

МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

С. Э. ХАЙКИН

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Выпуск 325

С. Э. ХАЙКИН

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
КОЛЕБАНИЯ
И ВОЛНЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А., Ванеев В. И.,
Геништа Е. Н., Джигит И. С., Канаева А. М., Кренкель Э. Т.,
Куликовский А. А., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

В книге подробно рассматриваются возникновение и распространение электромагнитных волн в пространстве и электрические колебания в контурах и линиях применительно к тем конкретным условиям, в которых эти явления протекают в процессах радиопередачи и радиоприема.

Книга предназначена для читателей, владеющих элементарными знаниями по физике и математике, и может служить для них введением в изучение физических основ радиотехники.

Хайкин Семен Эммануилович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Редактор *И. П. Жерзбцов*

Техн. редактор *Г. И. Матвеев*

Слано в пр-во 11/XII 1958 г.

Подписано к печати 10/II 1959 г.

Бумага 84×108¹/₂

13,6 п. л.

Уч.-изд. л. 14,6

T-02804

Тираж 40 000 экз.

Цена 6 р. 85 к.

Зак 1548

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Процесс передачи и приема сигналов по радио состоит из цепи физических явлений, правильное понимание которых необходимо для овладения основами радиотехники. Эти явления можно разделить на две группы: те, которые лежат в основе процессов излучения, распространения и приема радиоволн, и те, которые связаны с процессами возбуждения электрических колебаний, их усиления, модуляции и детектирования. Настоящая книга посвящена изложению только первой группы этих явлений. Явления второй группы в ней лишь затрагиваются там, где это необходимо, но не рассматриваются по существу.

Такое разделение оказывается возможным и целесообразным потому, что две упомянутые группы явлений не очень тесно связаны между собой и для понимания первой группы явлений требуется не детальное знакомство с явлениями второй группы, а лишь общие сведения о них в том объеме, которыми владеет каждый радиолюбитель. Несколько более высокие требования предъявляет настоящая книга к подготовке читателя в области физики, не только в смысле определенного объема формальных знаний, но и особенно в отношении навыков в чтении популярной физической литературы, рассматривающей сложные по существу физические вопросы.

В книге рассматриваются только сами физические явления, а не методы их практического применения для целей передачи и приема радиосигналов. Предполагается, что с этой стороны вопроса читатель более или менее знаком.

Рассматриваемыми в книге явлениями, конечно, далеко не исчерпываются все процессы, которые играют роль в радиопередаче и радиоприеме.

К тому же и рассмотренные в книге явления описываются применительно к конкретной обстановке, отнюдь не охватывающей всех случаев, встречающихся в процессах радиопередачи и радиоприема. Например, в книге совсем не освещаются специфические особенности электромагнитных колебаний и волн в области сверхвысоких частот (распространение радиоволн в волноводах, антенны сверхвысоких частот и т. п.).

Поэтому читатель не найдет в книге прямого объяснения многих физических явлений, с которыми приходится сталкиваться в радиотехнике, но этого и не может дать книга ограниченного объема. В книге изложены только основные физические явления, наиболее важные не с точки зрения их практического применения, а с точки зрения их значения для понимания всех вообще процессов, используемых в радиотехнике.

Как ясно из сказанного, настоящая книга не может служить пособием к непосредственной практической деятельности радиолюбителя. Цель ее иная — помочь радиолюбителю разобраться в сущности тех физических явлений, с которыми ему приходится сталкиваться в своей практической деятельности. И если этой цели книга достигнет, автор будет считать свою задачу выполненной.

