

Министерство образования и науки Российской Федерации
Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

В. А. Романюк

ОСНОВЫ РАДИОСВЯЗИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МОСКВА
ЮРАЙТ
ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ
2009

УДК 621.3
ББК 32.84я73
Р69



Настоящая методическая разработка выполнена в рамках инновационной образовательной программы МИЭТ «Современное профессиональное образование для российской инновационной системы в области электроники»

Автор:

Романюк Виталий Александрович — кандидат технических наук, доцент МИЭТ.

Романюк, В. А.

Р69 Основы радиосвязи : учеб. пособие / В. А. Романюк. — М. : Издательство Юрайт; Высшее образование. — 287 с. — (Основы наук).

ISBN 978-5-9916-0129-0 (Издательство Юрайт)

ISBN 978-5-9692-0254-2 (Высшее образование)

В пособии изложены механизмы работы систем и устройств радиосвязи. Значительное внимание уделено радиоволнам — их генерированию, излучению, распространению в различных средах, линиях передачи и околоземном пространстве. Приведены основные характеристики и параметры антенн, передатчиков и приемников. Описаны процессы, происходящие в связных радиосистемах: генерирование электромагнитных колебаний, формирование радиосигналов, усиление их мощности, выделение слабых сигналов из помех, преобразование частоты, детектирование.

Приведены основные данные о радиосистемах, их дальности действия, помехоустойчивости, способах оптимального приема. В последней главе описаны современные системы и стандарты радиосвязи.

Для студентов вузов, обучающихся по специальностям 09010465 «Комплексная защита объектов информации», 23010165 «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети», 21040465 «Многоканальные телекоммуникационные системы», 21040365 «Защищенные системы связи», 23010062 «Информатика и вычислительная техника (бакалавр)», 23010068 «Информатика и вычислительная техника (магистр)», 21040062 «Телекоммуникации (бакалавр)», 21040068 «Телекоммуникации (магистр)».

УДК 621.3
ББК 32.84я73

ISBN 978-5-9916-0129-0
(Издательство Юрайт)
ISBN 978-5-9692-0254-2
(Высшее образование)

© Романюк В. А., 2009
© ООО «Высшее образование», 2009

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 7 |
| Глава 1. Радиоволны | 10 |
| 1.1. Электромагнитное поле | 10 |
| 1.2. Уравнения Максвелла | 12 |
| 1.3. Радиоволны в идеальном диэлектрике без зарядов | 14 |
| 1.4. Энергия электромагнитного поля | 16 |
| 1.5. Монохроматические волны в идеальном пространстве | 17 |
| 1.6. Поляризация радиоволн | 19 |
| 1.7. Представление монохроматических волн в виде комплексных амплитуд | 21 |
| 1.8. Радиоволны в диэлектрике с потерями энергии | 23 |
| 1.9. Радиоволны в проводниках. Скин-эффект | 26 |
| Глава 2. Радиоволны в линиях передачи | 30 |
| 2.1. Типы передающих линий | 30 |
| 2.2. Поперечно-магнитные волны | 33 |
| 2.3. Поперечно-электрические волны | 36 |
| 2.4. Фазовая и групповая скорости волн | 36 |
| 2.5. Длина волны в линии | 38 |
| 2.6. Затухающие электромагнитные поля | 38 |
| 2.7. Радиоволны в прямоугольном волноводе | 39 |
| 2.8. Волны <i>TEM</i> -типа | 42 |
| 2.9. Телеграфные уравнения | 44 |
| 2.10. Решение телеграфных уравнений | 47 |
| 2.11. Режимы работы линий передачи | 48 |
| 2.12. Коэффициент стоячей волны напряжения. Коэффициент отражения | 52 |
| 2.13. Передача энергии в нагрузку | 53 |
| 2.14. Условия существования режима бегущих волн | 54 |
| Глава 3. Излучение и распространение радиоволн | 57 |
| 3.1. Диполь Герца | 57 |
| 3.2. Ближняя и дальняя зоны излучателя | 60 |
| 3.3. Диаграмма направленности антенны | 63 |
| 3.4. Излучение рамочной антенны | 65 |
| 3.5. Излучение плоскости | 66 |
| 3.6. Типы антенн | 67 |
| 3.7. Основные параметры антенн | 71 |
| 3.8. Влияние атмосферы на распространение радиоволн | 75 |

