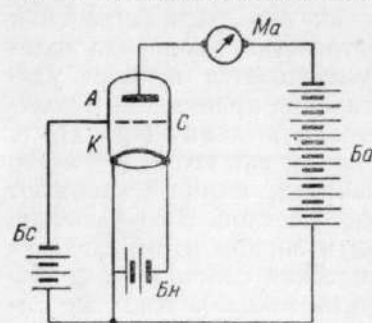


Рис. 86. Схема установки для демонстрации влияния напряжения сетки на анодный ток.

тока будет возрастать. Очевидно, сетка, имеющая положительный потенциал, „помогает“ аноду притягивать электроны, вышедшие из нити. Электроны, движущиеся с большой скоростью, частично попадают на сетку, но большая их часть пролетает сквозь сетку и попадает на анод, создавая анодный ток. Электроны, вылетевшие из катода и попавшие на сетку, дальше идут по проводу к положительному полюсу батареи сетки, а от отрицательного полюса этой батареи электроны идут по проводу к катоду. Эта электрическая цепь называется цепью сетки, а ток, идущий по ней — током сетки. Разность потенциалов между потенциалом сетки и потенциалом катода называют напряжением сетки. При некотором достаточно большом положительном напряжении сетки анодный ток достигает величины тока насыщения: все электроны, вылетающие

из катода (кроме тех, что попадут на сетку), участвуют в образовании анодного тока.

Если сообщить сетке небольшое отрицательное напряжение, то она будет отталкивать электроны, но часть их, под влиянием притяжения со стороны анода, все же будет пролетать сквозь сетку и попадать на анод, создавая анодный ток. Но сила анодного тока в этом случае будет меньше, чем при нулевом потенциале сетки. С увеличением отрицательного потенциала сетки сила анодного тока уменьшается. При некотором достаточно большом отрицательном напряжении сетки анодный ток прекратится вовсе. В таких случаях говорят, что лампа „заперта“.

Таким образом, изменяя напряжение сетки от некоторого отрицательного до некоторого положительного напряжения, мы можем изменять силу анодного тока от нуля до величины тока насыщения. Следовательно: изменения напряжения сетки вызывают изменения силы анодного тока. Но, имея это в виду, важно учесть еще и следующее обстоятельство. Как мы знаем, силу анодного тока можно изменять, изменяя напряжение анода. Оказывается, что вследствие того, что сетка расположена ближе к катоду, чем анод, изменения напряжения сетки вызывают значительно большие изменения анодного тока, чем те, какие могут вызвать изменения напряжения анода. В итоге — очень незначительные изменения напряжения сетки вызывают относительно большие изменения анодного тока.

Это свойство трехэлектродной лампы дает возможность использовать триод в качестве усилителя. С этой целью на цепь сетки триода подается переменное напряжение, подлежащее усилению. В анодной цепи возникает усиленное, тоже переменное напряжение, амплитуда колебаний которого будет значительно больше амплитуды колебаний напряжения сетки.

Роль триода в качестве усилителя может быть проиллюстрирована следующим опытом. Соберем установку по схеме рис. 87. Используя реостат со скользящим контактом в качестве потенциометра, мы сможем сообщить сетке нулевое напряжение (при нахождении движка реостата посередине), а также различную величины положительное напряжение (передвигая движок от середины реостата влево для установки, собранной

по схеме рис. 87) и, наконец, различной величины отрицательное напряжение (передвигая движок от середины реостата направо). Напряжение сетки измеряется вольтметром v_c , включенным между сеткой и катодом. В анодную цепь лампы включено нагрузочное сопротивление R_a (величина его должна быть примерно равна сопротивлению лампы), к концам которого присоединен вольтметр v_a . При прохождении анодного тока по нагрузочному сопротивлению R_a , на нем создается напряжение,

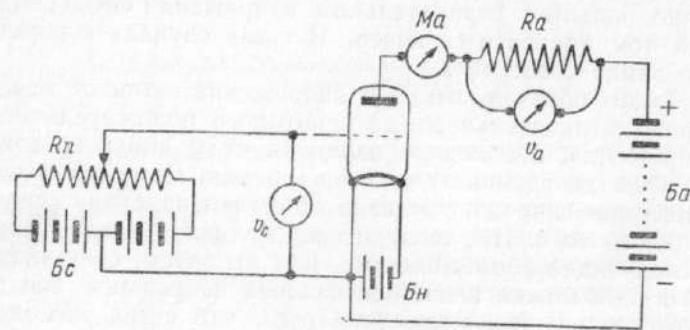


Рис. 87. Триод в качестве усилителя.

о величине которого можно судить по показаниям вольтметра v_a . Сообщим сетке нулевое напряжение. Вольтметр v_a покажет некоторое падение напряжения на нагрузочном сопротивлении R_a . Подадим на сетку отрицательное напряжение. Напряжение на сопротивлении R_a уменьшится, причем уменьшится на величину, большую, чем та, на которую изменилось напряжение сетки. Если увеличить отрицательное напряжение сетки, то напряжение на R_a снова уменьшится и опять на величину, большую, чем изменение напряжения сетки. При дальнейшем увеличении отрицательного напряжения сетки лампа может оказаться „запертой“. Напряжение на нагрузочном сопротивлении окажется равным нулю. При сообщении сетке положительного напряжения на нагрузочном сопротивлении R_a будет получено увеличенное напряжение. Уменьшение и увеличение напряжения на нагрузочном сопротивлении происходит потому, что соответственно при отрицательном напряжении

сетки сила анодного тока уменьшается, а при положительном напряжении сетки — увеличивается. (Напряжение на нагрузочном сопротивлении численно равно произведению силы тока на сопротивление R_a , а это последнее остается постоянным.) При дальнейшем увеличении положительного напряжения сетки напряжение на нагрузочном сопротивлении станет максимальным — анодный ток достигнет значения тока насыщения.

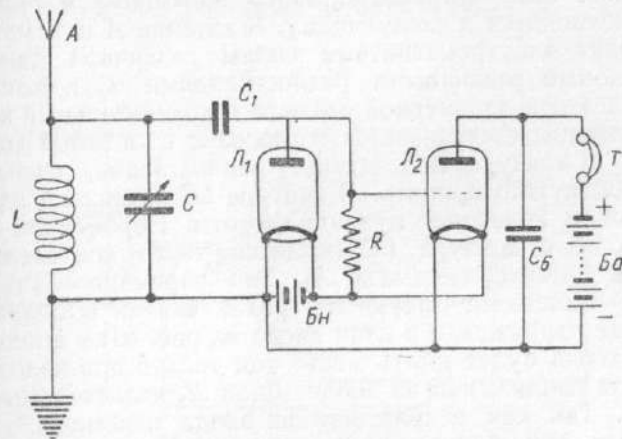


Рис. 88. Схема двухлампового приемника. L_1 — диод в качестве детектора (параллельная схема диодного детектора). L_2 — триод в качестве усилителя.

Энергия тока в анодной цепи значительно больше энергии тока в цепи сетки. Это объясняется тем, что источником энергии в анодной цепи является анодная батарея, а изменения энергии, даваемой анодной батареей, обусловлены изменениями напряжения на сетке.

Таким образом, если напряжение на сетке не изменяется, то и анодный ток остается постоянным, если же на сетку подается переменное напряжение, то сила анодного тока будет изменяться в соответствии с изменениями напряжения на сетке. Иными словами — в анодной цепи будет иметь место пульсирующий ток, а на нагрузочном сопротивлении в анодной цепи будет возникать усиленное переменное напряжение.

В связи со всем сказанным в настоящем и в предыдущем параграфах мы видим, что диод может быть использован в качестве детектора, а триод — в качестве детектора и усилителя.

В соответствии с этим возможны следующие схемы ламповых приемников.