С. Хайкин

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	7

Глава первая

Распространение электромагнитной энергии

1. Электрическое поле	9
2. Проводники в электрическом поле	13
3. Сопротивление проводников	19
4. Электродвижущие силы	23
5. Магнитное поле	29
6. Связь между электрическим и магнитным полями	32
7. Электромагнитные волны	36
8. Гармонические волны	43
9. Электромагнитный спектр	50
10. Электромагнитные волны в длинных линиях	54
11. Передача электромагнитной энергии по проводам	64
12. Излучение электромагнитных волн	69
13. Прием электромагнитных волн	77

Глава вторая

Емкость и индуктивность

14. Электрическая емкость	82
15. Емкостное сопротивление	88
16. Диэлектрики в электрическом поле	93
17. Изменение емкости	99
18. Самоиндукция	102
19. Индуктивное сопротивление	113
20. Взаимная индукция	119
21. Намагничивающиеся тела	122
22. Изменение индуктивности	129

Глава третья

Электрические колебания

23. Собственные колебания	133
24. Вынужденные колебания	142
25. Резонанс	149
26. Процессы установления в колебательном контуре	159
27. Действие несинусоидальной э. д. с. на колебательный контур	167
28. Параллельный резонанс	176

29. Электрические колебания в связанных контурах	182
30. Стоячие электромагнитные волны	189
31. Резонанс в отрезках длинных линий	198

Глава четвертая

Передача и прием радиоволн

32. Радиосигналы	218
33. Антенны	220
34. Распространение радиоволн вблизи поверхности земли . . .	232
35. Распространение радиоволн в ионосфере	243

ВВЕДЕНИЕ

В цепи физических явлений, которые лежат в основе процесса передачи и приема сигналов по радио, центральное место занимает распространение электромагнитной энергии на значительные расстояния без помощи проводов. Передача на значительные расстояния электромагнитной энергии (и, в частности, электрических сигналов) при помощи проводов представляется на первый взгляд гораздо более доступной пониманию, чем передача без помощи проводов. Однако такой взгляд по существу не является сколько-нибудь обоснованным. Передача электромагнитной энергии при помощи проводов представляет собой лишь с внешней стороны более наглядный случай, чем передача электромагнитной энергии без помощи проводов, и поэтому кажется более доступной для понимания. По существу же между двумя этими случаями нет такого глубокого различия, которое делало бы второй более трудным для понимания, чем первый. Более того, в основе процессов передачи электромагнитной энергии с помощью проводов и без их помощи лежат одни и те же электромагнитные явления, знакомство с которыми в одинаковой мере обеспечивает понимание как того, так и другого процессов. Можно сказать еще больше: правильное понимание обоих процессов сводится именно к тому, чтобы усмотреть единую сущность явлений передачи электромагнитной энергии с помощью проводов и без проводов. Эти соображения и положены в основу изложения вопросов излучения и распространения электромагнитных волн. Изложение построено таким образом, чтобы было обеспечено правильное (в указанном выше смысле) понимание центрального вопроса о том, как электромагнитная энергия и, в частности, радиосигналы распространяются на значительные расстояния. С этой целью изложение начинается с рассмотрения электромагнитных явлений в свободном

пространстве и на основе развитых представлений об этих явлениях рассматривается картина распространения электромагнитной энергии вдоль длинной электрической линии.

Далее, описываются явления, происходящие в электрических цепях, содержащих емкости и индуктивности. Постепенное усложнение этих цепей снова приводит к длинным линиям. Такое изложение помогает проследить общность электромагнитных явлений, происходящих в свободном пространстве и электрических цепях.

Помимо существа физических явлений, лежащих в основе процессов передачи и приема радиосигналов, в книге рассматриваются некоторые специфические условия, в которых эти явления протекают. Это сделано для того, чтобы облегчить читателю переход от явлений в «чистом виде», описанных в книге, к явлениям, протекающим в конкретных условиях процессов передачи и приема сигналов по радио.

Количественные соотношения, приводимые в книге лишь постольку, поскольку они необходимы для понимания существа физических явлений, не предназначены для выполнения технических расчетов. Поэтому в книге применяется преимущественно гауссова система единиц, чаще всего используемая в физике при описании электромагнитных явлений. Это значит, что везде (кроме некоторых отдельных, специально оговоренных случаев) электрические величины выражаются в абсолютных электростатических единицах (CGS_e), а магнитные величины — в абсолютных электромагнитных единицах (CGS_μ).

