

А. М. Сомов, В. В. Старостин, С. Д. Бенеславский

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Под ред. А. М. Сомова

*Допущено УМО по образованию
в области информационной безопасности
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по специализациям специальности
090302 (090106) – «Информационная безопасность
телекоммуникационных систем»*

Москва
Горячая линия - Телеком
2011

УДК 621.371: 537.86 (075.8)
ББК 32.845
С61

Рецензенты: доктор физ.-мат. наук, профессор *В. А. Давыдов*;
доктор техн. наук *М. Д. Воробьев*

Сомов А. М., Старостин В. В., Бенеславский С. Д.

С61 Электродинамика: Учебное пособие / Под ред. А. М. Сомова. –
М.: Горячая линия–Телеком, 2011. – 198 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0155-1.

В книге изложены вопросы теории электромагнитных волн под углом зрения применения основных её положений в технике СВЧ и антеннах. Рассмотрены вопросы излучения, распространения, преломления, отражения и возбуждения таких волн в свободном пространстве и в направляющих системах.

Для студентов, обучающихся по специальностям 090106 – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», 090107 – «Противодействие техническим разведкам», направлению подготовки 090900 – «Информационная безопасность» (профиль «Безопасность телекоммуникационных систем»), будет полезна студентам телекоммуникационных и радиотехнических специальностей, аспирантам и специалистам в области инфокоммуникаций и защиты информации.

ББК 32.845

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

Сомов Анатолий Михайлович
Старостин Владимир Васильевич
Бенеславский Сергей Дмитриевич

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
Учебное пособие

*Книга подготовлена при поддержке грантов Президента Российской Федерации
НС-5.2008.10 и НШ-24.2010.10*

Редактор Ю. Н. Чернышов
Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышова
Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано в печать 25.09.2010. Печать офсетная. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-9912-0155-1

© А. М. Сомов, В. В. Старостин,
С. Д. Бенеславский, 2011

© Издательство Горячая линия–Телеком, 2011

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 действия, 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.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Основы теории электрического поля.....	9
1.1. Основные величины, определяющие электромагнитное поле. Электромагнитные параметры среды существования поля.....	9
1.2. Система дифференциальных уравнений электромагнитного поля (уравнения Максвелла).....	24
1.3. Граничные условия для векторов поля.....	29
1.4. Энергия электромагнитного поля.....	34
1.5. Комплексная форма записи векторов. Уравнения поля для комплексных амплитуд.....	38
1.6. Решение волновых уравнений поля при заданных источниках	43
1.7. Решение неоднородного волнового уравнения. Теорема об эквивалентных источниках; принцип Гюйгенса — Френеля	47
Вопросы к главе 1.....	51
Глава 2. Излучение электромагнитных волн	52
2.1. Электромагнитное поле элементарного вибратора (диполя Герца).....	52
2.2. Электромагнитное поле элементарной рамки.....	62
2.3. Излучение раскрыва цилиндрической формы	65
2.4. Излучение из открытого конца радиального волновода, возбуждаемого элементом Гюйгенса.....	69
2.5. Особенности расчета направленных свойств антенн с коническим раскрывом.....	75
Вопросы к главе 2.....	81
Глава 3. Общие законы распространения электромагнитных волн	82
3.1. Основные соотношения для плоских электромагнитных волн	82
3.2. Плоские волны, распространяющиеся в идеальном диэлектрике	84
3.3. Плоские волны в проводящей среде	86
3.4. Фазовая и групповая скорости распространения электромагнитной энергии.....	90

Вопросы к главе 3.....	94
Глава 4. Преломление и отражение плоских волн на плоской границе двух сред.....	95
4.1. Общие законы преломления и отражения электромагнитных волн.....	95
4.2. Преломление и отражение на границе диэлектрик – диэлектрик.....	100
4.3. Преломление волн на границе диэлектрик – проводник..	107
Вопросы к главе 4.....	109
Глава 5. Направляемые волны, их типы и свойства. Волны в полосковых и коаксиальных линиях передачи.....	111
5.1. Классификация направляемых волн. Их общие свойства, описание составляющих поля.....	111
5.2. Волны в полосковых линиях.....	120
5.3. Волны в коаксиальных линиях.....	124
Вопросы к главе 5.....	127
Глава 6. Волны в металлических волноводах.....	128
6.1. <i>H</i> -волны в волноводах прямоугольного поперечного сечения.....	128
6.2. <i>E</i> -волны в прямоугольных волноводах.....	138
6.3. Волноводы круглого поперечного сечения.....	140
6.4. Распространение <i>H</i> -волн в волноводах круглого сечения..	146
6.5. Радиальный волновод.....	152
6.6. Энергетические потери энергии в линиях передачи.....	154
6.7. Возбуждение электромагнитных волн в волноводах.....	158
6.8. Возбуждение радиального волновода элементом Гюйгенса	161
6.9. Возбуждение радиального волновода рупорным облучателем.....	171
Вопросы к главе 6.....	178
Глава 7. Объемные резонаторы.....	179
7.1. Цилиндрический объёмный резонатор.....	179
7.2. Добротность объёмных резонаторов.....	183
7.3. Объёмные резонаторы сложной геометрической формы..	186
Вопросы к главе 7.....	187
Приложение 1. Элементы векторной алгебры.....	188
Приложение 2. Коаксиальные кабели.....	189
Приложение 3. СВЧ волноводы.....	192