В приемнике по схеме рис. 88 диод L_1 выполняет функцию детектора, а триод L_2 — усилителя. Принципиальная сторона работы такого приемника в общих чертах сводится к следующему. К антенне A приемника подходят электромагнитные волны различной длины, излучаемые различными радиостанциями. С помощью конденсатора переменной емкости C колебательный контур антенны настраивается в резонанс с частотой колебаний в контуре передатчика радиостанции, сигналы которой нужно принять. В контуре LC возникают электрические колебания нужной частоты. Переменное напряжение с контура LC подается через конденсатор в цепь детектора — диода L_1 . Это переменное напряжение выполняет такую же роль, какую выполняло анодное напряжение в цепи диода на рис. 81: в анодной цепи диода будет иметь место ток только при положительном напряжении на аноде. Диод L_1 является детектором. Так как напряжение на аноде переменное, то анодный ток будет пульсирующим. На нагрузочном сопротивлении R возникает переменное напряжение. Это переменное напряжение подается на сетку триода L_2 . Влияние на анодный ток переменного напряжения на сетке триода выше рассмотрено нами достаточно подробно. Телефон T в анодной цепи играет роль нагрузочного сопротивления — на нем появится усиленное переменное напряжение. Появляющийся в анодной цепи пульсирующий ток приводит в движение мембрану телефона так, как об этом было рассказано в § 27. (О назначении блокировочного конденсатора C_6 сказано в том же § 27.) Диод не нуждается в анодной батарее, катод же его, а также и катод триода получают ток от одной и той же батареи накала.

На рис. 89 дана схема приемника, отличающаяся от предыдущего тем, что в нем осуществлена последовательная схема диодного детектора (в предыдущем приемнике — параллельная). Сопротивление R зашунтировано конденсатором C_1 , назначение которого — про-

пускать переменное напряжение от контура антенны к диоду. Работает такой приемник аналогично предыдущему.

На рис. 90 приведена схема приемника, в котором триод использован как детектор и как усилитель. В этом приемнике применен так называемый сеточный детектор. В цепь сетки включено сопротивление R_c (его называют сеточным сопротивлением или сопротивлением утечки) и конденсатор C_c (сеточный конденсатор).

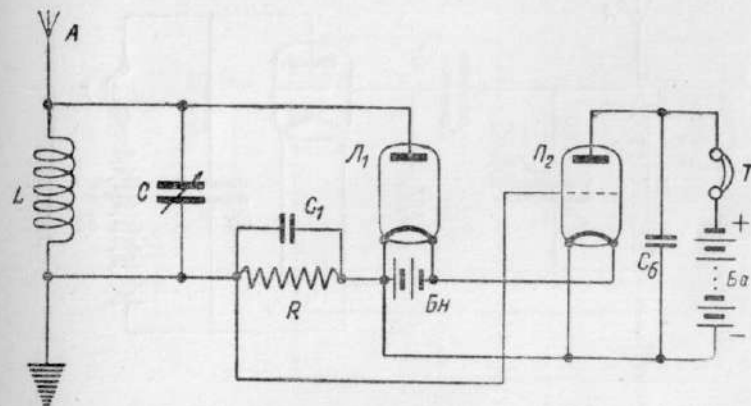


Рис. 89. Схема двухлампового приемника. L_1 — диод в качестве детектора (последовательная схема диодного детектора). L_2 — триод в качестве усилителя.

Электрические колебания, возникающие в контуре антенны LC через сеточный конденсатор C_c подаются в цепь сетки. В цепи сетки и происходит детектирование. Промежуток в лампе между сеткой и катодом выполняет такую же роль, как и промежуток между анодом и катодом в диоде. Электроны в цепи сетки идут от катода к сетке тогда, когда она имеет положительный потенциал. Сетка, таким образом, выполняет роль анода в диоде. В результате, в цепи сетки возникает пульсирующий ток, вследствие чего на сеточном сопротивлении R_c появляется переменное напряжение. Такое же переменное напряжение возникает и на сетке, соединенной с R_c . Переменное напряжение на сетке вызывает пульсирующий ток в анодной цепи. Телефон в анодной цепи является нагрузочным сопротивлением, на

котором возникают усиленные напряжения. В итоге, триод работает как детектор и как усилитель. Дальше все протекает так же, как и в случае приемника с кристаллическим детектором. Конденсатор C_c служит для подачи переменного напряжения от колебательного контура в цепь сетки. Сеточное сопротивление R_c является нагрузочным сопротивлением (на нем происходит падение напряжения). Кроме того, это сопротивление имеет

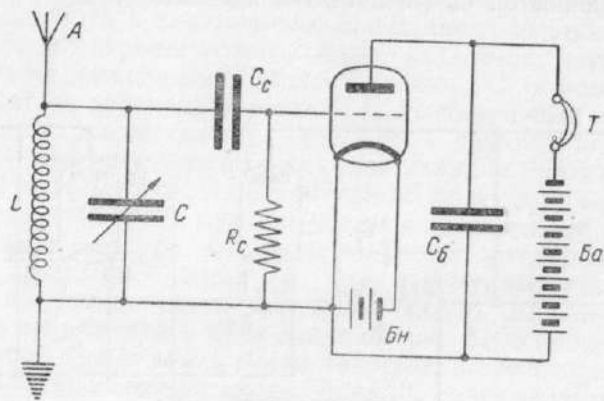


Рис. 90. Схема приемника с триодом в качестве детектора и усилителя.

еще и другое значение. Дело в том, что с колебательного контура LC на сетку лампы подается как положительное, так и отрицательное напряжение. В течение каждого положительного полупериода на сетку лампы поступают электроны, вылетевшие с катода. Если не принять нужных мер, то количество электронов на сетке будет возрастать и в конце концов ее отрицательный потенциал станет таким, что лампа окажется „запертой“ и перестанет работать. При наличии сеточного сопротивления R_c электроны с сетки уходят обратно на катод. Этот поток электронов, идущий от катода к сетке и от нее через сеточное сопротивление R_c снова к катоду, и представляет собою сеточный ток. По этой причине сеточное сопротивление иначе называют сопротивлением утечки или утечкой сетки. (О назначении блокировочного конденсатора было сказано в § 27.)

Как мы видим из сказанного в § 27 и 29, прием телеграфирования на слух может быть осуществлен как на приемник с кристаллическим детектором, так и на ламповый приемник.

Общее в работе кристаллического детектора и лампы в том, что они оба детектируют колебания, но лампа, кроме того, еще и усиливает пришедшие колебания. Но есть еще и другое существеннейшее отличие. Мембрана в приемнике с кристаллическим детектором ко-

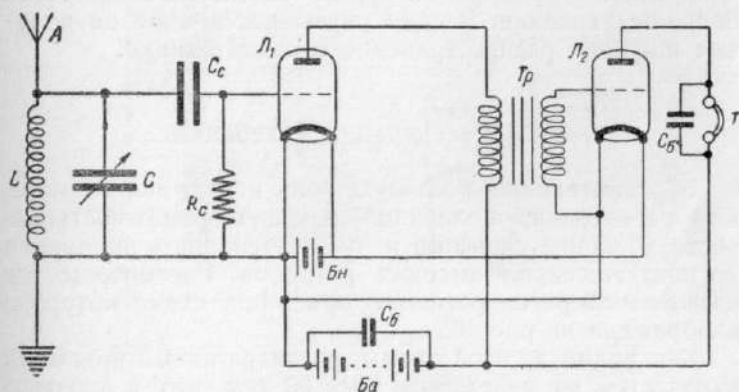


Рис. 91. Схема приемника с трансформаторным усилителем.

леблется за счет энергии, полученной от передатчика, энергия же, нужная для возбуждения телефона в ламповом приемнике, доставляется анодной батареей. В результате применения усилительной лампы, напряжения на зажимах телефона становятся значительно больше, чем в том случае, когда сигнал поступает непосредственно в телефон; возрастает и мощность тока, поступающего в телефон. Если этого усиления еще недостаточно, то тогда в анодную цепь лампы включают первичную обмотку трансформатора, вторичную обмотку которого включают в контур сетки второй усилительной лампы, а телефон включают в ее анодную цепь. Таким путем осуществляют многократное усиление, что дает возможность принимать сигналы очень далеко расположенного передатчика.

Схема приемника, в котором применен так называемый трансформаторный усилитель, приведена на рис. 91.

В анодную цепь лампы L_1 включена первичная обмотка повышающего трансформатора Tr . Эта обмотка выполняет назначение нагрузочного сопротивления — на ней возникает переменное напряжение. Во вторичной обмотке трансформатора появляется повышенное переменное напряжение, которое подается на сетку лампы L_2 . Переменное напряжение на сетке лампы L_2 вызовет еще более усиленное напряжение в анодной цепи этой лампы.

В итоге — трансформаторный усилитель может дать большое усиление. В силу указанных причин он получил широкое распространение в радиотехнике.