| | |
|--|------------|
| 3.9. Особенности распространения радиоволн в различных частотных диапазонах..... | 77 |
| Глава 4. Генерирование электромагнитных колебаний..... | 81 |
| 4.1. Структурная схема автогенератора..... | 81 |
| 4.2. Негатронная модель автогенератора..... | 83 |
| 4.3. Резонаторы автогенераторов..... | 85 |
| 4.4. Транзисторные автогенераторы..... | 92 |
| 4.5. Условия существования стационарного режима колебаний..... | 95 |
| 4.6. Устойчивость стационарного режима и условие возбуждения колебаний..... | 98 |
| 4.7. Стабильность частоты колебаний..... | 100 |
| 4.8. Шумы в автогенераторах..... | 103 |
| 4.9. Электрические схемы транзисторных автогенераторов..... | 107 |
| 4.10. Кварцевые автогенераторы..... | 109 |
| 4.11. Генераторы, управляемые напряжением..... | 114 |
| Глава 5. Синтез частот..... | 120 |
| 5.1. Фазовая автоподстройка частоты автогенераторов..... | 120 |
| 5.2. Описание элементов цепи ФАПЧ..... | 122 |
| 5.3. Передаточные характеристики петли ФАПЧ автогенераторов..... | 125 |
| 5.4. Фильтрующие свойства петли ФАПЧ..... | 128 |
| 5.5. Устойчивость системы ФАПЧ..... | 131 |
| 5.6. Фазовый шум автогенератора, охваченного петлей ФАПЧ..... | 134 |
| 5.7. Шпоры в выходном спектре ГУНа..... | 138 |
| 5.8. Синтезаторы частот..... | 139 |
| Глава 6. Усиление мощности электромагнитных колебаний..... | 144 |
| 6.1. Структура усилителя мощности..... | 144 |
| 6.2. Технические требования, предъявляемые к усилителям мощности..... | 146 |
| 6.3. Характеристики и параметры биполярного транзистора..... | 148 |
| 6.4. Механизм работы транзистора как активного элемента..... | 149 |
| 6.5. Линейный режим работы транзистора в усилителе мощности..... | 151 |

| | |
|--|------------|
| 6.6. Более эффективные режимы работы транзистора | 154 |
| 6.7. Оптимальное сопротивление нагрузки транзистора в усилителе мощности..... | 159 |
| 6.8. Оптимальные режимы биполярного транзистора в мощных усилителях..... | 161 |
| 6.9. Согласование транзистора с источником сигнала и нагрузкой..... | 163 |
| 6.10. Усилители мощности диапазона СВЧ..... | 165 |
| 6.11. Увеличение коэффициента усиления, выходной мощности и КПД усилителей | 170 |
| Глава 7. Формирование радиосигналов | 176 |
| 7.1. Видеосигналы и радиосигналы..... | 176 |
| 7.2. Амплитудная модуляция | 178 |
| 7.3. Однополосная модуляция | 182 |
| 7.4. Частотная модуляция..... | 186 |
| 7.5 Модуляция цифровыми сигналами | 191 |
| Глава 8. Прием и преобразование радиосигналов | 200 |
| 8.1. Шумы в радиоприемниках..... | 200 |
| 8.2. Основные параметры и функциональные схемы радиоприемников..... | 203 |
| 8.3. Физические процессы в супергетеродинном приемнике | 206 |
| 8.4. Преобразователи частоты..... | 208 |
| 8.5. Транзисторные смесители..... | 211 |
| 8.6. Детектирование радиосигналов | 212 |
| Глава 9. Общие сведения о радиосистемах связи | 220 |
| 9.1. Структурная схема цифровой связной радиосистемы | 221 |
| 9.2. Обнаружение сигналов | 224 |
| 9.3. Способы увеличения отношения сигнал/шум в приемнике радиостанции | 228 |
| 9.4. Псевдослучайная последовательность импульсов | 232 |
| 9.5. Корреляционный способ обнаружения | 235 |
| 9.6. Дальность действия связной радиостанции | 237 |
| Глава 10. Современные системы радиосвязи | 240 |
| 10.1. Виды связных радиосистем..... | 240 |
| 10.2. Транкинговые системы..... | 241 |
| 10.3. Беспроводные сети | 243 |

