

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>7</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>9</b>
<b>ГЛАВА 1.</b>	
<b>ОБЩАЯ ТЕОРИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>11</b>
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ .....	11
1.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН МЕЖДУ ДВУМЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ .....	15
1.3. СКАЛЯРНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ДЛЯ РЕГУЛЯРНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ И ИХ ОБЩЕЕ РЕШЕНИЕ .....	19
1.4. ДИСПЕРСИЯ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ .....	26
1.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ СВОБОДНЫХ ВОЛН В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ .....	32
1.6. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ МЕМБРАННОЙ ФУНКЦИИ.....	37
1.7. СПЕКТР ТИПОВ ВОЛН В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ И ИХ ОРТОГОНАЛЬНОСТЬ.....	41
1.8. ПЕРЕДАВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ И ЗАТУХАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ.....	49
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	56
<b>ГЛАВА 2.</b>	
<b>ОДНОСВЯЗНЫЕ ЗАКРЫТЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ....</b>	<b>58</b>
2.1. ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД.....	58
2.2. ОСНОВНОЙ ТИП ВОЛНЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ.....	65
2.3. КРУГЛЫЙ ВОЛНОВОД .....	71
2.4. ВОЛНОВОДЫ СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ.....	81
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	87

**ГЛАВА 3.****МНОГОСВЯЗНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ .....89**

- 3.1. Поперечные волны в многосвязных ЛП..... 89
- 3.2. Нормальные волны в многопроводных ЛП ..... 96
- 3.3. Передаваемая мощность и затухание ..... 99
- 3.4. Двухпроводная симметричная ЛП ..... 102
- 3.5. Коаксиальная линия передачи..... 105
- 3.6. Радиальная линия передачи ..... 111
- 3.7. Полосковые линии передачи ..... 113
- Контрольные вопросы ..... 123

**ГЛАВА 4.****ОТКРЫТЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ .....125**

- 4.1. Металлодиэлектрические открытые ЛП ..... 125
- 4.2. Общие свойства  
диэлектрических волноводов..... 127
- 4.3. Плоский диэлектрический волновод ..... 131
- 4.4. Круглый диэлектрический волновод ..... 140
- 4.5. Структура и параметры  
диэлектрических волноводов. Световоды ..... 146
- 4.6. Квазиоптические линии передачи ..... 151
- Контрольные вопросы ..... 153

**ГЛАВА 5.****ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ .....154**

- 5.1. Условия существования медленных волн .... 154
- 5.2. Свойства симметрии замедляющих систем... 159
- 5.3. Волны в периодических структурах.  
Пространственные гармоники ..... 166
- 5.4. Характеристики и параметры  
замедляющих систем ..... 175
- 5.5. Основные типы замедляющих систем ..... 182
  - 5.5.1. Гребенчатые замедляющие системы..... 182
  - 5.5.2. Спиральные замедляющие системы ..... 189
  - 5.5.3. Стержневые замедляющие системы ..... 194
  - 5.5.4. Резонаторные замедляющие системы..... 201
- Контрольные вопросы ..... 207

**ГЛАВА 6.****ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ.....209****6.1. Принцип действия**

и основные типы объемных резонаторов ..... 209

**6.2. Общие свойства и параметры**

свободных колебаний в резонаторах ..... 215

**6.3. Закрытые волноводные резонаторы ..... 225****6.4. Закрытые**

аксиально-симметричные резонаторы..... 237

**6.5. Диэлектрические резонаторы ..... 248****6.6. Открытые волноводные резонаторы ..... 251****6.7. Открытые зеркальные резонаторы ..... 259**

Контрольные вопросы ..... 262

**ГЛАВА 7.****НЕРЕГУЛЯРНЫЕ****ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....264****7.1. Возбуждение волн в линиях передачи ..... 264****7.2. Элементы возбуждения ..... 268****7.3. Возбуждение колебаний**

в объемных резонаторах ..... 272

**7.4. Расчет коэффициентов возбуждения**

в ЛП и резонаторах ..... 279

**7.5. Теория возмущений ..... 285****7.6. Неоднородности в линиях передачи..... 292**

Контрольные вопросы ..... 302

**ГЛАВА 8.****ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ****ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ .....304****8.1. Постановка**