§ 30. Регенерация колебаний.

В радиотехнике большую роль играет так называемая регенерация колебаний, дающая возможность довести усиление сигналов и чувствительность приемника до исключительно высоких размеров. Рассмотрим так называемый регенеративный приемник, схема которого изображена на рис. 92.

Как видно из этой схемы, регенеративный приемник отличается от приемника рис. 90 тем, что в анодную цепь регенератора включена катушка самоиндукции L_1 , называемая катушкой обратной связи, индуктивно связанная к катушкой L контура антенны. Колебания антенного контура подаются на сетку лампы; изменения напряжения на сетке вызовут большие изменения силы тока в анодной цепи. Усиленные пульсации анодного тока через индуктивно связанные катушки L_1 и L вызовут усиление колебаний в цепи сетки. Колебания напряжения на сетке возрастут, в результате чего в анодной цепи возникнут еще более сильные импульсы. Они снова вызовут усиление колебаний в цепи сетки, что еще больше увеличит импульсы анодного тока и так далее. Этот процесс усиления продолжается до тех пор, пока сила анодного тока достигнет предела, определяемого накалом нити и напряжением анода.

В итоге — усиление, даваемое регенератором, может быть очень большим. Существенно заметить, что в процессе работы регенератора происходит передача энергии из анодной цепи в цепь сетки.

Во время работы регенеративный приемник при неумелом пользовании сам может излучать электромагнитные волны, мешая нормальной работе других приемников, чего допускать нельзя. Этому недостатка регенератора можно избежать, введя в него ступень усиления высокой частоты. (Так называют усиление колебаний в приемнике до детектирования их. В этом

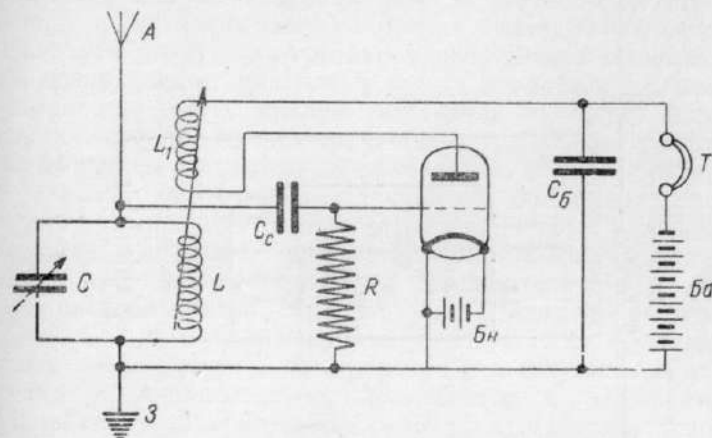


Рис. 92. Схема регенеративного приемника.

случае колебания, возникающие в детекторе, не попадут в антенный контур.) Кроме того, регенеративный приемник имеет еще и некоторые другие недостатки. В частности, затруднительна настройка его на нужную станцию. Поэтому современная радиотехника в области усиления радиосигналов в приемниках идет преимущественно другими путями, в частности, теми, о которых говорилось в § 29.

В параграфе 26 и 27 мы познакомились с принципами приема радиотелеграфирования на слух. Все рассмотренные нами после этих параграфов приемники могут быть использованы для приема радиogramм как в том случае, когда в передатчике генерируются затухающие колебания, так и в случае передатчика, являющегося генератором незатухающих колебаний. В настоящее время в радиотелеграфии используются передатчики именно этого последнего типа.

§ 31. Ламповый генератор незатухающих колебаний.

Замечательные свойства электронной лампы не исчерпываются уже сказанным о ней. Оказывается, что лампа может быть использована для генерирования незатухающих колебаний высокой частоты. Рассмотрим

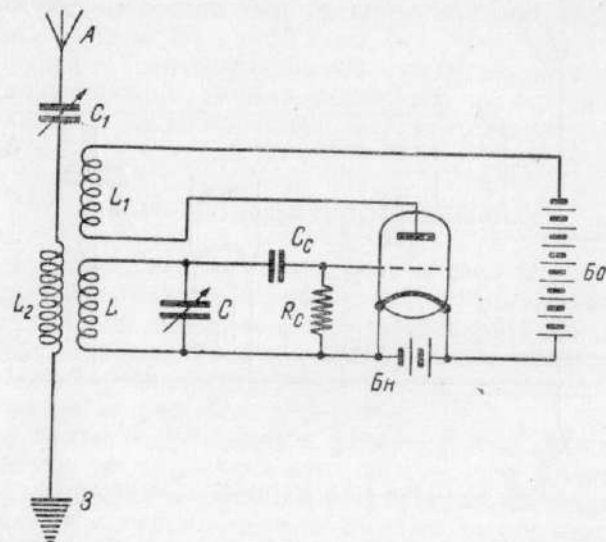


Рис. 93. Ламповый генератор незатухающих колебаний.

схему передатчика¹, в которой трехэлектродная электронная лампа использована для получения незатухающих электрических колебаний (рис. 93).

В цепи сетки триода мы видим колебательный контур, состоящий из катушки самоиндукции L и конденсатора переменной емкости C , а также конденсатор C_c и сеточное сопротивление R_c , назначение которых мы установили, рассматривая принцип действия приемников по схеме рис. 90 и 91. Кроме того, в анодную цепь триода включена катушка L_1 , индуктивно связанная с катушкой сетки L . Эту катушку называют катушкой обратной связи.

¹ Обоснования выбору этой схемы генератора приведены в методических указаниях после § 33.

Катушка L индуктивно связана с катушкой L_2 антенны, которая представляет собою открытый колебательный контур.

В этом контуре последовательно с катушкой самоиндукции включен конденсатор переменной емкости C_1 . Допустим, что в контуре сетки LC тем или иным образом возбуждены электрические колебания. В этом контуре, как и во всяком другом, неизбежны потери энергии, благодаря чему колебания будут затухающими. Если эти потери полностью и непрерывно возмещать, то возникающие колебания будут продолжаться неопределенно долго, причем амплитуда их будет постоянной, как это происходило бы в идеальном контуре, не имеющем активного сопротивления. Лампа обратится в генератор незатухающих колебаний. Это и имеет место в рассматриваемом нами генераторе. Первые колебания в контуре возникают при первом толчке тока в анодной цепи: при включении анодной батареи или при включении батареи накала. Этот импульс в анодной цепи вызывает э. д. с. самоиндукции в катушке L_1 , благодаря чему возникает э. д. с. индукции и в катушке L в цепи сетки и, следовательно, конденсатор C заряжается. Происходит колебательный разряд конденсатора: в контуре сетки возникают первые электрические колебания. При этом на сетку лампы подается переменное напряжение. В связи с этим усилятся импульсы тока в анодной цепи, что, в свою очередь, вызывает усиление колебаний в цепи сетки и т. д. Это усиление колебаний продолжается до некоторой максимальной амплитуды, определяемой свойствами лампы.

Связь между цепью сетки и анодной цепью, осуществляемой с помощью катушек L и L_1 , называют обратной связью. Благодаря наличию обратной связи, неизбежные потери энергии в контуре сетки LC непрерывно восполняются энергией, поступающей в контур сетки из анодной цепи, источником энергии в которой является анодная батарея. В итоге, в контуре сетки LC возникают незатухающие колебания. Кратко описанный нами процесс, в результате которого колебания поддерживаются незатухающими, называют самовозбуждением. Триод в приемнике по схеме рис. 90 усиливает колебания, принятые им извне. Триод в рассматриваемом нами генераторе незатухающих

колебаний, как видим, усиливает свои собственные колебания.

Колебательный контур LC сетки индуктивно связан с открытым колебательным контуром антенны L_2C_1 . (В передатчике, схема которого дана на рис. 93, осуществлена индуктивная связь контуров. Возможны и другие способы связи этих контуров.) В контуре L_2C_1 антенны возникают такой же частоты колебания, как и в контуре сетки LC . Частота колебаний в контуре сетки регулируется конденсатором переменной емкости C , а контур антенны настраивается в резонанс с контуром сетки с помощью конденсатора переменной емкости C_1 . От антенны передатчика распространяются электромагнитные волны.