Глава первая

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое поле существует вокруг всякого электрического заряда. Электрические заряды взаимодействуют (одноименные отталкиваются, а разноименные притягиваются) именно потому, что каждый заряд создает вокруг себя электрическое поле, а оно действует на другой заряд с некоторой силой. По величине и направлению этой силы мы определяем **напряженность электрического поля**.

Напряженность электрического поля в данной точке по направлению и величине совпадает с той силой, с которой поле действует на помещенный в данную точку положительный электрический заряд, равный единице количества электричества (так называемый пробный заряд).

Напряженность в разных точках поля можно характеризовать при помощи силовых линий. Это такие линии, направление которых в каждой точке совпадает с направлением силы, действующей в этой точке на пробный заряд.

Под влиянием силы электрического поля заряд, находящийся в поле, приобретает ускорение в том направлении, в котором на него действует сила. Однако направление движения заряда не обязательно совпадает с направлением действия силы. Если заряд уже обладает какой-то скоростью, то вследствие инерции он не будет двигаться в направлении действия силы, если направление силы не совпадает с направлением той скорости, которую заряд уже имеет. Следовательно, силовые линии — это линии, по которым двигался бы положительный электрический заряд в случае, когда не было бы влияния его инерции,

например, если бы мы удерживали этот заряд так, чтобы он очень медленно двигался в направлении действующей на него силы.

Расположение силовых линий поля зависит от расположения электрических зарядов. Так, например, в случае заряженного шара силовые линии расположены вокруг шара по радиусам. Они направлены от шара, если шар заряжен положительно (рис. 1), и к шару, если он заряжен отрицательно (рис. 2), так как в первом случае положительные заряды отталкиваются от шара, а во втором — притягиваются к нему.

Силовые линии характеризуют не только направление, но и величину напряженности электрического

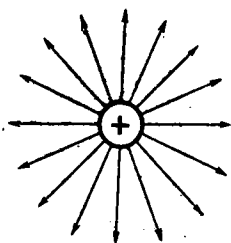


Рис. 1.

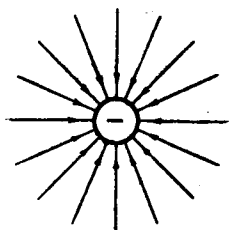


Рис. 2.

поля. Где силовые линии расположены гуще, там напряженность поля больше. В рассматриваемом случае заряженного шара густота силовых линий уменьшается по мере удаления от шара; это соответствует тому, что напряженность поля при удалении от шара убывает. Напряженность электрического поля, создаваемого зарядом, пропорциональна величине заряда. Поэтому густота силовых линий поля должна быть пропорциональной величине заряда, который это поле создает. Например, если в случае двух одинаковых шаров второй заряжен вдвое большим количеством электричества, чем первый, то силовые линии поля второго шара должны быть расположены вдвое гуще, чем силовые линии поля первого шара.

В случае большой заряженной пластины заряд по поверхности пластины распределяется равномерно (кроме участков, близких к краям пластины), и поэтому во всех точках, где кратчайшее расстояние до пластины мало по сравнению с расстоянием до краев ее, напряженность поля одинакова. Соответственно силовые линии электрического поля заряженной пластины направлены перпенди-

кулярно пластине и густота их во всех точках одинакова. На рис. 3 изображены силовые линии полей положительно и отрицательно заряженной пластины (абсолютная величина зарядов на рис. *а* больше, чем на рис. *б*).

Такое поле, напряженность которого во всех точках одинакова по величине и направлению, называется однородным. Напряженность электрического поля большой

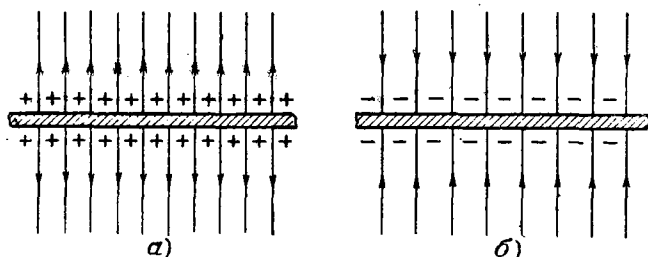


Рис. 3.