начально-краевых задач электродинамики

и основные этапы их решения ..... 304

**8.2. Основные классы**

начально-краевых задач электродинамики

и их математическая формулировка ..... 307

**8.3. Основные методы численного решения**

краевых задач электродинамики ..... 313

**8.4. Метод конечных разностей ..... 325****8.5. Метод конечных элементов ..... 330**

8.6. СТРУКТУРА ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ .....	337
8.7. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	342
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	346
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>348</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Направленные электромагнитные волны играют очень важную роль в современных микроволновых устройствах. Они позволяют существенно сократить потерю энергии при распространении от генератора к потребителю, ограничивая направления распространения волн в одном или двух измерениях. Начало теории и техники направленных волн было положено английским физиком О. Хэвисайдом. В 1874–1881 гг. он опубликовал ряд работ, в которых были предложены «телеграфные уравнения», описывающие распространение сигналов по длинным двухпроводным линиям. Это было очень важно в то время, когда телеграфные кабели быстро соединяли города и страны и был проложен первый трансатлантический кабель. Работы Хэвисайда позволили уменьшить искажения сигналов в этих кабелях и тем самым повысить скорость передачи информации.

В настоящее время в микроволновой технике используются самые разные типы линий передачи, но при анализе распространения сигналов в них до сих пор используются обобщенные телеграфные уравнения как частный случай уравнений Максвелла.

В зависимости от частотного диапазона, мощности передаваемого сигнала и допустимого затухания в микроволновой технике используют самые разные направляющие системы. Эти системы ограничивают распространение электромагнитных волн в одном или двух измерениях. Изучение законов распространения волн в этих системах составляет существенную часть теории направленных электромагнитных волн.

Изучение электромагнитных колебаний в объемных резонаторах — устройствах, в которых распространение

электромагнитных волн ограничено во всех направлениях, составляет другую важную часть теории направленных волн. Наконец, изучение распространения электромагнитных волн в новых материалах, таких как фотонные кристаллы, двумерные материалы типа графена, составляют еще одну, быстро развивающуюся область теории направленных волн.

Настоящий учебник, как надеется автор, позволит студентам достаточно подробно ознакомиться с направленными электромагнитными волнами и системами, ограничивающими их распространение в одном или двух измерениях. Он написан на основе лекций, читаемых автором для магистрантов Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ).

Автор выражает глубокую благодарность всем, кто помогал ему написать эту книгу, — коллегам по университету и работникам издательства.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то что первые устройства, осуществляющие направленную передачу электромагнитных волн, появились еще в конце XIX в., быстрое развитие этой отрасли науки и техники началось только в 1930-е гг., когда появилась возможность создавать электромагнитные колебания высокой и сверхвысокой частоты. Большой импульс получило развитие направленных волн в связи с совершенствованием радаров в годы Второй мировой войны.

В настоящее время устройства, ограничивающие распространение электромагнитных волн в одном или двух измерениях (направляющие системы), широко используются в радиолокационных станциях, системах телекоммуникаций, в том числе системах связи с искусственными космическими объектами, в радиотелескопах, радиоспектроскопии, ускорителях заряженных частиц, в биологии и медицине, в технологических установках тепловой обработки материалов.

Типы направляющих систем, используемых в микроволновых устройствах, зависят от частоты сигналов. На сравнительно низких частотах (до 3 ГГц) обычно используются двухпроводные или коаксиальные линии передачи. На более высоких частотах используются прямоугольные волноводы и волноводы сложной формы (П-образные, желобковые, гребневые). На еще более высоких частотах (100 ГГц и выше) используются диэлектрические волноводы, волноводы на основе фотонных кристаллов, квазиоптические линии передачи.

Для передачи энергии на небольшие расстояния (в пределах печатной платы или интегральной схемы) используются микрополосковые и щелевые линии пере-

дачи, копланарные волноводы, а также передающие линии на основе графена. Большим разнообразием форм и размеров отличаются объемные резонаторы.

В передачах, которые используются, в частности, для создания замедляющих систем — линий передачи, фазовая скорость волн меньше скорости света в среде, заполняющей эти линии.