В колебательном контуре антенны тоже неизбежны потери энергии. Они обусловлены, во-первых, активным сопротивлением контура. Но кроме того, убыль энергии в контуре антенны происходит, во-вторых, потому, что излучаемые антенной электромагнитные волны уносят с собою энергию (см. § 17). Мы уже отмечали, что для открытого колебательного контура в этом одна из основных причин затухания колебаний (см. § 18). В данном же случае затухания колебаний в контуре антенны не происходит вследствие того, что убыль энергии в нем непрерывно восполняется энергией, поступающей в контур антенны из контура сетки, так как оба указанных контура связаны друг с другом посредством катушек L_2 и L . В итоге, и в контуре антенны колебания оказываются незатухающими.

Таким образом, в работе генератора незатухающих колебаний могут быть обнаружены следующие этапы перехода энергии.

Энергия в контур антенны поступает из контура сетки. Убыль энергии в этом последнем непрерывно восполняется энергией, поступающей из анодной цепи, а источником энергии в этой цепи является анодная батарея. Отсюда вытекает, что в ламповом генераторе происходит преобразование энергии постоянного тока анодной батареи в энергию электрических колебаний (в энергию тока высокой частоты).

В § 27 мы указывали, что радиотелеграфирование в настоящее время осуществляется с помощью незатухающих колебаний. И в этом случае, так же как и при

работе искрового передатчика, электромагнитные волны с помощью телеграфного ключа посылаются не непрерывно, а сериями разной длительности. Детектирование и связанное с ним понижение частоты до звуковой уже было нами рассмотрено (§ 27). Прием телеграфирования на слух осуществляется и в настоящее время. В большинстве же случаев применяется запись принимаемых сигналов по азбуке Морзе на телеграфную ленту.

§ 32. Модуляция колебаний. Радиотелефония.

До сих пор мы рассматривали принципы радиотелеграфии — передачи условных сигналов посредством посылки передатчиком серии электромагнитных волн разной длительности (соответственно точкам и тире в азбуке Морзе), которые на приемной станции принимаются, например, на слух, „расшифровываются“, в результате чего из сочетаний точек и тире получаются буквы, из них — слова и наконец — фразы, той радиogramмы, которую послал передатчик.

Применение электронной лампы в качестве генератора незатухающих колебаний дало возможность использовать радиосвязь не только для целей радиотелеграфирования (условными сигналами), но и для целей радиотелефонии — передачи звуков: человеческого голоса, музыки. Осуществить такую передачу с помощью незатухающих колебаний нельзя. (О причинах будет сказано дальше.) Каким же образом можно „передать“ звук с помощью радиоволн. В общем виде схема передачи звука может быть изображена следующим образом.

Для передачи звука нужно каким-либо способом воздействовать колебаниями звуковой частоты на колебания высокой частоты в передатчике, внося в них изменения, соответствующие этим звукам. Таким образом электромагнитные колебания высокой частоты, создаваемые передатчиком, должны „перенести“ на себе звуковые колебания, вследствие чего эти колебания высокой частоты называют несущими колебаниями. В радиоприемнике эти измененные колебания должны быть преобразованы в колебания низкой (звуковой) частоты, которые, преобразуясь в механические колебания мембраны в телефоне (или в громкоговорителе),

воспроизведут звуки, действовавшие на колебания высокой частоты в передатчике.

Процесс изменения колебаний высокой частоты передатчика в соответствии с передаваемыми колебаниями звуковой частоты называется модуляцией.

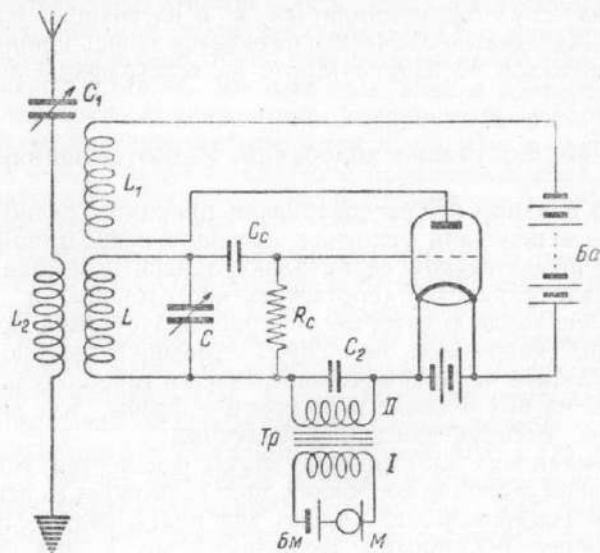


Рис. 94. Схема передатчика для радиотелефонии.

Изменения, которые вносятся в колебания передатчика, могут касаться или амплитуды колебаний (амплитудная модуляция), или их частоты (частотная модуляция).

В настоящее время с этой целью чаще всего прибегают к изменению амплитуды колебаний передатчика, поэтому на амплитудной модуляции мы главным образом и остановимся.

Изменение амплитуды колебаний передатчика осуществляется с помощью микрофона, принцип устройства и действия которого известен. На рис. 94 изображена одна из возможных принципиальных схем включения микрофона в передатчик.

В цепь сетки генераторной лампы включается вторичная обмотка микрофонного трансформатора T_p , шун-

тированная конденсатором C_2 ; в первичную обмотку трансформатора включен микрофон M и батарея гальванических элементов или аккумуляторов B_m . Пока микрофон не включен, в телефоне приемника никаких звуков слышно не будет, так как в обмотку электромагнита телефона будут поступать импульсы хотя и одного направления (пришедшие колебания будут детектированы), но высокочастотные. Если микрофон включен и в него попадают звуки, то мембрана микрофона колеблется, вызывая изменения силы тока в первичной обмотке трансформатора, которые индуктируют во вторичной обмотке трансформатора и на сетке лампы переменные напряжения. Каждая звуковая волна, упавшая на мембрану микрофона, вызовет одно колебание мембраны. В течение одной половины периода колебания мембраны она, надавливая на угольные зерна в микрофоне, уменьшит сопротивление микрофона, вследствие чего сила тока в первичной обмотке трансформатора увеличится, а в течение второй половины периода мембрана уменьшит давление на угольные зерна, сопротивление микрофона возрастет, а сила тока в первичной обмотке трансформатора уменьшится. При увеличении силы тока в первичной обмотке трансформатора э. д. с. индукции во вторичной обмотке трансформатора будет иметь одно направление, а при уменьшении силы тока в первичной обмотке — противоположное. В соответствии с этим в течение одной половины периода колебания мембраны микрофона на сетку лампы будет подаваться положительное напряжение, а в течение другой половины периода сетка получит отрицательное напряжение. Так как мембрана колеблется с звуковой частотой, то и напряжение, подаваемое на сетку лампы, меняется с такой же частотой. В итоге, на сетку лампы, кроме переменного напряжения высокой частоты от колебательного контура LC , подается также переменное напряжение звуковой частоты от вторичной обмотки микрофонного трансформатора. Вследствие этого амплитуда колебаний в колебательном контуре LC передатчика (а значит и в контуре L_2C_1 антенны) изменяется: в течение положительного полупериода переменного напряжения звуковой частоты, поданного на сетку лампы, амплитуда колебаний высокой частоты увеличивается, а в течение отрицательного полупериода — уменьшается.

Такое изменение амплитуды колебаний высокой частоты в передатчике происходит при каждом одном колебании мембраны микрофона. Мембрана же микрофона совершает одно колебание при каждой звуковой волне, попавшей в микрофон.

Таким образом, — амплитуда колебаний высокой частоты в передатчике изменяется со звуковой частотой и в строгом соответствии с теми звуковыми колебаниями, которые восприняты микрофоном.

Колебания высокой частоты, амплитуда которых изменяется со звуковой частотой, называются модулированными колебаниями.

В соответствии со всем сказанным, в передатчике вместо незатухающих колебаний, амплитуда которых не изменяется (рис. 95, б), получаются колебания, амплитуда которых изменяется в соответствии с звуковыми колебаниями, попавшими в микрофон (рис. 95, в). На рис. 95, а показано колебание звуковой частоты, вызывающее модуляцию (модулирующее колебание). Время, в течение которого происходит каждое изменение амплитуды колебаний высокой частоты, и частота этих изменений соответствуют периоду и частоте звуковых колебаний, воспринятых микрофоном. В антенне приемника, когда до нее дойдут электромагнитные волны от передатчика, возникнут совершенно такого же характера, но с меньшей амплитудой, колебания, как и модулированные колебания (рис. 96, а) в антенне передатчика. Детектор приемника (ламповый или кристаллический) обратит модулированные колебания в пульсации тока одного направления, изменения амплитуды которых будут происходить (рис. 96, б) со звуковой частотой.