| | |
|--|-----|
| 10.4. Стандарты беспроводной связи..... | 245 |
| 10.5. Стандарт Bluetooth..... | 247 |
| 10.6. Стандарт DECT | 250 |
| 10.7. Сотовые системы связи | 252 |
| 10.8. Спутниковые системы..... | 257 |
| 10.9. Системы связи без несущей частоты..... | 258 |
| Заключение | 262 |
| Приложения | 264 |
| Литература | 288 |

Введение

Передача информации в пространстве с помощью радиоволн осуществлялась со времени изобретения радио в конце XIX в. В настоящее время интерес к радиосвязи возрос в связи с тенденцией отказа от проводов. Появился модный термин «беспроводная связь» (*Wireless*), что является синонимом «радиосвязь».

Передают обычно речь, музыку, тексты, изображение и др. Эту информацию преобразуют в видеосигнал, т.е. зависимость тока или напряжения от времени. Видеосигнал может быть аналоговым, как в имеющихся и отживающих системах, либо цифровым — в новейших системах. В последнем случае аналоговый сигнал преобразуется в поток цифр, как правило, записанных в двоичном виде.

С этой целью осуществляется квантование аналогового видеосигнала по времени и уровню. В результате каждому дискретному моменту времени ставится в соответствие ближайший цифровой уровень. Поток цифр посредством импульсно-кодовой модуляции преобразуется в двоичный вид. В конечном итоге передаче подлежит поток единиц и нулей, представляющих собой начальную информацию.

Спектр видеосигнала, в какой бы форме он ни был представлен — аналоговой или цифровой, — содержит весьма низкие частоты порядка герц и килогерц. Такие частоты бесполезно излучать в пространство, поскольку, как это будет показано в дальнейшем, антенна излучает только в том случае, когда ее размеры соизмеримы с длиной излучаемой волны или превышают ее.

Необходимо переместить спектр видеосигнала по оси частот вверх в тот диапазон, частоты которого эффективно излучаются. С этой целью необходимо осуществить две операции:

- 1) создать высокочастотное электромагнитное поле;
- 2) преобразовать видеосигнал в радиосигнал путем модуляции видеосигналом высокочастотных колебаний.

Эти операции выполняются в передатчике радиосистемы. Высокочастотные электромагнитные колебания называют несущими, поскольку они переносят информацию.

Ширину излучаемого спектра стремятся ограничить, с тем чтобы не создавать помехи другим станциям. С целью

ограничения спектра видеосигнал подвергают специальной обработке — фильтрованию и кодированию.

В соответствии с основными функциями, выполняемыми передатчиком, его обобщенная схема приведена на рис. В.1.