пластины, как и всякого поля, создаваемого электрическими зарядами, пропорциональна величине заряда пластины. Поэтому напряженность поля пропорциональна количеству электричества, приходящегося на единицу площади пластины, т. е. поверхностной плотности электрического заряда σ . Коэффициент пропорциональности между напряженностью поля E вблизи пластины и поверхностной плотностью заряда на ней σ , как показывают расчеты, равен 2π . Следовательно, во всей той области, где электрическое поле можно считать однородным (т. е. на расстояниях, заметно меньших, чем размер пластины),

$$E = 2\pi\sigma.$$

Силовые линии электрического поля, создаваемого электрическими зарядами, начинаются на положительных зарядах и кончаются на отрицательных. Так как одинаковые по величине, но противоположные по знаку заряды создают электрические поля, напряженность которых одинакова по величине, но противоположна по направлению, то число силовых линий, которые начинаются на данном положительном заряде, должно быть равно числу силовых линий, которые кончаются на таком же по величине отрицательном заряде. Поэтому, если расположить достаточно близко друг к другу два равных по величине, но разноименных заряда, то все силовые линии поля, начинающиеся на положительном заряде, будут кончаться на отрицательном (рис. 4).

Так как напряженность электрического поля в каждой точке имеет не только определенную величину, но и определенное направление (такие «направленные величины» называются векторными величинами или векторами), то напряженность поля в каждой точке можно изобразить стрелкой, длина которой в некотором условном масштабе выражает величину напряженности поля, а направление стрелки указывает направление напряженности поля.

От изображения электрического поля при помощи силовых линий нетрудно перейти к изображению поля при помощи стрелок. Направление напряженности поля в каждой

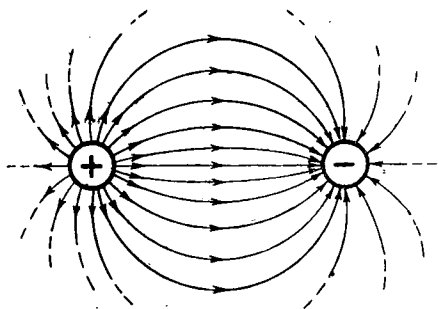


Рис. 4.

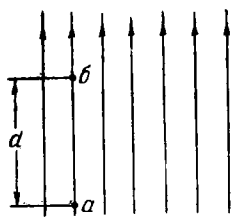


Рис. 5.

точке совпадает с направлением силовой линии. Если силовые линии являются прямыми, то стрелка просто совпадает с линией, если же силовые линии являются кривыми, то стрелка направлена по касательной к силовой линии. Длина стрелки должна быть пропорциональной напряженности поля, т. е. там, где силовые линии расположены гуще, стрелки должны быть длиннее, там, где силовые линии реже, стрелки должны быть короче.

Наряду с напряженностью электрического поля, которая характеризует поле в данной точке пространства, важной характеристикой электрического поля служит напряжение между какими-либо двумя точками поля. Связь напряженности электрического поля с напряжением между какими-либо двумя точками этого поля наиболее проста в случае однородного поля. Если мы выберем в таком поле две точки a и b , лежащие на одной силовой линии (рис. 5), то напряжение между этими точками

$$U = Ed,$$

где E — напряженность поля, а d — расстояние между точками a и b .

В случае неоднородного поля (т. е. поля, в котором напряженность меняется от точки к точке) связь между напряженностью поля и напряжением более сложна, но качественно картина остается прежней: чем больше расстояние между точками, лежащими на одной и той же силовой линии, тем больше напряжение между этими точками. Если напряжение измеряется в вольтах, то напряженность поля, которая в простейшем случае однородного поля представляет собой частное от деления напряжения на расстояние между точками, измеряется в вольтах на сантиметр (в/см) или вольтах на метр (в/м).