Рис. 95. Модуляция незатухающих колебаний: а) колебание звуковой частоты, б) колебание высокой частоты, в) модулированные колебания.

Частота колебаний мембраны телефона будет такой же, как частота колебаний мембраны микрофона, по-

этому мембрана телефона воспроизведет те звуки, которые действовали на микрофон передатчика.

Так осуществляется передача звуков: голоса, музыки.

Осуществить радиотелефонию с помощью затухающих колебаний нельзя, так как амплитуда этих колебаний уменьшается, а поэтому изменения в амплитуде колебаний, вызванные модуляцией, были бы расстроены изменениями амплитуды в связи с затуханием.

Мы рассмотрели принцип амплитудной модуляции. Она обладает некоторыми недостатками, в частности, — затруднена борьба с различными помехами (атмосферные разряды, излучение электрических установок), которые тоже вызывают изменение амплитуды принимаемых модулированных колебаний высокой частоты.

В настоящее время в радиотехнике начинают применять частотную модуляцию.¹ При так называемой частотной модуляции изменяется не амплитуда колебаний высокой частоты в передатчике, а частота колебаний. Осуществляется такое изменение частоты с помощью особой модуляторной лампы, на сетку которой подается переменное напряжение от микрофонного трансформатора. В течение одного полупериода переменного напряжения частота колебаний в передатчике сначала увеличивается, затем возвращается к первоначальному значению, а в течение другого полупериода сначала уменьшается, а затем снова принимает первоначальное значение. График частотной модуляции изображен на рис. 97. В верхней части рисунка показано колебание звуковой частоты, вызывающее модуляцию.

В радиоприемниках с помощью особого так называемого частотного детектора модулированные колебания преобразовываются в колебания звуковой частоты.

¹ См. статью И. П. Жеребцова в журнале «Физика в школе», 1953, № 4, стр. 82.

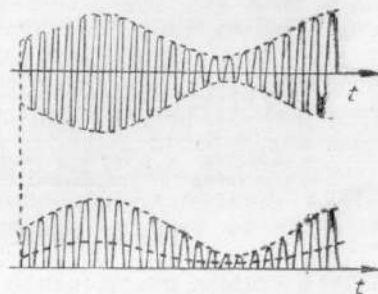


Рис. 96. Детектирование модулированных колебаний.

Частотная модуляция применяется в передатчиках, работающих на ультракоротких волнах. Качество вещания при частотной модуляции выше, так как уменьшается вредное влияние помех.

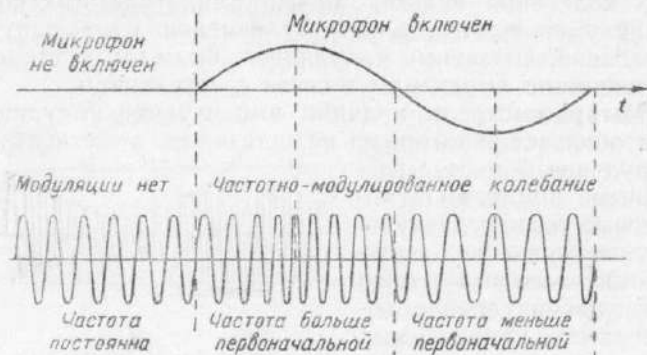


Рис. 97. Частотная модуляция.

§ 33. Радиолокация.

В предыдущих параграфах мы познакомились с историей открытия и исследования электромагнитного поля, с физическими основами радиопередачи. Из огромного количества вопросов, связанных с применениями электрических колебаний в современной технике и в науке, мы кратко рассмотрим только один — радиолокацию.

Радиолокацией называют определение местоположения отдаленных предметов с помощью радиоволн.¹

В основе радиолокации лежит отражение радиоволн от предметов, встречающихся на пути их распространения.

В 1897 г. А. С. Попов, производя опыты по радиосвязи между кораблями Балтийского флота „Европа“ и „Африка“, обнаружил, что радиосвязь между кораблями нарушалась, если между ними оказывался третий

¹ Слово радиолокация происходит от латинских слов radius — луч и locus — место.

корабль. Уже тогда А. С. Попов указал на возможность использования радиоволн для определения местоположения тех или иных объектов, а также для целей радионавигации.

Однако практическое применение радиоволн в радиолокационных целях оказалось возможным много позже, в связи с достижениями в области использования коротких и ультракоротких волн.

Основная задача, решаемая радиолокацией, состоит в обнаружении объекта и в определении его местоположения. Установка, предназначенная для этой цели, получила название радиолокационной станции или радиолокатора (иногда ее называют радаром).

Как уже указывалось, обнаружение объекта основано на отражении радиоволн. В наибольшей мере радиоволны отражаются от хороших проводников электричества, в меньшей мере — от других тел.

Для определения местоположения объекта нужно прежде всего знать расстояние до него от наблюдателя.

В самых общих чертах обнаружение объекта и определение расстояния до него осуществляется следующим образом.

Радиолокационная станция имеет радиопередатчик и радиоприемник. Передатчик станции в течение очень короткого промежутка времени (например, в течение одной микросекунды, т. е. 10^{-6} сек.) излучает электромагнитные волны, после чего он выключается на относительно длительный промежуток времени (например, на тысячу микросекунд, т. е. на 10^{-3} сек.). В это время испущенные передатчиком радиоволны доходят до объекта, отражаются от него и частично возвращаются к радиолокационной станции. Затем снова включается передатчик, к объекту направляется новый импульс, снова происходит отражение волн и частичное возвращение к станции и т. д. Приемник радиолокационной станции воспринимает прямой импульс, посланный передатчиком, а также отраженный от объекта. Отраженный от объекта импульс воспринимается приемником позже прямого импульса с разницей на то время, в течение которого радиоволны прошли путь до объекта и обратно. Этот промежуток времени, исчисляемый микросекундами, может быть измерен. Зная скорость распростра-

нения радиоволн в воздухе, можно определить расстояние до объекта.

В этом состоит принципиальная сторона решения указанной задачи.

Остановимся на некоторых специфичных особенностях устройства и работы радиолокационной станции.

1. В радиолокационных станциях применяются так называемые антенны направленного действия, излучающие электромагнитные волны в виде узкого пучка. Употребляются антенны разного типа, в зависимости от длины волны, на которой ведется работа. Некоторые из антенн устраиваются в виде параболических отражателей. Такая антенна представляет собою металлический отражатель („зеркало“), имеющий форму параболоида, в фокусе которого помещен небольшой линейный вибратор. Электромагнитные волны, испускаемые вибратором, после отражения от поверхности параболоида идут узким направленным пучком. Во время поиска объекта антенна с помощью механизма вращения поворачивается аналогично тому, как это делается с прожектором.

2. Радиолокационные станции работают на ультракоротких волнах. Основными причинами, вызывающими необходимость использовать именно такие волны, являются следующие. По понятным соображениям необходимо, чтобы передатчик радиолокационной станции посылал мощный импульс. В § 17 было установлено, что энергия электромагнитных волн прямо пропорциональна частоте колебаний. С увеличением же частоты колебаний уменьшается длина волны. Отсюда — для мощного излучения нужны возможно более короткие волны.

Другая причина, заставляющая прибегать к ультракоротким волнам, связана с размерами антенны.

Для создания узкого пучка электромагнитных волн необходимо, чтобы длина волны была мала по сравнению с размерами отражателя (антенны). В соответствии с условиями работы радиолокаторов отражатели не должны быть большими. С другой стороны, длина линейного вибратора равна половине длины излучаемой волны (см. § 16). Чтобы отражатель был небольшим, вибратор должен быть малых размеров. В соответствии с этим излучаемые им волны будут небольшой длины.

Третья причина в следующем. Радиоволны лучше отражаются от предметов, размеры которых велики по сравнению с длиной волны. Радиолокаторы должны обнаруживать небольших размеров предметы, например, самолет. Значит, излучаемые радиолокатором волны должны быть как можно короче.

По этим причинам радиолокационные станции работают на метровых (около 1 метра), дециметровых и сантиметровых волнах.

