

Введение

В предлагаемом Вашему вниманию учебном пособии рассматриваются основы классической, или как её ещё называют, макроскопической теории электромагнитного поля, а также её приложений для решения задач возбуждения, излучения и распространения радиоволн в неограниченных средах и направляющих системах. В этой классической теории электромагнитного поля среда распространения электромагнитных волн характеризуется некоторыми усредненными параметрами, что позволяет отвлечься от её дискретной микроскопической структуры, имеющей место в действительности.

Предложенный подход может использоваться для решения инженерных задач до тех пор, пока размеры рассматриваемых областей пространства во много раз больше размеров атомов и молекул.

Для описания электромагнитных процессов, происходящих в микромире, была развита специальная квантовая теория поля. Интересующая же нас практическая радиотехника в большинстве случаев имеет дело с макроскопическими явлениями, поэтому представляемая здесь теория электромагнитного поля является научной базой для целого ряда радиотехнических дисциплин, таких, как распространение радиоволн, антенные и фидерные устройства, электроника СВЧ, радиолокация, радиоастрономия и т.д.

Что же имеется в виду под термином «электромагнитное поле»? Современная наука говорит о том, что в природе материя может существовать в двух модификациях: в форме вещества и в форме физических полей. Самым общим определением электромагнитного поля является утверждение о том, что этот вид поля является одним из существующих в природе физических полей, и в то же время это одна из общих форм существования материи.

Кроме электромагнитного поля, существуют и другие физические поля, например гравитационные, внутриядерные. Хотя природа этих полей к этому времени изучена по сравнению со свойствами электромагнитного поля меньше, однако имеются многие факты, свидетельствующие об их взаимной связи. В связи с этим учёный-физик Альберт Эйнштейн последние десятилетия своей научной деятельности посвятил созданию единой теории поля, охватывающей и включающей в себя все известные виды полей. В настоящее время ведущие физики современной науки продолжают эту сложную и напряжённую работу.

Следует отметить, что в настоящее время научно доказана материальная сущность всех известных полей, в том числе и исследуемого электромагнитного поля, поскольку оно обладает массой и удовлетворяет определенным качественным и количественным соотношениям, которые рассматриваются далее в предлагаемом Вашему вниманию учебном пособии.

Теория электромагнитного поля исторически складывалась, осваивалась практикой и развивалась вначале в рамках создаваемой теоретической электротехники, а затем в XX и XXI веках — её дальнейшего продолжения — радиотехники. Основоположниками этой теории электромагнитного поля по праву можно считать выдающихся физиков XIX века — англичан М. Фарадея и Д. Максвелла, а также академика Петербургской Академии Э.Х. Ленца.

Майкл Фарадей в 1830 году открыл чрезвычайно важное для теории и практики электромагнитного поля явление электромагнитной индукции, впервые экспериментально доказал взаимную связь между магнитным и электрическим полями. Он так же открыл явление поворота плоскости поляризации оптической волны при её прохождении через кристалл исландского шпата, помещенный в постоянное магнитное поле (1846 г.), называемое в честь автора, его открывшего, эффектом Фарадея.

В радиотехнике имеет место такое же явление поворота плоскости поляризации при прохождении радиоволн через ионосферу Земли вдоль меридианов, совпадающих по направлению с направлением силовых линий магнитного поля. Эммануил Ленц (1833 г.) установил один из основных принципов электродинамики — принцип инерции электромагнитного поля, получивший название принципа Ленца.

Дж.К. Максвелл провёл анализ накопленных экспериментальных данных, обобщил и широко развил идеи, высказанные и экспериментально полученные Фарадеем и Ленцем, придал им строгую математическую форму, объединил в единую и стройную теорию электромагнитного поля (1865 г.). Основой этой теории является совокупность двух основных законов, описываемых системой дифференциальных уравнений электромагнитного поля, называемых уравнениями Максвелла.

В самом начале появления теория электромагнитного поля Максвелла была встречена научным сообществом с недоверием, однако опыты Генриха Герца, проведённые в 1888 году, окончательно утвердили право на её существование. Генрих Герц ещё далее развил теорию Максвелла и именно он придал ей современный математический вид. Результаты опытов, проведённых Герцем, напрямую подвели к

мысли о возможности создания беспроводной линии передачи информации на расстояние — к созданию радиосвязи, однако в то время сам Герц относился к этому возможному практическому применению своей теории весьма скептически. Честь открытия практического радиоприёма, а значит и радио, принадлежит нашему соотечественнику Александру Степановичу Попову. Именно он 5 мая 1895 г. впервые продемонстрировал возможность радиоприема электромагнитного излучения грозовых разрядов молний, а уже в следующем году А.С. Попов с использованием изобретенной им антенны осуществил и радиосвязь на заметном для того времени расстоянии (250 м).