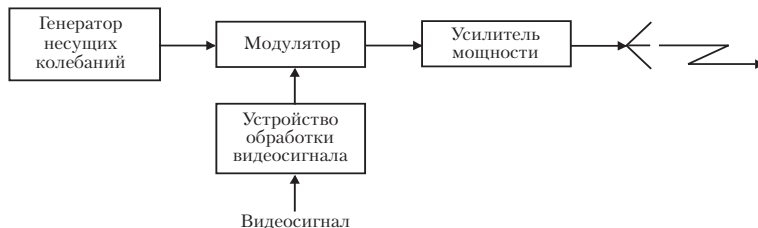


Рис. В.1. Обобщенная схема радиопередатчика

В приемную антенну радиосигнал поступает весьма ослабленным. Кроме него в антенне имеются помехи, обусловленные внешними наводками либо собственными шумами приемника, а также сигналы других радиостанций. Задача приемника состоит в том, чтобы, во-первых, выделить полезный радиосигнал из помех и, во-вторых, извлечь из принятого сигнала переданную информацию. Выделение радиосигнала осуществляется фильтрованием, извлечение информации — демодуляцией.

Успешно отфильтровать помехи и мешающие сигналы можно в том случае, когда частота полезного сигнала невелика. С этой целью в приемниках предусмотрено понижение принятой несущей частоты до некоторой промежуточной, на которой и осуществляется основная фильтрация. Типичная блок-схема радиоприемника приведена на рис. В.2.

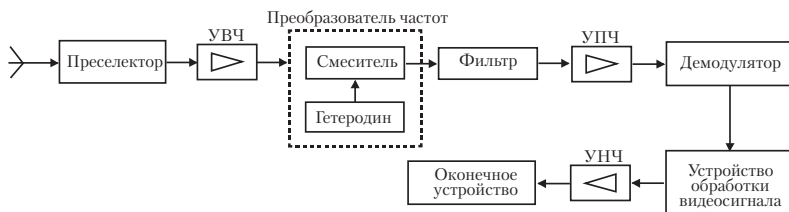


Рис. В.2. Блок-схема радиоприемника

Преселектором является предварительный фильтр, настроенный на частоту полезного сигнала и устраняющий

перегрузку усилителя высокой частоты (УВЧ). В схеме имеется преобразователь частоты, состоящий из смесителя и высокочастотного генератора, называемого гетеродином. На выходе преобразователя стоит фильтр, выделяющий промежуточную частоту и отфильтровывающий все мешающие сигналы.

Усиление слабых сигналов осуществляется на трех частотах: высокой — усилитель высокой частоты (УВЧ), промежуточной — усилитель промежуточной частоты (УПЧ) и низкой — усилитель низкой частоты (УНЧ), где усиливается выделенный видеосигнал. В результате удается достигнуть весьма высокого усиления — от микровольт на входе до единиц вольт на выходе.

Оконечным устройством в приемнике могут быть динамический громкоговоритель, наушники, цифровое устройство, экран и др.

В радиосистемах связи осуществляются следующие основные операции:

- генерирование электромагнитных колебаний несущей частоты;
- обработка видеосигнала;
- модуляция колебаний несущей частоты видеосигналом, т.е. образование радиосигнала;
- усиление мощности радиосигнала;
- преобразование частоты;
- демодуляция.

В настоящем пособии рассмотрены эти процессы. Существенное внимание уделено радиоволнам, их формированию, распространению и излучению.

Глава 1

РАДИОВОЛНЫ

1.1. Электромагнитное поле

Радиоволны — это распространяющиеся в среде электромагнитные колебания, частоты которых лежат в диапазоне 3 кГц—3 ТГц, что соответствует длинам волн в вакууме от 100 км до 0,1 мм. Электромагнитные волны есть форма существования электромагнитного поля, которое определяется следующими основными физическими величинами:

- вектором напряженности электрического поля \vec{E} , В/м или Н/Кл;
- вектором магнитной индукции \vec{B} , Тл.

Напряженность \vec{E} — это сила \vec{F} , действующая со стороны электрического поля на тело, имеющее электрический заряд $Q = 1$ Кл:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Магнитная индукция \vec{B} — это сила \vec{F}_A магнитного поля, действующая на проводник длиной $l = 1$ м, по которому протекает ток $I = 1$ А, при условии, что вектор \vec{B} перпендикулярен проводнику:

$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}_A|}{Il}.$$

Параметры среды

Условия распространения радиоволн в различных средах имеют особенности в зависимости от параметров среды. Для распространения радиоволн важны следующие параметры.