Основы теории направляющих систем заложили Л. Хаксли, Л. Бриллюэн, С. Рамо, Дж. Уиннери, Р. Фано, Дж. Саутворт, Дж. Гинзтон и ряд других ученых. Большой вклад в теорию направляющих систем внесли Л. А. Вайнштейн, Ю. А. Юров, Б. В. Каценеленбаум, Г. В. Кисунько, В. В. Никольский, Р. А. Силин и многие другие исследователи.

Для анализа электромагнитного поля во всех этих устройствах используются уравнения Максвелла с соответствующими граничными условиями. Во многих случаях аналитического решения этих уравнений не существует и приходится решать их численно с помощью специальных компьютерных программ.

В данной книге рассматриваются основные типы микроволновых линий передачи, замедляющих систем и резонаторов, их параметры и характеристики, описываются численные методы решения уравнений Максвелла.



# ГЛАВА 1. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

## 1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

До сих пор рассматривались электромагнитные поля и волны, существующие в неограниченном пространстве. Однако часто требуется передавать электромагнитную энергию в определенном направлении. Эта задача решается с помощью специальных технических устройств — *направляющих систем*, обеспечивающих распространение волн только в одном или двух координатных направлениях. К таким системам относятся, в частности, устройства, создающие волновые пучки. Отметим, что существуют и природные направляющие системы. Примером может служить воздушное пространство между поверхностью и ионосферой Земли. Последовательно отражаясь от ионосферы и поверхности Земли, радиоволны дециметрового диапазона огибают земную поверхность, благодаря чему осуществляется радиосвязь на большие расстояния при незначительной мощности передатчиков.

Более точно *электромагнитной направляющей системой* называют совокупность металлических и диэлектрических тел, осуществляющих передачу (канализацию) электромагнитной энергии в определенных направлениях с малым затуханием без излучения в окружающее пространство. Примером могут служить две параллельные, идеально проводящие плоскости  $z = \text{const}$ . Ясно, что электромагнитная волна (свет) может распространяться между этими плоскостями (т. е. в

плоскости  $xOy$ ) в любом направлении, но не может распространяться в направлении оси  $z$ .

Важный класс направляющих систем составляют *линии передачи (ЛП)*, обеспечивающие распространение энергии только в одном направлении — вдоль своей оси. Линии передачи различаются конфигурацией и материалом тел, из которых они образованы. В зависимости от конструкции и материалов направляющие системы и ЛП разделяют на отдельные типы.

*Регулярными* считают ЛП, свойства которых вдоль направления распространения неизменны или меняются по периодическому закону. В первом случае регулярную ЛП называют *продольно-однородной*, во втором — *периодической*. Если свойства ЛП вдоль направления распространения меняются по произвольному закону, ее считают *нерегулярной (продольно-неоднородной)*. В настоящей книге рассматриваются в основном регулярные ЛП.

Если электромагнитное поле ЛП не ограничено в направлениях, перпендикулярных направлению передачи энергии, то ее называют *открытой*. В *закрытых* ЛП электромагнитное поле существует только внутри замкнутой металлической оболочки.

В соответствии с материалом тел, образующих ЛП, их делят на *металлические, диэлектрические и металлодиэлектрические*.

Свойства линий передачи существенно зависят от связности их поперечного сечения. Если любой контур, расположенный в этом сечении, можно стянуть в точку, не пересекая границу раздела диэлектрик — металл, то ЛП называют *односвязной*. В противном случае ЛП *многосвязна*, причем степень связности равна числу различных типов контуров, которые можно выделить в ее поперечном сечении. Различают также ЛП, заполненные однородным в поперечном сечении диэлектриком (*поперечно-однородные ЛП*), и ЛП с *поперечно-неоднородным* заполнением.

Проиллюстрируем приведенную классификацию примерами.