3. Выше мы кратко рассмотрели принцип работы импульсного радиолокатора. Импульсное излучение необходимо для того, чтобы можно было определить промежуток времени между началом прямого импульса и началом отраженного. Кроме того, импульсное излучение дает возможность сосредоточить в импульсе большую энергию при относительно небольшой мощности установки. Дело в том, что источник, питающий радиолокатор, работает непрерывно, а импульсы радиолокатора посылает с перерывами, причем длительность перерывов больше длительности импульса.



Рис. 98. Экран электроннолучевой трубки индикатора радиолокационной станции.

4. Определение расстояния от радиолокатора до объекта производится с помощью электроннолучевой трубки, рассмотренной нами в § 10. Одновременно с посылкой импульса на пластины P_x трубки подается пилообразное напряжение, вызывающее горизонтальное перемещение светящегося пятнышка по экрану трубки. Посылаемый прямой импульс в этот же момент времени подается на пластины P_y трубки, вследствие чего на экране трубки в начале горизонтальной линии получается так называемый всплеск (левый — на рис. 98).

Отраженный импульс, поступивший в радиоприемник радиолокационной станции, подается на пластины P_y трубки, что вызывает отклонение светящегося пятнышка в вертикальном направлении: появляется второй всплеск

(правый — на рис. 98) на некотором расстоянии от первого. Можно знать скорость равномерного движения пятнышка по горизонтали, а значит, и промежуток времени, протекший между первым и вторым всплеском. В течение этого промежутка времени радиоволны прошли путь от радиолокатора до объекта и обратно. Можно было бы на экран трубки нанести горизонтальную шкалу в единицах времени, а затем уже вычислять расстояние до объекта. Вместо этого на шкалу сразу наносятся соответствующие этим промежуткам времени расстояния до объекта. Наблюдатель получает возможность, не производя вычислений, сразу определять расстояние до объекта.

5. При импульсном излучении во время пауз радиолокационная станция работает только на прием. В связи с этим для передатчика и для приемника используется одна и та же антенна, переключаемая попеременно на передачу и на прием специальным безинерционным устройством.

6. По понятным причинам, энергия, приносимая отраженными от объекта радиоволнами, очень незначительна. Поэтому на радиолокаторе должен быть приемник очень высокой чувствительности.

Радиолокация находит применение в военном деле, в воздушной и морской навигации, при слепом полете и слепой посадке самолетов и во многих других случаях.

На самолетах и морских кораблях радиолокаторы используются для предупреждения об опасности столкновения с другим самолетом или кораблем, со скалой, айсбергом.

Велико значение радиолокации и в научно-исследовательской работе. Так, в 1946 г. с помощью радиолокатора было измерено расстояние от Земли до Луны, причем с большей точностью, чем это можно сделать путем астрономических измерений.

Советские ученые впервые использовали радиолокаторы для наблюдения за метеорами.

С помощью радиолокаторов удается следить и за полетами шаров-зондов, посылаемых для изучения атмосфер на большой высоте.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.

§ 23. Знакомство с физическими основами радиопередачи надо начать с рассмотрения приемника изобретателя радио А. С. Попова. Если с когерером учащиеся еще не знакомы (см. § 19), то о нем следует рассказать теперь. Существенно обратить внимание учащихся на роль реле в приемнике А. С. Попова.

Очень желательно собрать и продемонстрировать действующую модель приемника А. С. Попова. Вибратором может служить искровой разрядник, питаемый индукционной катушкой Румкорфа. В первичную обмотку катушки можно включить телеграфный ключ, или рубильник. Для изготовления когерера могут быть использованы опилки от серебряной монеты.

При наличии такой установки тут же на уроке может быть передана и принята радиограмма.

Сведения о работах А. С. Попова даны в книге очень кратко, так как на уроке нехватит времени на скольконибудь подробное освещение биографии ученого. Восполнить этот пробел можно на внеклассных занятиях. Тем не менее и на уроке надо кратко, но убедительно показать значение изобретения А. С. Попова. Чертеж схемы приемника А. С. Попова следует сделать заранее. (О чертежах — см. методические указания к § 15.)

§ 24. Как правило, учащихся всегда интересует вопрос о том, почему замкнутый контур излучает слабо, а открытый — сильно. Ответ на этот вопрос может быть найден в § 24. В учебный план темы он не входит и может быть использован на внеклассных занятиях.

§ 25. В учебный план темы и этот параграф не входит, но он содержит ряд существенных и полезных напоминаний учителю. Важно учесть соображения, высказанные в тексте параграфа относительно применения формулы Томсона к открытому контуру.

Очень часто со стороны учащихся возникает вопрос о том, почему включение емкости или индуктивности в контур антенны изменяет длину волны, излучаемой вибратором. В тексте этого параграфа указано, как можно, не вдаваясь в рассмотрение вопроса о динамической емкости и динамической индуктивности, достаточно убедительно показать, почему это так происходит.

Опыт работы с учащимися свидетельствует также о том, что с их стороны всегда возникают вопросы — почему колебательный контур заземляется, как распространяются радиоволны. (Ответы на эти вопросы можно также найти в § 25.)

Материал этого параграфа особенно ценен для внеклассной работы.

§ 26. В настоящее время искровые передатчики не употребляются. В связи с этим может быть осуществлена такая система построения материала темы, при которой, после рассмотрения вопросов о возбуждении электрических колебаний в замкнутом искровом контуре, об электромагнитном поле и электромагнитных волнах, сразу рассматривается устройство и принцип действия лампового приемника и прием телеграфирования на слух.

Опыт работы в школе свидетельствует, что изложение этой темы нужного эффекта в отношении экономии времени не дает.

С другой стороны, изложение принципов радиотелеграфирования в соответствии с историческим ходом развития этой отрасли техники, при постепенном и последовательном накоплении у учащихся тех знаний, которые нужны для понимания дальнейшего, дает положительный результат.

Времени тратится не больше, чем в первом случае, а знания учащихся оказываются значительно более осознанными, бессмысленная зубрежка отпадает.

В связи с указанными соображениями изучение радиопередачи целесообразно начать с искрового радиотелеграфа.

Изложение устройства и принципа действия искрового радиотелеграфа базируется на пройденном и, с другой стороны, дает возможность обоснованно и логично перейти к рассмотрению последующих вопросов — детектирование, прием на слух.

Такая система построения материала соответствует основному методическому требованию, в соответствии с которым изучение материала осуществляется путем перехода от простого к более сложному. В связи с тем, что контур искрового передатчика почти полностью воспроизводит „классический“ контур, на базе которого рассматривался процесс возбуждения электрических колебаний, а контур приемника усложнен немного, идея,

лежащая в основе радиотелеграфа, должна быть вполне ясна учащимся.

В силу этих причин, при изложении данного вопроса учителем и последующих ответах учащихся, схема радиотелеграфа может быть легко выполнена на классной доске как учителем, так и учащимися.

§ 27. Соображения, высказанные в методических указаниях к § 26 о преимуществах изложения темы в историческом аспекте остаются в силе и для этого параграфа, а также и для всех последующих. По содержанию фактического материала параграфа и по его изложению могут быть сделаны следующие замечания.

Рассказывая учащимся о кристаллическом детекторе, необходимо показать хотя бы один из них.

Схема приемника на рис. 77 в радиотехнике называется простой. Именно поэтому она и выбрана. Основная задача изучения данной темы в средней школе — познакомить учащихся с физическими основами радиопередачи. Поэтому входить в рассмотрение деталей (которых, кстати сказать, в этой теме особенно много) нет необходимости, да и возможности.

Назначение блокировочного конденсатора в приемнике на уроке можно не рассматривать. Объяснение назначения его в книге дано для учителя. На классной схеме приемника его можно не указывать. Для усвоения материала § 27 учащиеся должны быть хорошо знакомы с устройством и действием телефона, чего учащиеся X класса иногда не знают. Надо своевременно заставить учащихся дома повторить этот материал VII класса.

В настоящее время радиотелеграфирование осуществляется с помощью незатухающих колебаний. Поскольку в этой части темы до сих пор речь шла о затухающих колебаниях, представляется целесообразным рассмотреть сначала радиотелеграфирование на затухающих колебаниях, а затем уже — на незатухающих.