1. Абсолютная диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon = \epsilon' \epsilon_0,$$

где ϵ' — относительная диэлектрическая проницаемость, ($\epsilon' \geq 1$), которая показывает, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля в среде по сравнению с вакуумом; $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная.

2. Абсолютная магнитная проницаемость

$$\mu = \mu' \mu_0,$$

где μ' — относительная магнитная проницаемость (для ферромагнитных сред $\mu' \gg 1$), которая показывает, во сколько раз увеличивается магнитная индукция B в магнитной среде по сравнению с вакуумом; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

3. Удельная электропроводность g — это коэффициент пропорциональности между плотностью тока проводника \vec{j} и напряженностью электрического поля \vec{E} :

$$\vec{j}_{\text{уп}} = g\vec{E}. \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) — это закон Ома в дифференциальной форме.

Дополнительные векторы электромагнитного поля

Наряду с основными физическими величинами \vec{E} и \vec{B} , характеризующими поле, применяют дополнительные:

- вектор электрической индукции

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \text{ [Кл/м}^2\text{]};$$

- вектор напряженности магнитного поля

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \text{ [А/м]}.$$

При изучении распространения радиоволн обычно применяется пара векторов \vec{E} и \vec{H} , поскольку уравнения поля получаются симметричными [1].

Скалярные величины, характеризующие электромагнитное поле

Наряду с векторами для описания поля применяют скалярные величины:

1) *потенциал электрического поля*

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q} \text{ [В]},$$

где $W_{\text{п}}$ — потенциальная энергия заряда Q в электрическом поле;

2) *магнитный поток*

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \text{ [Вб]},$$

где интеграл от скалярного произведения векторов \vec{B} и $d\vec{S}$ (перпендикуляр к элементу поверхности площадью dS) берется по замкнутой поверхности S .

1.2. Уравнения Максвелла

Теория электромагнитного поля основана на уравнениях Максвелла, которые он сформулировал в Трактате по электричеству и магнетизму, опубликованном в 1873 г.

При выводе уравнений для переменного электромагнитного поля Дж. К. Максвелл использовал известные уравнения статических электрического и магнитного полей (т.е. постоянных во времени) (см. приложение 1), дополнив их двумя идеями (см. приложение 2):

1) вокруг линий переменной во времени магнитной индукции \vec{B} возникают замкнутые силовые линии напряженности электрического поля \vec{E} ;

2) вокруг линий переменного электрического поля возникают линии магнитной индуктивности, порождаемые током смещения $I_{\text{см}}$ плотностью $\vec{j}_{\text{см}}$:

$$\vec{j}_{\text{см}} = \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt}.$$

Отсюда следует, что замкнутые линии вектора магнитной индукции \vec{B} возникают не только вокруг вектора плотности тока проводимости (т.е. вокруг траектории движущихся электрических зарядов), но и вокруг силовых линий \vec{E} , если E меняется во времени.

Число уравнений Максвелла, представленных в Трактате, было приведено Г. Герцем и О. Хевисайдом к совре-

менному компактному виду. В настоящее время принята следующая запись уравнений Максвелла.

| Дифференциальная форма | Интегральная форма |
|--|---|
| 1) $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{np}} + \varepsilon \frac{d\vec{E}}{dt};$ | $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{np}} + I_{\text{cm}};$ |
| 2) $\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt};$ | $\oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt};$ |
| 3) $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho_3}{\varepsilon};$ | $\int_s \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon};$ |
| 4) $\operatorname{div} \vec{H} = 0;$ | $\int_s \vec{H} d\vec{S} = 0.$ |