Поскольку электрические заряды взаимодействуют, то для продвижения зарядов против сил взаимодействия — сближения одноименных зарядов или удаления разноименных зарядов — нужно затрачивать работу. Наоборот, если заряды будут предоставлены самим себе, то одноименные заряды будут удаляться друг от друга, а разноименные приближаться друг к другу. При этом силы взаимодействия между зарядами будут совершать как раз такую работу, какая была затрачена на сближение одноименных зарядов или удаление разноименных. Совершаемая силами взаимодействия работа идет на ускорение зарядов — на сообщение им кинетической энергии. Так как взаимодействующие заряды способны совершать работу, значит они обладают энергией. Эта энергия сосредоточена в том электрическом поле, которое создано зарядами. Она связана с электрическим полем, и если поле исчезает, то электрическая энергия превращается в другой вид энергии.

2. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Электрическое поле действует по-разному на помещенные в него различные тела. В зависимости от характера действия электрического поля все тела можно разделить на три основные группы: проводники, изоляторы или диэлектрики и занимающие промежуточное положение между первыми и вторыми полупроводники. Рассмотрим свойства проводников и их поведение в электрическом поле.

Поведение тел в электрическом поле определяется свойствами атомов, из которых эти тела построены. Как известно, в состав атомов входят электрически заряженные частицы, содержащие одинаковые по величине, но разные по знаку заряды. Положительно заряженные частицы (протоны) входят в состав ядра атома, а отрица-

тельно заряженные частицы (электроны) образуют «электронную оболочку» атома.

В нормальном состоянии всякий атом содержит одинаковое число протонов и электронов, и поэтому его общий электрический заряд равен нулю (так называемый нейтральный атом). Электроны удерживаются в атоме силами электрического притяжения к ядру. Эти силы в различных атомах имеют различную величину. Если эти силы малы, то электрон легко может быть вырван внешними воздействиями из электронной оболочки атома, и тогда вследствие того, что число электронов в атоме стало меньше числа протонов, общий заряд атома оказывается положительным — атом превращается в положительный ион.

В некоторых телах, в первую очередь в металлах, часть электронов удерживается в атомах столь слабыми силами, что они легко могут вылетать за пределы атома и двигаться в теле, пока не будут захвачены каким-либо другим атомом, к которому они подошли на достаточно близкое расстояние. В этом случае тело состоит уже не из нейтральных атомов, а из почти неподвижных положительных ионов, между которыми хаотически движутся потерявшие связь с атомами «электроны». Это тепловое движение аналогично тепловому движению частиц газа.

Если такое тело помещено в электрическое поле, то это поле сообщает всем свободным электронам ускорение в одном и том же направлении, противоположном направлению поля (на отрицательные заряды со стороны электрического поля действуют силы, направленные в сторону, противоположную направлению поля). Пока электрическое поле отсутствует, свободные электроны движутся хаотически, т. е. во всевозможных направлениях и с различными скоростями, но с одинаковой средней скоростью во всех направлениях. В этом случае через любое сечение тела за любой промежуток времени пролетает в обе стороны одинаковое число электронов, т. е. общее количество электричества, прошедшее через это сечение за единицу времени, равно нулю (так как одинаковое количество электричества проходит через сечение в двух противоположных направлениях).

Когда же электрическое поле сообщает всем хаотически движущимся электронам ускорение в одном и том же направлении, то скорость движущихся в этом направлении электронов будет возрастать, а движущихся в обратном направлении — уменьшаться. В результате этого средняя

скорость движения свободных электронов в направлении сообщаемого им полем ускорения окажется большей, чем в противоположном направлении.