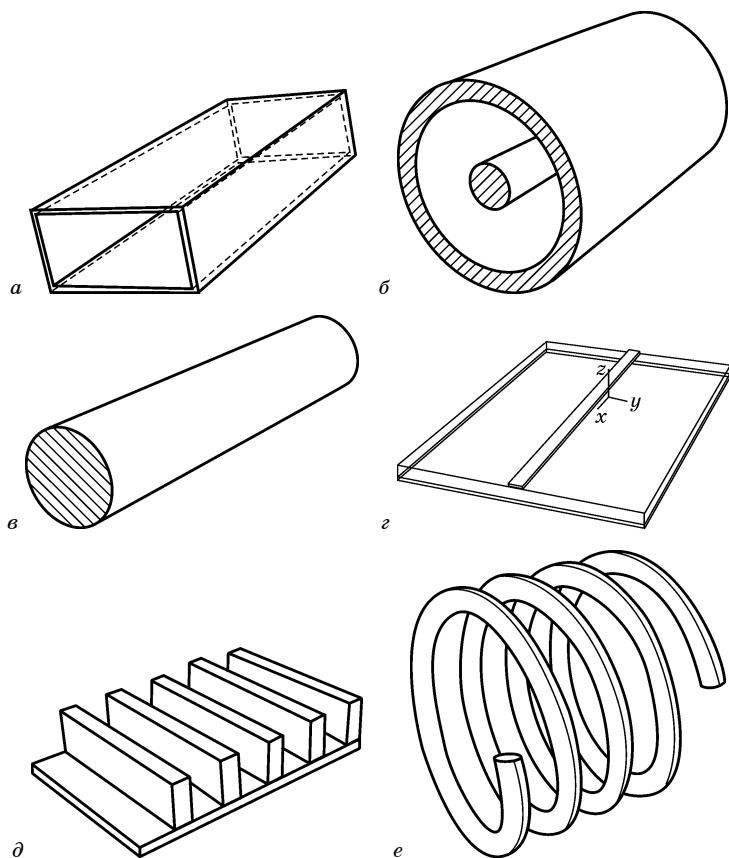


Рис. 1.1

*Некоторые типы регулярных линий передачи*

На рисунке 1.1а изображен *прямоугольный волновод* — закрытая односвязная металлическая ЛП. Как будет показано, по таким металлическим трубам различного поперечного сечения могут при определенных условиях распространяться электромагнитные волны. *Коаксиальный волновод* (рис. 1.1б) — хорошо известный пример закрытой металлической двухсвязной ЛП. *Круглый диэлектрический волновод (ДВ)* (рис. 1.1в) — открытая диэлектрическая односвязная ЛП, которая также может использоваться для передачи электромагнитной энергии

на достаточно высоких частотах, включая оптический диапазон. На рисунке 1.1г изображена открытая двухсвязная поперечно-неоднородная металлодиэлектрическая ЛП, называемая *микрополосковой линией передачи (МПЛ)*. Такие ЛП широко используются в интегральных схемах микроволнового диапазона. Все перечисленные типы линий передачи продольно однородны.

*Гребенчатая* (рис. 1.1д) и *спиральная* (рис. 1.1е) ЛП относятся к периодическим линиям передачи. В микроволновой электронике они используются для замедления электромагнитных волн. Существуют и двумерно периодические направляющие системы, некоторые конструкции которых показаны на рисунке 1.2а (*штыревая*) и 1.2б (*гребенчатая*).

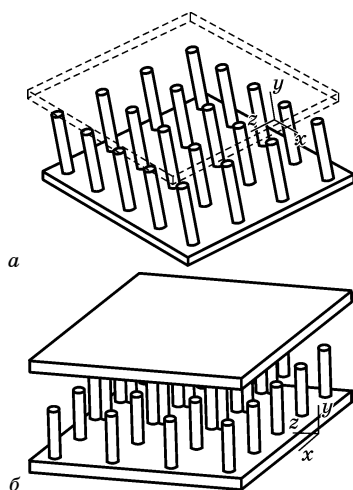


Рис. 1.2

*Двумерно периодические направляющие системы*

Параметры нерегулярных ЛП могут меняться скачком (соединение двух прямоугольных волноводов с различными поперечными размерами, рис. 1.3а) и плавно (круглый волновод с плавным изменением радиуса трубы, рис. 1.3б). Таковую ЛП называют плавно-неоднородной.