Здесь I_{np} — ток проводимости:

$$I_{\text{np}} = \int_s \vec{j}_{\text{np}} d\vec{S},$$

где в правой части — интеграл по замкнутой поверхности S от скалярного произведения векторов \vec{j} и $d\vec{S}$; ρ_3 — плотность электрического заряда q :

$$q = \int_V \rho_3 dV.$$

Ротор вектора напряженности магнитного поля $\operatorname{rot} \vec{H}$ (или электрического поля $\operatorname{rot} \vec{E}$) — это вектор, который в декартовой системе координат может быть записан в виде определителя:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \begin{vmatrix} \vec{i}_x & \vec{i}_y & \vec{i}_z \\ \frac{d}{dx} & \frac{d}{dy} & \frac{d}{dz} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix},$$

где $\vec{i}_x, \vec{i}_y, \vec{i}_z$ — единичные векторы, направленные по осям x, y, z ; H_x, H_y, H_z — проекции вектора \vec{H} на оси координат.

Дивергенция вектора напряженности электрического поля $\operatorname{div} \vec{E}$ (или магнитного поля $\operatorname{div} \vec{H}$) — это скалярная величина, вычисляемая в декартовой системе координат по формуле

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{dE_x}{dx} + \frac{dE_y}{dy} + \frac{dE_z}{dz},$$

где E_x, E_y, E_z — проекции вектора \vec{E} на соответствующие оси.

Геометрический смысл уравнений Максвелла в дифференциальной форме следующий. Ротор вектора — это ось, вокруг которой закручиваются замкнутые линии соответствующего поля. Из первого уравнения Максвелла следует, что такой осью для магнитного поля являются линии плотности тока проводимости $\vec{j}_{\text{пр}}$ или линии напряженности электрического поля \vec{E} , если E меняется со временем.

Из второго уравнения Максвелла следует, что осью возникающих замкнутых линий электрического поля \vec{E} являются силовые линии магнитного поля \vec{H} , при условии, что H зависит от времени.

Дивергенция вектора — это точка в пространстве, откуда начинаются незамкнутые силовые линии поля. Из третьего уравнения Максвелла очевидно, что незамкнутые силовые линии напряженности электрического поля \vec{E} начинаются в точках, где есть электрические заряды плотностью ρ_3 . Из четвертого уравнения Максвелла следует, что незамкнутых линий напряженности магнитного поля не существует.

Решая уравнения Максвелла в различных средах, можем найти шесть проекций векторов \vec{E} и \vec{H} : $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$.

1.3. Радиоволны в идеальном диэлектрике без зарядов

Идеальный диэлектрик — это такой диэлектрик, в котором нет токов, т.е. в соответствии с (1.1) проводимость $g = 0$. Если для упрощения решения принять, что в диэлектрике нет зарядов, т.е. $q = 0$ (или $\rho_3 = 0$), а электромагнитное поле меняется только вдоль одной оси z , в то время как

$$\frac{d\vec{E}}{dx} = \frac{d\vec{E}}{dy} = 0, \quad \frac{d\vec{H}}{dx} = \frac{d\vec{H}}{dy} = 0,$$

то решение уравнений Максвелла приводит к волновым уравнениям для двух проекций векторов напряженности \vec{E} и \vec{H} , сдвинутых в пространстве на 90° ; например, для проекций E_x и H_y (см. приложение 3):

$$\frac{d^2 H_y}{dz^2} - \epsilon\mu \frac{d^2 H_y}{dt^2} = 0;$$

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} - \epsilon\mu \frac{d^2 E_x}{dt^2} = 0,$$

где t — текущее время.