При телеграфировании на незатухающих колебаниях так, как об этом рассказано в § 27, щелчки в телефоне приемника плохо прослушиваются. В связи с этим в настоящее время незатухающие колебания модулируют (не голосом, а прибором, дающим частоту порядка 1000 герц, наиболее хорошо воспринимаемых ухом). Естественно, что рассказывать об этом нет возможности,

так как для усвоения этих деталей учащиеся еще не имеют нужных знаний, а кроме того, это выходит за пределы средней школы. Рассказав об устройстве и принципе работы приемника с кристаллическим детектором, следует показать учащимся такой приемник, а еще лучше тут же собрать его из готовых деталей.

§ 28. Устройство электронной лампы (диола) должно быть уже известно учащимся. Поэтому фактически из этого параграфа на данном уроке необходимо кратко рассмотреть применение диода в качестве детектора в радиоприемнике.

Рассказывая об электронных лампах, следует показать учащимся как целые лампы, так и с разбитым стеклянным баллоном.

Если раньше опыт, демонстрирующий появление анодного тока, не был показан, то его следует показать теперь. С этой целью можно воспользоваться любым кенотроном, соединив его два анода вместе. Если под руками не окажется кенотрона, то можно взять триод, соединив его сетку с анодом.

Установка может быть собрана по схеме рис. 81. В цепь накала кенотрона следует включить реостат, а в анодную цепь — демонстрационный гальванометр. Анодная батарея должна быть такой, чтобы на анод можно было подавать напряжение до 100—120 вольт.

Пользуясь такой установкой, можно легко показать (качественно) зависимость анодного тока от температуры нити накала (изменяя реостатом силу тока в цепи накала) и зависимость анодного тока от напряжения на аноде (изменяя потенциал его). Дав аноду отрицательный потенциал, увидим, что анодный ток прекратится. Лампа будет „заперта“. Если нужной анодной батареи не найдется, то можно воспользоваться любым кенотронным выпрямителем. В методическом отношении этот путь менее удачен, так как устройство и действие такого выпрямителя учащимся еще не известно.

В последнем варианте установки напряжение от выпрямителя на анод лампы удобно подавать с помощью потенциометра. В качестве последнего можно использовать достаточно большого сопротивления реостат с подвижным контактом. Схема установки дана на рис. 99. Клеммы реостата должны быть подключены к выводным клеммам выпрямителя. Передвигая движок потенцио-

метра, можно подать на анод различной величины напряжение.

Усвоение принципа действия приемника с диодным детектором не должно вызвать затруднений у учащихся.

§ 29. Материал этого параграфа при недостатке времени может быть дан учащимся в сокращенном варианте. Следует кратко рассказать об устройстве триода. Усилительное действие его может быть пояснено опытом по схеме рис. 87. Из приведенных в тексте этого

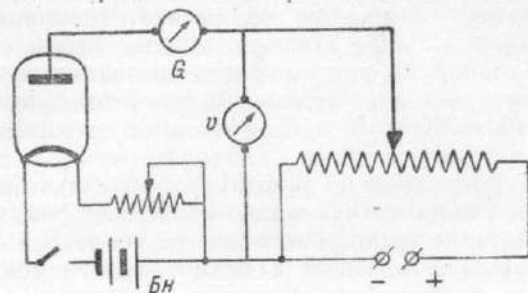


Рис. 99. Схема установки для демонстрации зависимости анодного тока от температуры нити накала и от напряжения на аноде.

параграфа схем диодных детекторов — параллельной (рис. 88) и последовательной (рис. 89) — можно использовать одну. В схеме рис. 88 показан конденсатор C_1 (емкость его 100—200 μF). Он необходим для пропускания высокочастотной составляющей анодного тока. Постоянная и низкочастотная составляющие не проходят через конденсатор (он не пропускает постоянный ток и оказывает большое сопротивление току низкой частоты). Они проходят через нагрузочное сопротивление R . Говорить об этом учащимся не представляется возможным, так как в этом случае пришлось бы рассказывать о том, что всякий пульсирующий ток содержит постоянную и переменную составляющие.

Конденсатор C_1 в схеме рис. 89 не только пропускает переменное напряжение от контура антенны на диод, но и служит для сглаживания пульсаций напряжения на сопротивлении R (порядка 0,1—0,5 мегома) и повышения напряжения на нем. Об этом также нет возможности рассказать на уроке.

Схема приемника на рис. 90 может быть опущена. Возможен и другой вариант: можно рассказать только о приемнике по схеме рис. 90, в котором триод использован и как детектор, и как усилитель, не рассматривая приемники по схеме рис. 88 и 89. В этом случае существенно не забыть указать учащимся, что телефон в анодной цепи триода играет роль нагрузочного сопротивления. Все предыдущее изложение материала § 28 и 29 должно обеспечить осознанное восприятие учащимися основ работы такого лампового приемника. Конденсатор C_c в приемнике рис. 90 включен в цепь сетки для пропуска одной из составляющих сеточного тока — составляющей высокой частоты. Емкость конденсатора C_c порядка 100—200 μF , а R_c — от одного до нескольких мегомов.

Схема приемника по рис. 91 может быть опущена, но сказать учащимся буквально несколько фраз о принципе действия трансформаторного усилителя крайне полезно. Идея, лежащая в основе такого усилителя, учащимся должна быть вполне понятна.

§ 30. Материал данного параграфа в учебный план темы не входит. Помещен он для учителя. С идеей регенерации учащихся следует познакомить при рассмотрении генератора незатухающих колебаний. Регенеративный приемник при работе сам может обратиться в генератор, излучающий электромагнитные волны. Излучение происходит в том случае, если катушка обратной связи поставлена слишком близко к катушке контура, т. е. если обратная связь доведена до значения большего чем то, которое соответствует „порогу генерации“. При умелой установке величины обратной связи, т. е. до „порога генерации“, в катушке контура индуктируется добавочная э. д. с., которая компенсирует частично потери в контуре; при этом происходит усиление приема без излучения. При режиме работы за „порогом генерации“ нормальный прием нарушается. Происходят искажения. При повороте катушки на 180° получается отрицательная обратная связь, т. е. осуществляется не усиление, а ослабление. Излучение регенератора, создавая помехи, мешает нормальной работе других приемников, даже находящихся и на значительном расстоянии от регенератора. Ясно, что создание помех, нарушающих радиовещание, недопустимо. Поэтому целе-

сообразно осуществить усиление радиосигналов не регенерацией, а другими способами, в частности теми, о которых идет речь в § 29.

В тексте § 30 упомянутое включение в регенератор каскада усиленной высокой частоты, строго говоря, излишне, так как регенератор сам дает достаточное усиление. Однако этот прием может помочь избежать излучения, так как в этом случае возникающие колебания в детекторе не попадут в антенну. Но, тем не менее, в связи с тем, что опасность создания помех не исключена (возможно применение регенератора без ступени усиления высокой частоты), не следует давать учащимся схему регенеративного приемника. Если она окажется известной отдельным учащимся, учитель может и должен добиться, чтобы учащиеся не только поняли недопустимость помех радиовещанию, но и сами бы активно боролись с ними.

§ 31. С основами работы генератора незатухающих колебаний учащиеся должны быть ознакомлены. Поэтому § 31 включен в учебный план темы.

В книге приведена схема генератора с самовозбуждением и с индуктивной обратной связью, имеющей колебательный контур в цепи управляющей сетки, а не в цепи анода. В настоящее время такая схема применяется в маломощных генераторах для работы на метровых и более коротких волнах. Выбор этой схемы обусловлен следующими соображениями. Генераторы с посторонним возбуждением сложны и недоступны для понимания учащихся. Более трудными для них оказываются и генераторы с индуктивной обратной связью, имеющие колебательный контур в цепи анода. Использованный же в книге генератор с колебательным контуром в цепи сетки наиболее прост для усвоения учащимися, так как контур в цепи сетки генератора аналогичен контуру в цепи сетки рассмотренного уже ими приемника по схеме рис. 90. В связи с недостатком времени на изучение программного материала, это обстоятельство надо учитывать. Кроме того, для ознакомления учащихся с основами работы генератора незатухающих колебаний, в соответствии с целями, преследуемыми средней школой, изложенное в § 31 будет достаточным. Осмысленно владея ими, те учащиеся, которые изберут радиотехнику своей специальностью,

относительно легко и осознанно разберутся в принципе работы и более распространенных и вместе с тем более сложных генераторов.