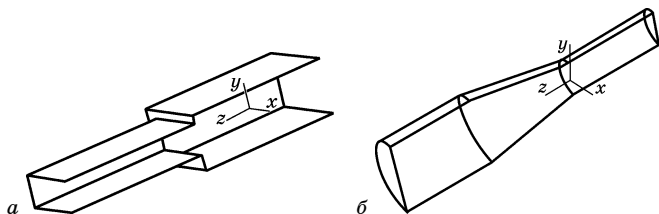


Рис. 1.3

Нерегулярные линии передачи

## 1.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН МЕЖДУ ДВУМЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ

Рассмотрим плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся между двумя параллельными, идеально проводящими плоскостями  $P$  и  $Q$ , многократно отражаясь от них под углом  $\theta$  (рис. 1.4). Для простоты считаем, что пространство между плоскостями заполнено воздухом ( $n = 1$ ). Предположим, что волна линейно поляризована так, что вектор  $\mathbf{E}$  параллелен плоскостям  $P$  и  $Q$  ( $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_y$ ). В точке  $C$  происходит интерференция волны, падающей на нижнюю плоскость в точке  $O$  и отраженной от этой плоскости. Фронты этих волн  $AC$  и  $BC$  показаны на рисунке 1.4 пунктиром. Из граничных условий на идеально проводящей поверхности следует, что суммарное электрическое поле в точке  $C$  равно нулю. Отсюда сдвиг фазы волны  $\Delta\varphi$  на пути  $AOB$  должен быть кратен  $\pi$ :

$$\Delta\varphi = 2kl - \pi = \pi(2m - 1), \quad m = 1, 2, \dots,$$

где  $l$  — длина отрезка  $AO$ . Фазовый угол  $\pi$  в левой части учитывает тот факт, что коэффициент отражения от идеально проводящей поверхности равен минус единице, т. е. фаза волны при отражении меняется на  $180^\circ$ . Приведя подобные члены, получим

$$l = \pi m / k = m\lambda / 2,$$

где  $\lambda = c/f$  — длина волны в среде, заполняющей направляющую систему,  $f$  — частота изменения поля волны.

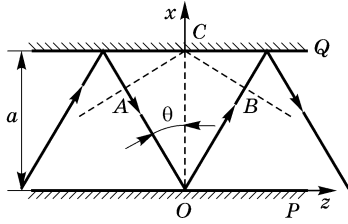


Рис. 1.4

Распространение электромагнитной волны между двумя параллельными, идеально проводящими плоскостями

Из треугольника  $AOC$  следует, что  $l = a \cos \theta$ , где  $a$  — расстояние между плоскостями. Отсюда

$$\cos \theta = m\lambda / (2a). \quad (1.1)$$

Таким образом, угол отражения связан с длиной волны, а следовательно, и с частотой плоской электромагнитной волны. На высоких частотах ( $m\lambda \ll a$ ) угол отражения  $\varphi \ll \pi/2$ , и волна распространяется почти прямолинейно. По мере увеличения длины волны угол  $\varphi$  уменьшается и при  $\lambda = 2a/m$  становится равным нулю. На более низких частотах правая часть (1.1) становится больше единицы, т. е. не существует такого значения угла  $\varphi$ , при котором выполняются граничные условия для обеих плоскостей.

Электромагнитное поле между плоскостями представляет собой суперпозицию падающих и отраженных волн:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}} &= \dot{E}_0 [e^{-ikx \cos \varphi} - e^{ikx \cos \varphi}] e^{-ikz \sin \varphi} \mathbf{e}_y = \\ &= 2i \dot{E}_0 \sin(kx \cos \varphi) e^{-ikz \sin \varphi} \mathbf{e}_y = \\ &= 2i \dot{E}_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) e^{-ikz \sin \varphi} \mathbf{e}_y; \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{H}} &= Y_0 \dot{E}_0 [(\mathbf{e}_x \sin \varphi + \mathbf{e}_z \cos \varphi) e^{-ikx \cos \varphi} - \\ &- (\mathbf{e}_x \sin \varphi - \mathbf{e}_z \cos \varphi) e^{ikx \cos \varphi}] e^{-ikz \sin \varphi} \mathbf{e}_y \\ &= 2Y_0 \dot{E}_0 \left( i \mathbf{e}_x \sin \varphi \sin \frac{m\pi x}{a} + \mathbf{e}_z \cos \varphi \cos \frac{m\pi x}{a} \right) e^{-ikz \sin \varphi}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)