

# Предисловие

Содержание предлагаемого учебного пособия соответствует программе курса «Электромагнитные поля и волны», читаемого для бакалавров по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» вузов связи Российской Федерации. Излагаемый в книге материал также читается студентам радиотехнических специальностей технических вузов.

Все многообразные свойства и особенности электромагнитных полей и волн на данный момент времени могут быть изучены только при помощи теории Максвелла. Дисциплина «Электромагнитные поля и волны» как раз и занимается изучением законов, описывающих поведение электромагнитных полей и волн (ЭМП и В) и исследованием на основе полученных знаний технических устройств, в которых возможно создавать, управлять и преобразовывать различные ЭМП и В. Благодаря этому курс «Электромагнитные поля и волны» является теоретической основой таких специальных дисциплин, как линии связи, распространение радиоволн, антенны и устройства СВЧ и т. д. В этих дисциплинах идеи и методы теории Максвелла получают свое дальнейшее, прикладное развитие.

В пособии излагаются основные законы классической теории ЭМП и В. Систематически и подробно рассматриваются основные положения теории Максвелла и их применение к исследованию различных электромагнитных явлений, которые играют важную роль в технике. Анализируются вопросы излучения, распространения и дифракции электромагнитных волн. Дается представление о постановке и некоторых строгих, асимптотических и численных методах решения задач теории ЭМП и В. Излагается теория и приводятся сведения о методах анализа, технических характеристиках и конструктивных особенностях линий передачи самых различных частотных диапазонов, включая оптический.

Более полное представление о содержании книги читатель легко составит по оглавлению. При изложении всего материала авторы старались четко и последовательно вводить систему основных понятий теории ЭМП и В, физически интерпретировать получаемые результаты и выявлять общие закономерности, присущие различным родственным явлениям или устройствам.

Поскольку издание является учебным пособием, а не научной монографией, авторы считали возможным и целесообразным использовать при написании книги материалы уже опубликованных в учебной, методической и периодической литературе, естественно, ссылаясь на первоисточники.

В основу пособия положены лекции, читаемые авторами в Московском техническом университете связи и информатики.

Авторы выражают глубокую благодарность В.Г. Кочержевскому, чьи многочисленные ценные замечания по рукописи данной книги были учтены при ее подготовке к изданию. Авторы выражают искреннюю признательность своему редактору — д-ру техн. наук, проф. В.В. Чебышеву за большой труд, выполненный им по улучшению материалов пособия и устранению неточностей и ошибок в его изложении. Помощь в оформлении рукописи книги оказали О.В. Баркаринова, Д.С. Каяков, Н.А. Тихомиров, В.С. Уткина, за что авторы выражают им благодарность.

Советы и замечания по содержанию книги просьба направлять авторам на электронную почту кафедры Технической электродинамики и антенн МТУСИ. Они будут приняты с благодарностью.

## Введение

Теория электромагнитного поля как предмет науки, наряду с ядерной и квантовой физикой, физикой твердого тела и т. п., является достаточно абстрактной наукой. Под абстрактностью понимается тот факт, что наш опыт не может дать нам возможность наглядно представить такие процессы, как распространение электромагнитных волн в пространстве или взаимодействие электромагнитных полей в линии передачи. В этой связи надо четко понимать, что поведение электромагнитного поля нельзя свести к привычным нам механическим проявлениям (например, движению, трению и т. д.) не потому, что мы этого не умеем, а потому, что поле — это особая форма существования материи. Так устроен мир, и задаваться вопросом «почему» бессмысленно. Вследствие этого понять законы поведения электромагнитных полей — это не значит составить какие-либо наглядные механические аналогии.

Как известно [23], принято различать две формы существования материи: вещество и поле. *Веществом* принято называть совокупность дискретных (прерывных) образований, обладающих массой покоя. *Поле* в общем случае принято называть особые физические свойства материи, проявляющиеся в силовом воздействии тел или отдельных частиц вещества. Различают электромагнитные поля, гравитационные поля, поля ядерных сил и т. д.

Понятие электрического и магнитного поля впервые было введено М. Фарадеем в 30-х годах XIX века. Концепция поля была принята им как альтернатива *теории дальнего действия*, т. е. взаимодействия частиц без какого-либо промежуточного агента [5]. Согласно концепции поля частицы, участвующие в каком-либо взаимодействии, создают в каждой точке окружающего их пространства особое состояние — *поле сил*, проявляющееся в силовом воздействии на другие частицы, помещенные в данную точку пространства.

Принято разделять макроскопическую (классическую) и квантовую теорию электромагнитного поля (ЭМП).

Классическая теория ЭМП учитывает только макроскопические значения электромагнитных величин (зарядов, токов и др.), представляющих собой их усреднённые по времени и пространству значения:

- усреднение по времени означает, что электромагнитные величины рассматриваются в интервалах времени значительно больших, чем период обращения или колебаний элементарных частиц в атомах и молекулах;
- усреднение по пространству означает, что электромагнитные величины рассматриваются на участках, объёмы которых значительно больше чем объёмы атомов и молекул.

В основе классической теории ЭМП лежат четыре уравнения или постулата, впервые сформулированные Дж.К. Максвеллом в 1873 г. в труде «Трактат об электричестве и магнетизме», которые носят теперь его имя. Эти законы являются обобщением многочисленных экспериментальных результатов, касающихся электрических и магнитных явлений, и в полной мере и однозначно описывают всю совокупность электромагнитных явлений в *макроскопическом* масштабе.

Основной вывод из теории Максвелла заключается в следующем: переменное электромагнитное поле распространяется от источника в окружающее пространство в виде волны со скоростью распространения, равной скорости света ( $c = 299\,792,5 \text{ км/с} \approx 3 \times 10^8 \text{ м/с}$ ).