Решением уравнений являются волновые функции $H_y(t - \frac{z}{v})$, $H_y(t + \frac{z}{v})$ и $E_x(t - \frac{z}{v})$, $E_x(t + \frac{z}{v})$, где $H_y(t - \frac{z}{v})$ и $E_x(t - \frac{z}{v})$ — прямые волны, распространяющиеся вдоль оси z , а $H_y(t + \frac{z}{v})$ и $E_x(t + \frac{z}{v})$ — обратные волны, бегущие в противоположном направлении. В полученных решениях применено обозначение

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (1.2)$$

Параметр v имеет размерность м/с и является скоростью распространения электрической волны. Для вакуума $\epsilon = \epsilon_0$, $\mu = \mu_0$ и $v = c$ ($c = 3 \cdot 10^8$) м/с. В любой среде, где $\epsilon' \neq 1$ и $\mu' \neq 1$,

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'\mu'}}.$$

В приложении 3 записана связь E_x и H_y :

$$E_x = \rho H_y. \quad (1.3)$$

Величина $\rho = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ имеет размерность Ом и называется волновым сопротивлением среды. В вакууме $\rho_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$.

Итак, в идеальном диэлектрике при сделанных допущениях решением уравнений Максвелла являются уравнения электромагнитных волн, движущихся вдоль оси z в прямом и обратном направлениях со скоростью v . Прямая

волна распространяется от источника электромагнитных колебаний, а обратная возникает при наличии отражений.

1.4. Энергия электромагнитного поля

Если в пространстве существует электромагнитное поле, то в произвольном объеме V имеется энергия

$$W = \int_V (\omega_E + \omega_H) dV,$$

где $\omega_E = \frac{\epsilon E^2}{2}$ — плотность электрической энергии, Дж/м³,

$\omega_H = \frac{\mu H^2}{2}$ — плотность магнитной энергии, Дж/м³.

Поскольку электромагнитное поле существует в виде волн, то оно будет перемещаться в пространстве. В частности, энергия будет выходить или входить в объем V . Для оценки энергии электромагнитных волн введена физическая величина, называемая *вектором Пойнтинга* $\vec{\Pi}$ и равная векторному произведению векторов \vec{E} и \vec{H} :

$$\vec{\Pi} = (\vec{E} \times \vec{H}) \text{ [Вт / м}^2\text{]}.$$

Величина вектора Пойнтинга

$$\Pi = EH \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами \vec{E} и \vec{H} . В идеальном диэлектрике $\Pi = EH$.

Вектор Пойнтинга $\vec{\Pi}$ перпендикулярен к плоскости расположения векторов \vec{E} и \vec{H} , и его направление определяется «правилом винта» при вращении \vec{E} к \vec{H} по кратчайшему расстоянию (рис. 1.1).

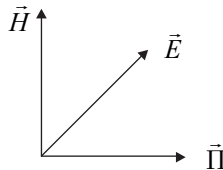


Рис. 1.1. Взаимная ориентация векторов \vec{E} , \vec{H} и $\vec{\Pi}$

Поэтому Π — это энергия электромагнитного поля, проходящая в единицу времени через поверхность единичной площади, т.е. плотность потока мощности.

Энергия электромагнитного поля, выходящая из объема V в единицу времени, определяется формулой

$$P = \int_S \vec{\Pi} d\vec{S},$$

где под интегралом — скалярное произведение векторов $\vec{\Pi}$ и $d\vec{S}$, а интеграл берется по замкнутой поверхности S , ограничивающей объем V .

В случае если диэлектрик в объеме V — неидеальный ($g \neq 0$), то возникают токи проводимости плотностью $\vec{j}_{\text{пр}}$, и в соответствии с законом Джоуля — Ленца часть энергии электромагнитного поля преобразуется во внутреннюю (тепловую) энергию диэлектрика.

Закон сохранения энергии определяется теоремой Пойнтинга:

$$-\frac{dW}{dt} = \int_S \vec{\Pi} d\vec{S} + P_{\text{пот}}.$$

Здесь в левой части — скорость убывания энергии поля в объеме V ; $P_{\text{пот}}$ — количество теплоты, выделяющейся в 1 с в диэлектрике за счет протекания токов, т.е. мощность потерь, причем

$$P_{\text{пот}} = \int_V \vec{j}_{\text{пр}} \vec{E} dV,$$

где скалярное произведение $\vec{j}_{\text{пр}} \vec{E}$ — это плотность мощности потерь, т.е. количество теплоты, выделяемой в единицу времени.