Правда, разница в средних скоростях электронов в направлениях против поля и по полю обычно бывает очень малой. Это объясняется тем, что средняя скорость хаотического движения электронов велика; она тем больше, чем больше температура (при комнатной температуре она составляет около 100 км/сек). Средняя же скорость, сообщаемая электронам электрическим полем, несравненно меньше; даже при очень сильных электрических полях она не превышает 100 м/сек , а при тех электрических полях, с которыми обычно приходится иметь дело на практике, она обычно составляет малые доли сантиметра в секунду.

Но даже очень небольшое различие в средних скоростях электронов в двух направлениях коренным образом изменяет всю картину. В двух противоположных направлениях будет проходить уже различное количество электронов. А так как число электронов в теле очень велико, то даже очень небольшое различие в средних скоростях приводит к тому, что избыток числа электронов, проходящих через сечение в направлении большей средней скорости, по сравнению с числом электронов, проходящих в направлении меньшей средней скорости, очень велик.

Для пояснения сказанного перейдем к конкретным числам. В 1 см^3 металла содержится примерно $1 \cdot 10^{23}$ свободных электронов. Они совершают хаотическое движение во всех направлениях со средней скоростью порядка 100 км/сек , т. е. $1 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$. При этом в секунду через площадку в 1 см^2 будет проходить в каждую сторону (т. е. в одном из шести возможных направлений) число электронов порядка $1 \cdot 10^{29}$. В отсутствие электрического поля это число будет точно одинаковым во всех направлениях. Но если в металле существует электрическое поле, которое в направлении против поля увеличивает среднюю скорость хаотического движения электронов, а в направлении по полю уменьшает эту среднюю скорость на $0,1 \text{ см/сек}$, т. е. увеличивает и уменьшает среднюю скорость на $1 \cdot 10^{-8}$ ее величины, то в таком же отношении соответственно увеличивается и уменьшается число электронов, проходящих в обе стороны через перпендикулярную направлению поля площадку в 1 см^2 . Следовательно, в направлении против поля в 1 сек будет проходить электронов на $1 \cdot 10^{21}$

больше, а в направлении по полю на $1 \cdot 10^{21}$ меньше, чем в отсутствие поля.

Избыток числа электронов, проходящих в 1 сек в первом направлении, над числом электронов, проходящих во втором направлении, составит $2 \cdot 10^{21}$. Так как заряд электрона составляет $1,6 \cdot 10^{-19}$ к (кулона), то этот избыток соответствует заряду в 320 к. Такой большой заряд будет проходить в 1 сек через площадку в 1 см^2 в результате изменения средних скоростей хаотического движения под действием электрического поля. Это значит, что в теле появится электрический ток в 320 а на каждый квадратный сантиметр сечения, перпендикулярного направлению поля. Направление этого тока обратно направлению, в котором средняя скорость движения электронов больше (так как направлением тока установлено считать направление движения положительных зарядов), т. е. совпадает с направлением вызвавшего его электрического поля.

Тела, в которых под действием электрического поля возникает электрический ток, называются проводниками электричества. В рассмотренном случае электрический ток создается движением электронов, и проводники с таким механизмом возникновения тока называются проводниками с электронной проводимостью. Ее называют иногда также металлической проводимостью, так как она характерна главным образом для металлов. В других телах, преимущественно жидкостях (например, растворах кислот и солей), свободные электроны отсутствуют, но зато образуются положительные и отрицательные ионы, т. е. части молекул, в которых соответственно число протонов преобладает над числом электронов и наоборот. В этих жидкостях под действием электрического поля, помимо хаотического движения ионов, возникает их регулярное движение: положительных — по направлению поля и отрицательных — в направлении против поля. Это движение ионов и создает электрический ток. Такие проводники называются проводниками с ионной проводимостью.

Газ, состоящий из нейтральных молекул, не является проводником, так как в нем отсутствуют заряженные частицы, которые могли бы под действием электрического поля создавать ток. Но если под влиянием каких-либо причин нейтральные атомы газа превращаются в ионы, то в таком ионизованном газе под действием электрического поля, помимо хаотического движения ионов, возникает их регулярное движение, которое и создает электри-