Большой вклад в развитие теории электромагнитного поля внес профессор Московского университета П.Н. Лебедев, экспериментально измеривший (1899 г.) давление световых волн, являющихся частным случаем электромагнитного поля, тем самым подтвердивший фундаментальный вывод теории Максвелла — материальность электромагнитного поля.

Свой вклад в развитие теории электромагнитного поля, а также в инженерную практику её применения, внесли и вносят российские ученые. Здесь следует отметить академиков Шулейкина, Введенского, Щукина, Фока, Пистолькорса, Богомолова, профессора Айзенберга, Калинина и многих других ученых.

Этот вклад высоко оценен мировым сообществом и многим фундаментальным соотношениям присвоены имена их первооткрывателей: формулы Шулейкина — Ван-дер-Поля, Введенского, Фока, граничные условия Леонтовича — Щукина, эффект Кабанова, двойная ромбическая антенна Айзенберга и т.д.

Электромагнитное поле характеризуется векторными характеристиками, поскольку имеет как величину, так и направление воздействия, а прежде всего, векторами напряженности электрического и магнитного полей (векторами \vec{E} и \vec{H}), поэтому эта теория опирается на математический аппарат векторного анализа. Основные понятия и соотношения векторного анализа для напоминания кратко приведены в приложениях.

Далее будут рассматриваться закономерности двух видов полей скалярных и векторных в их зависимости от времени. Для этих полей могут быть образованы так же и пространственные производные, показывающие наибольшую скорость и направление изменения рассматриваемой функции в пространстве. В этих полях пространственные производные образуются как предел отношения поверхностного интеграла от рассматриваемой функции по замкнутой поверхности к объему этой поверхности.

В случае стремления объема к нулю (т.е. стягивания поверхности в точку), элементарная площадка поверхности считается вектором, величина которого равна площади площадки, а направление действия совпадает с направлением внешней нормали к поверхности интегрирования.

В скалярном поле такая объемная производная оказывается вектором, называется градиентом, и ее направление показывает направление наибольшего изменения скалярной функции в пространстве. Если изменения направление вектора известно, то градиент равен произведению производной функции по этому направлению на его единичный вектор.

В векторном поле рассматриваются два произведения вектора и элементарной площадки, которую он пересекает, — скалярное и векторное. Соответственно существуют также две производные, характеризующие поле: дивергенция, в которой в подинтегральном выражении фигурирует скалярное произведение, и ротор, в котором фигурирует векторное произведение. Дивергенция при этом является скалярной, а ротор — векторной величиной. Дивергенция показывает наличие в рассматриваемой точке источников или стоков поля (термины заимствованы из теории гидродинамики), а ротор направлен перпендикулярно вектору поля и показывает наличие «вихря», т.е. изменения величины вектора поля в направлении, перпендикулярном плоскости, проходящей через вектор поля и ротор. Для определения объёмных производных от сложных функций удобно использовать символический вектор — вектор Гамильтона.

Обычно выделяются для рассмотрения в теории два частных вида векторных полей: соленоидальное (без наличия источников) в котором дивергенция равна нулю, и потенциальное (безвихревое) в котором ротор равен нулю. Любое векторное поле может рассматриваться как сумма этих соленоидного и потенциального полей.

Учебное пособие содержит семь глав. В первой главе рассматриваются начальные основы теории электромагнитного поля, приводятся основные законы электро- и магнитоэстатики, а также базовые определения векторных и скалярных величин, характеризующих электрическое и магнитное поля, рассматриваются электрические и магнитные параметры среды.

Затем описывается содержание и история развития идей Фарадея, Ленца и Максвелла, оформленных в виде системы дифференциальных уравнений для описания закономерностей электромагнитного поля. Анализируются также общие свойства этих полей, рассматриваются энергетические соотношения в электромагнитном поле (теорема

Умова — Пойнтинга), граничные условия для векторов напряжённости электрического и магнитного полей. Затем приводится решение волновых уравнений поля для комплексных амплитуд с помощью скалярного и векторного потенциалов, а также вектора Герца.

Такая же методика используется и далее для решения общей задачи об излучении электромагнитных волн при заданных источниках. Формулируется теорема об эквивалентных источниках поля (принцип Гюйгенса — Френеля).

Во второй главе рассматривается структура поля при излучении электромагнитных волн элементарными источниками: элементарным вибратором и элементарной рамкой. Основное внимание при этом уделяется изучению свойств полей в дальней (волновой) зоне. Для анализа полей излучения элементарной рамки используется перестановочная двойственность уравнений поля, предложенная А.А. Пистолькорсом.