При изложении материала § 31 следует продемонстрировать генератор незатухающих колебаний и некоторые опыты с ним. В ряде номеров журнала „Физика в школе“ (начиная с № 2 за 1948 г.) имеются статьи, описывающие самодельные ламповые генераторы высокой частоты с приемным контуром к нему, индикатором принимаемых колебаний в котором служит лампочка накаливания. Генератор и приемник монтируются на вертикальных угловых панелях и доступны для обозрения. В том же журнале имеется и ряд статей, посвященных технике и методике эксперимента по теме „Электромагнитные колебания и волны“.

При наличии такого генератора, после изложения учащимися материала настоящего параграфа, очень уместно кратко разъяснить принципиальную схему генератора и приемника, продемонстрировать некоторые опыты с ним. В частности, следует, воспользовавшись имеющимися на панели приемного контура гнездами для детектора и телефона, продемонстрировать прием „радиотелеграфирования“ на слух. Пользуясь самодельным ламповым генератором, можно показать и часть тех опытов, которые мы упоминали в § 8, говоря о трансформаторе Тесла. Тем не менее, так как трансформатор Тесла очень нагляден, чрезвычайно близок к контуру, на базе которого учащиеся получают первое ознакомление с электрическими колебаниями, отказываться от показа этого трансформатора и некоторых опытов с ним не следует.

При изложении материала § 31 нужно обратить внимание учащихся на переход энергии из анодной цепи в контур сетки, а из него — в контур антенны.

§ 32. Этот параграф входит в учебный план темы.

О частотной модуляции на уроке можно не рассказывать. Принципиальная сторона амплитудной модуляции, как показывает опыт работы с учащимися X класса, для них доступна.

Излагая этот вопрос, необходимо обратить внимание на уяснение назначения микрофонного трансформатора. Далеко не сразу учащиеся понимают, почему сетка получает со вторичной обмотки трансформатора то поло-

жительный, то отрицательный потенциал. В случае необходимости по этому поводу можно сказать учащимся следующее. Под действием звуковых волн мембрана микрофона колеблется, надавливая на угольные зерна в микрофоне. В связи с этим изменяется сила тока в первичной обмотке трансформатора, вследствие чего во вторичной обмотке возникает индукционный ток. При усилении тока в первичной обмотке ток во вторичной обмотке имеет одно направление, а при уменьшении силы тока в первичной обмотке направление индукционного тока во вторичной обмотке меняется на противоположное. В соответствии с этим меняется и знак потенциала, подаваемого на сетку лампы.

Устройство и действие угольного микрофона изучалось учащимися в VII классе. Знания эти необходимы для усвоения принципа работы передатчика. В связи с этим, к уроку, на котором будет рассматриваться данный параграф, полезно задать учащимся повторить дома указанный материал.

§ 33. Общие представления о радиолокации должны быть у учащихся, поэтому § 33 входит в учебный план темы.

Импульсный метод определения расстояния до объекта избран потому, что он наиболее широко распространен и более доступен учащимся, нежели фазометрический метод.

В содержание данного параграфа включены основы радиолокации, физическая сущность которых вполне доступна учащимся, так как она связана со многими уже разобранными и рассмотренными вопросами темы.

Определение угловых координат объекта, а также многие технические вопросы, связанные с устройством и работой радиолокационных станций, в содержание § 33 не включены, так как они недоступны учащимся и выходят за пределы общеобразовательного курса физики.

В случае недостатка времени имеющиеся в § 33 сведения о специфических особенностях устройства и действия радиолокаторов могут быть сокращены.

Рассмотрение других технических применений электромагнитных волн (кроме радиолокации), как, например, телемеханика, телевидение, в программу школьной

физики не входят. Вследствие ограниченного объема настоящей книги эти вопросы пришлось опустить и здесь. С другой стороны, к таким достижениям техники, как телемеханика, телевидение и многие другие, учащиеся проявляют повышенный интерес. Этот интерес необходимо удовлетворить в порядке внеклассной работы. На материал § 29, 31, 32, 33 примерным учебным планом отводится 3 часа учебного времени. На изучение § 29 и 31 можно отвести 1 час и на § 32 и 33 по 1 часу на каждый параграф.

ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ УЧИТЕЛЯ.

1. Л. Д. Гольдштейн. Электромагнитные колебания и волны.
 2. Г. В. Войшвилло. Общий курс радиотехники. Воениздат, 1950.
 3. В. А. Котельников и А. М. Николаев. Основы радиотехники, 1950.
 4. И. П. Жеребцов. Радиотехника. Связьиздат, 1953.
 5. А. М. Бройде. Радиотехнические устройства. Госэнергоиздат, 1949.
 6. Ч. И. Чистяков. Радиоприем и работа радиоприемника. Воениздат, 1951.
 7. В. И. Шаров. Радиотехника. 1934, Л., КУБУЧ, 1935.
 8. Элементарный учебник физики, под редакцией акад. Ландсберга, том III. ГИТТЛ, 1952.
 9. М. Марков. Радио наших дней. Госкультпросветиздат, 1948.
 10. В. И. Шамшур, А. С. Попов и советская радиотехника. Воениздат, 1952.
 11. В. И. Брелев. Пути развития радиолокации. Стенограмма публичной лекции. Всесоюзное об-во по распротр. политических и научных знаний. Ленинград, 1948.
 12. Г. И. Бабат. Индукционный нагрев металла и его промышленное применение. М.—Л., Госэнергоиздат, 1946.
 13. К. Глазков. Телевидение. Детиздат, 1954.
 14. Журнал „Физика в школе“, 1938—1954.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
Введение	3
Примерный учебный план темы	10
Глава I. Электрические колебания.	
1. Искровой разряд	11
2. Конденсатор в цепи тока	14
3. Катушка самоиндукции в цепи тока	20
4. Электрические колебания	30
5. Механическая аналогия электрических колебаний с пружинным маятником	35
6. Затухающие и незатухающие колебания	38
7. Колебательный контур и возбуждение в нем колебаний	39
8. Высокочастотный переменный ток и его свойства	40
9. Свободные и вынужденные колебания. Настройка контура	46
10. Электронный осциллограф (электроннолучевая трубка)	49
Методические указания	52
Глава II. Электромагнитное поле.	
11. Линейный вибратор	73
12. Электромагнитное поле	74
13. Электромагнитные колебания	76
14. Связь между электрическим и магнитным полями	—
15. Электромагнитные волны	81
16. Длина электромагнитной волны и размеры вибратора	88
17. Материальность электромагнитного поля. Энергия поля	90
18. Причины затухания колебаний в вибраторе	92
Методические указания	93
Глава III. Опытное исследование электромагнитных волн.	
19. Экспериментальное обнаружение электромагнитных волн	100
20. Тожественность электромагнитных и световых волн	103
Глава IV. Электрический резонанс.	
21. Настройка контуров в резонанс	109
22. Опытное обнаружение резонанса	110
Методические указания	115

Стр.

Глава V. Физические основы радиосвязи.

23. Изобретение радио А. С. Поповым	120
24. Типы колебательных контуров	123
25. Назначение антенны. Распространение радиоволн	125
26. Радиотелеграф	133
27. Детектирование. Прием телеграфирования на слух	135
Приемник с кристаллическим детектором	140
28. Электронная лампа как детектор	147
29. Электронная лампа как усилитель. Ламповый приемник	156
30. Регенерация колебаний	158
31. Ламповый генератор незатухающих колебаний	161
32. Модуляция колебаний. Радиотелефония	166
33. Радиолокация	171
Методические указания	171
Литература для учителя	181

К. Н. Елизаров. Электромагнитные
колебания и волны в курсе физики средней
школы

Редактор И. В. Барковский.
Техн. редактор А. А. Кириарская
Корректор Р. К. Паэгле

Сдано в набор 31/V 1954 г. Подписано
к печати 24/VIII 1954 г. 84×108^{1/2} мм.
Печ. л. 11,5 (9,43). Уч.-изд. л. 9,18.
Тираж 40 000. М-44711.

Ленинградское отделение Учпедгиза.
Ленинград, Невский пр., 28. Заказ № 711.

Типография „Красный Печатник“.
Ленинград, проспект имени И. В. Сталина, 91.

Цена 3 руб.