В соответствии с теоремой Пойнтинга изменение энергии электромагнитного поля в объеме V происходит по двум причинам. Во-первых, за счет движения энергии в пространстве, во-вторых, за счет нагревания диэлектрика при протекании токов проводимости.

1.5. Монохроматические волны в идеальном пространстве

Радиосигнал представляет собой сложную зависимость величин E и H от времени, спектр сигнала содержит мно-

жество частот. Если сигнал узкополосный, то его спектр сосредоточен вблизи несущей частоты, и можно в первом приближении полагать, что колебания $E(t)$ и $H(t)$ имеют гармоническую форму, т.е. спектр содержит только одну частоту f , Гц (или циклическую частоту ω , рад/с).

Электромагнитные волны, у которых спектр колебаний содержит одну частоту, называют монохроматическими. Введение понятия монохроматических волн существенно упрощает анализ.

Предположим, что колебания распространяются вдоль одной оси z , т.е. $E(t, z)$ и $H(t, z)$ — функции двух переменных t и z . В некоторой точке пространства $z = 0$ имеется источник электромагнитного поля

$$E(t, 0) = E_m \cos \omega t,$$

где E_m — амплитуда колебаний.

Аналогично изменяется во времени и $H(t, 0)$.

Считаем, что источник колебаний создает поле, которое не меняется по координатам x и y . В точке $z \neq 0$ напряженность электрического поля

$$E(t, z) = E_m \cos \omega \left(t - \frac{z}{v} \right),$$

где v — скорость распространения волны, или

$$E(t, z) = E_m \cos(\omega t - \beta z).$$

Постоянная распространения

$$\beta = \frac{\omega}{v} \tag{1.4}$$

называется фазовым множителем. Если учесть, что $\omega = 2\pi f$, а длина волны $\lambda = \frac{v}{f}$, то

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

и имеет другое название — *волновой множитель*, или *волновое число*.

Мгновенная фаза колебаний

$$\psi = \omega t - \beta z - \tag{1.5}$$

функция времени и координаты.

Если объединить в пространстве все точки, в которых колебания синфазны, т.е. $\psi = \text{const}$, то получим поверхность равных фаз. На этой поверхности в данный момент времени значения E одинаковы. Поверхность равных фаз называется волновой поверхностью. В рассматриваемом случае волновая поверхность является плоскостью, простирающейся в пространстве бесконечно вдоль координат y и x .

Вдоль оси z плоскость движется с фазовой скоростью

$$v_{\phi} = \frac{dz}{dt}. \text{ Из (1.5) следует, что } z = \frac{\omega t - \psi}{\beta} \text{ и фазовая скорость}$$

$$v_{\phi} = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta}, \text{ т.е. совпадает со скоростью } v, \text{ определяемой (1.2).}$$

Итак, если источник поля создает гармонические колебания в плоскости $z = 0$, то в идеальном диэлектрике возникает плоская монохроматическая волна, у которой векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются по закону

$$E(t, z) = E_m \cos(\omega t - \beta z);$$

$$H(t, z) = H_m \cos(\omega t - \beta z)$$

и сдвинуты в пространстве на угол 90° , фазовая скорость волны равна $V_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$, а связь амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей определяется формулой (1.3).

Запишем, в каком соотношении находятся энергии электрического и магнитного полей в плоской волне.

Плотность энергии электрического поля $w_E = \frac{\epsilon E^2}{2}$, учитывая (1.3), получаем

$$w_E = \frac{\epsilon H^2}{2} = w_H.$$

Таким образом, энергия плоской волны состоит из равных долей энергий электрического и магнитного полей.

1.6. Поляризация радиоволн

Электромагнитные волны бывают поляризованными и неполяризованными. Волны называются *поляризованными*-