В третьей главе рассмотрены особенности структуры поля при распространении плоских электромагнитных волн в различных средах и их поляризационные свойства. Рассматривается случай распространения сигнала в физической среде с дисперсией фазовой скорости распространения; поясняются различие фазовой и групповой скоростей; анализируются частные случаи дисперсии.

В четвертой главе изучаются общие законы преломления и отражения плоских волн на границе двух сред с различающимися параметрами. Основное внимание уделяется преломлению и отражению волн на границе диэлектрик — диэлектрик и диэлектрик — проводник, рассматриваются явления полного прохождения и полного отражения волны. В последнем случае анализируется возникновение во второй среде поверхностных волн и выясняются их свойства. Для границы диэлектрик — хороший проводник анализируются приближенные граничные условия Леонтовича — Щукина и указываются области их практического использования.

В пятой главе рассматриваются общие свойства направляемых волн, делается попытка их классификации как по типу направляющих систем, так и по свойствам и структуре распространяющихся полей. Здесь же рассмотрены волны в полосковых и коаксиальных линиях передачи, где основное внимание уделено Т-волнам.

В шестой главе рассмотрены волны в металлических волноводах — прямоугольного и круглого поперечного сечения, а также в радиальном волноводе. Основное внимание уделено волне типа H_{10} в прямоугольном волноводе, приведены структуры её полей и поверхностных токов, поясняется принцип действия и особенности других

элементов волноводных трактов. Волны в волноводах круглого поперечного сечения рассмотрены более кратко; указаны особенности структуры полей и определены области применения таких волноводов. Рассмотрены волны различных типов, а волна H_{11} анализируется как волна, аналогичная волне H_{10} в прямоугольном волноводе. В заключение рассмотрены вопросы возбуждения волн и определяется величина затухания волн в волноводах.

Седьмая глава посвящена колебаниям в объемных резонаторах, демонстрируется спектр их резонансных частот, рассмотрены их добротности. Основное внимание уделено колебаниям в прямоугольных резонаторах типа H_{101} , чаще всего используемым в аппаратуре.

Пособие заканчивается списком рекомендуемой литературы и тремя приложениями. В первом из них поясняется физическое содержание основных операций векторного анализа — градиента скалярного поля, дивергенции и ротора векторного поля. Далее приведена сводка формул, применения этих операций к сложным полям, описываемым произведением двух функций — скалярной и векторной, двух векторных; здесь же дана сводка формул последовательного применения этих операций. Приведены также основные интегральные соотношения, справедливые для скалярных и для векторных полей.

В приложении 2 приведены электрические характеристики радиочастотных кабелей со сплошной изоляцией, выпускаемых отечественной промышленностью.

В приложении 3 приведены основные размеры и электрические характеристики прямоугольных и круглых металлических волноводов, выпускаемых промышленностью.

Рекомендуемая литература

Основная:

1. Пименов Ю.В., Вольман В.И. Техническая электродинамика. Под ред. Ю.В. Пименова. — М.: Радио и связь, 2002.
2. Семёнов Н.А. Техническая электродинамика. — М.: Связь, 1973.
3. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Наука, 1978.
4. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. — М.: Высшая школа, 1990.

Дополнительная:

5. Сомов А.М., Старостин В.В. Распространение радиоволн. — М.: Гелиос, 2008.
6. Сомов А.М. Расчёт антенн земных станций спутниковой связи. — М.: Горячая линия — Телеком, 2008.

Г Л А В А 1

Основы теории электрического поля

1.1. Основные величины, определяющие электромагнитное поле. Электромагнитные параметры среды существования поля

Прежде чем начинать знакомство с довольно сложными соотношениями в виде уравнений Максвелла для описания электромагнитных полей, целесообразно ознакомиться с основными величинами, определяющими интенсивность и ориентацию составляющих этого поля. Для этих целей удобно рассмотреть простейшие типы полей — статические поля, например статическое электрическое поле точечного положительного заряда Q , размещённого в вакууме и схематично представленного на рис. 1.1. Для выяснения особенностей такого поля в зону его действия помещается пробный единичный точечный положительный заряд q .

Сила поля заряда Q , действующая на пробный положительный заряд q , согласно известному закону Кулона, определяется как

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} \vec{r}^0, \quad (1.1)$$

где постоянный коэффициент $1/(4\pi\epsilon_0)$ определяется выбранной практической и рационализированной системой единиц — СИ; \vec{r}^0 — единичный вектор, определяющий направление действия искомой силы; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость среды, окружающей заряды Q и q .

Соотношение (1.1) позволяет ввести понятие вектора напряжённости электрического поля заряда Q как силы, воздействующей на единицу пробного заряда, внесённого в это поле:

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q},$$

т.е.

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{r}^0. \quad (1.2)$$

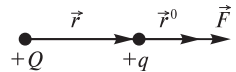


Рис. 1.1. Статическое поле заряда