Для поддержания существования излученной электромагнитной волны совершенно не нужны заряды. Следует поэтому четко понимать, что движение электромагнитной волны ни в коем случае не следует рассматривать как механическое движение заряженных частиц (например, электронов). В отличие от звуковых волн, представляющих собой колебания воздуха или другой среды, в которой они распространяются, электромагнитные волны не являются результатом механического движения. И здесь следует вновь напомнить, что ЭМП — это особая форма существования материи.

Первым практически применившим теорию Максвелла в своей научной работе был Г. Лоренц (1875 г.) [5]. В 1888 г. ЭМВ были экспериментально получены Г. Герцем. Опыты Г. Герца и П.Н. Лебедева доказали общую физическую природу света и ЭМВ, что подтвердило выводы теории Максвелла об ЭМ природе света.

Теория относительности придала фундаментальный смысл понятию поля как *первичной физической реальности*. В системе взаимодействующих частиц сила, действующая в данный момент на какую-либо частицу, сказывается на другой частице не сразу, а через определенный промежуток времени. Таким образом, на скоростях, соизмеримых со скоростью света, взаимодействие частиц можно описывать только через создаваемые ими поля [23].

Один из важнейших выводов теории А. Эйнштейна — взаимосвязь массы и энергии ( $W = mc^2$ ). Квантовый эффект аннигиляции электронно-позитронной пары с выделением фотона (и обратный переход) отражает существующую в микромире связь различных видов материи (вещества и поля) [2, 3].

Основными особенностями, отличающими ЭМП от вещества, являются:

- переменное во времени ЭМП распространяется в свободном пространстве всегда с одинаковой скоростью — скоростью света. Вещество же может двигаться с любой скоростью, но всегда меньшей скорости света;
- различные частицы вещества не могут занимать один и тот же объем (например, в комнате присутствует воздух — если же эту комнату заполнить водой, то воздух сохранить не удастся). Различные же ЭМП могут занимать один и тот же объем (в комнате одновременно присутствует ЭМП света, поля различных радиостанций и телевизионных станций и т. д.).

Вместе с тем вещество и ЭМП имеют и некоторые схожие свойства, в частности ЭМП, как и вещество, может характеризоваться импульсом, массой и энергией. Наличие импульса у ЭМП проявляется, например, в давлении света, существование которого впервые подтверждено экспериментально П.Н. Лебедевым в 1890 г. Масса ЭМП, соответствующая его энергии  $W$ , может быть определена при помощи вышеописанной формулы Эйнштейна:  $m = W/c^2$ .

ЭМП играют чрезвычайно важную роль в жизни человека. Не говоря уж о прикладном значении ЭМП (радио, связь, телевидение, Интернет и т. д.), сама жизнь на Земле была бы невозможна без ЭМП, точнее без преобразования электромагнитной энергии (энергии солнечных лучей) в тепловую, химическую и другие виды энергии.

Электромагнитное поле принято разделять на два взаимосвязанных поля — электрическое и магнитное. Источником электрического поля является неподвижный электрический заряд, источником магнитного поля является постоянный магнит, источником электромагнитного поля является движущийся заряд. Поскольку ток — есть упорядоченное движение электрических зарядов, то он также создает как электрическое, так и магнитное поле. Представление об ЭМП как о простом совмещении в заданной области пространства электрического и магнитного полей является глубоко ошибочным. ЭМП должно рассматриваться как неразрывная совокупность электрического и магнитного полей. Выделение одной из составляющих является эффектом относительным, зависящем от относительности

движения наблюдателя и системы зарядов. Например, при движении заряда относительно неподвижного наблюдателя обнаруживается магнитное поле, источником которого является движущийся заряд. Однако, если наблюдатель будет двигаться параллельно заряду с той же скоростью, то он магнитного поля не обнаруживает.

Оба поля (электрическое и магнитное) могут проявляться в виде механических сил. Если в электрическое поле внести пробный заряд, то под действием этих сил он будет перемещаться. Аналогично магнитное поле *изменяет* движение (а не вызывает движение!) пробного электрического заряда или пространственно ориентирует пробный постоянный магнит (магнитную стрелку). Особенность воздействия электрического и магнитного полей на электрический заряд заключается таким образом в следующем:

- электрическое поле воздействует как на неподвижные, так и на движущиеся заряды;
- магнитное поле воздействует только на движущиеся заряды.

Приведем фундаментальные определения.

*Электромагнитное поле* — особая форма материи, отличающаяся непрерывным распределением в пространстве (в виде волны), обнаруживающая дискретную структуру (фотоны), имеющая способность распространения в вакууме со скоростью света и оказывающая на заряженные частицы силовое воздействие, зависящее от их скорости.

*Электрический заряд* — свойство частиц вещества или тел, характеризующее их взаимодействие с собственным электромагнитным полем и их взаимодействие с внешним электромагнитным полем, имеет два вида: положительный заряд (например, протон) и отрицательный заряд (например, электрон); количественно определяется по силовому воздействию тел, обладающих электрическим зарядом.

*Электрическое поле* — одно из двух сторон электромагнитного поля, обусловленное электрическими зарядами и изменениями электромагнитного поля, вызывающее силовое воздействие на заряженные частицы и тела и выявляемое по этому силовому воздействию.

*Магнитное поле* — одно из двух сторон электромагнитного поля, обусловленное движущимися электрическими зарядами, вызывающее силовое воздействие на движущиеся заряженные частицы и тела и выявляемое по силовому воздействию, направленному перпендикулярно к направлению движения этих частиц и пропорциональное их скорости.

Согласно определению, электрическое и магнитное поля характеризуются силами, действующими на заряды, находящимися в об-